

Шах В.

СПРАВОЧНОЕ РУКОВОДСТВО ПО ИСПЫТАНИЯМ ПЛАСТМАСС И АНАЛИЗУ ПРИЧИН ИХ РАЗРУШЕНИЯ



HANDBOOK OF PLASTICS TESTING AND FAILURE ANALYSIS

THIRD EDITION

VISHU SHAH

Consultek
Brea, California



WILEY-INTERSCIENCE
A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION

Вишну Шах

СПРАВОЧНОЕ РУКОВОДСТВО ПО ИСПЫТАНИЯМ ПЛАСТМАСС И АНАЛИЗУ ПРИЧИН ИХ РАЗРУШЕНИЯ

*Перевод с английского 3-го издания
под редакцией проф., д-ра физ.-мат. наук Малкина А.Я.*

ИЗДАТЕЛЬСТВО



НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Санкт-Петербург, 2009

УДК 543.07
ББК 22.251Англ
ШЗ1

ШЗ1 Шах В. **Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения.**/Пер. с англ. под ред. Малкина А.Я. — СПб.: Научные основы и технологии, 2009. — 732 с., ил.

ISBN 978-5-91703-005-0
ISBN 978-0-471-67189-3 (англ.)

Перевод 3-го издания настоящего справочника — это наиболее полное и исчерпывающее издание, посвященное испытанию пластмасс. В нем рассмотрены все аспекты тестирования полимерных материалов, включая раздел по их идентификации, анализу причин разрушений и дефектов готовой продукции, а также вопросы обеспечения качества и надежности изделий. Акцент в книге сделан на важности выбора метода тестирования и интерпретации результатов. В книге приведен обширный справочный материал.

Учитывая простой язык и доступный стиль изложения, которым написана книга, а также ее практическую направленность, издание будет полезным инженерам, технологам и другим специалистам индустрии пластмасс самого разного уровня.

УДК 543.07
ББК 22.251Англ

All Right Reserved. This translation published under license.

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-91703-005-0
ISBN 978-0-471-67189-3 (англ.)

© John Wiley & Sons, Inc., 2007
© Изд-во «Научные основы и технологии», 2009

Содержание

Содержание	5
Предисловие автора к русскому изданию	11
Предисловие редактора русского перевода	13
1 Основные концепции и достижения в технологии испытаний	15
1.1. Базовые концепции	15
1.2. Спецификации и стандарты	17
1.3. Задачи спецификации	18
1.4. Основной формат спецификации	18
1.5. Достижения в технологии испытаний	19
1.6. Новые достижения и тенденции в технологии испытаний	27
Литература	33
2 Механические свойства	34
2.1. Введение	34
2.2. Испытания на одноосное растяжение (<i>ASTM D638</i> и ИСО 527-4)	42
2.3. Испытания на изгиб (<i>ASTM D790</i> и ИСО 178)	51
2.4. Испытания на сжатие (<i>ASTM D695</i> и ИСО 75-1и 75-2)	57
2.5. Измерения ползучести	59
2.6. Релаксация напряжений	77
2.7. Сопротивление ударным нагрузкам	80
2.8. Прочность на сдвиг (по <i>ASTM D732</i>)	107
2.9. Износ	109
2.10. Усталостные испытания	111
2.11. Испытания на твердость	116
Литература	121
3. Термические свойства	125
3.1. Введение	125
3.2. Испытания для оценки роли температуры	125
3.3. Теплопроводность (<i>ASTM C107</i> , ИСО 8302)	141
3.4. Тепловое расширение	146
3.5. Температура хрупкости (<i>ASTM D746</i> и ИСО 974)	150
Литература	152
4. Электрические свойства	153
4.1. Введение	153
4.2. Диэлектрическая прочность (<i>ASTM D149</i> , <i>IEC 243-1</i>)	154
4.3. Диэлектрическая постоянная и фактор потерь (<i>ASTM D150</i> , <i>IEC 250</i>)	157
4.4. Измерения электрического сопротивления	160
4.5. Сопротивление дугообразованию (<i>ASTM D495</i>)	161
4.6. Требования <i>UL</i>	164
4.7. Экранирование (защита) от электромагнитных/радиопомех (<i>EMI/RFI</i>) [10]	169
Литература	176
5. Климатические испытания	178
5.1. Введение	178
5.2. Ускоренные климатические испытания	180
5.3. Наружные климатические испытания пластмасс (<i>ASTM D1435</i> , ИСО 877)	191
5.4. Стойкость полимерных материалов к плесени (<i>ASTM G21</i>)	196

5.5.	Стойкость полимерных материалов к бактериям (<i>ASTM G22</i>)	197
5.6.	Ограничения методов испытаний на стойкость к микроорганизмам	197
5.7.	Натурные испытания для исследования стойкости полимерных материалов к плесени и бактериям и их ограничения	197
	Литература	198
6.	Оптические свойства	200
6.1.	Введение	200
6.2.	Показатель преломления (<i>ASTM D542</i> , ИСО 489)	201
6.3.	Измерения прозрачности и мутности (<i>ASTM D1003</i>)	203
6.4.	Фотоупругие свойства	205
6.5.	Окраска	208
6.6.	Отражательная способность (<i>ASTM D2457</i> , <i>D523</i>)	217
	Литература	219
7.	Испытания, характеризующие материал	221
7.1.	Введение	221
7.2.	Измерения индекса расплава (<i>ASTM D1238</i> , ИСО 1133)	224
7.3.	Реология	229
7.4.	Измерения вязкости	236
7.5.	Гель-проникающая хроматография	242
7.6.	Техника термического анализа	248
7.7.	Спектроскопия	256
7.8.	Испытания термореактивных смол	259
	Литература	267
8.	Горючесть	269
8.1.	Введение	269
8.2.	Испытания на горючесть. Нежесткие твердые пластмассы (<i>ASTM D4804</i>)	272
8.3.	Испытания на горючесть самоподдерживающихся образцов, находящихся в горизонтальном положении (<i>ASTM D635</i>)	276
8.4.	Испытания на горючесть твердых пластмасс при установке образцов в вертикальном положении (<i>ASTM D3801</i>)	278
8.5.	Воспламенение пластмасс	280
8.6.	Определение кислородного индекса (<i>ASTM D2863</i> , ИСО 4589)	283
8.7.	Горючесть поверхности полимерных материалов	286
8.8.	Горючесть пенопластов при вертикальном расположении образцов (<i>ASTM D3014</i>)	289
8.9.	Горючесть пенопластов при горизонтальном расположении образцов (<i>ASTM D1692</i>)	290
8.10.	Сопротивление возгораемости трудногорючих пластмасс (Федеральный стандарт № 406, метод 203)	291
8.11.	Испытания на дымообразование	292
8.12.	Испытания на горючесть по методу <i>UL 94</i>	297
8.13.	Требования к пожарной безопасности	302
	Литература	305
9.	Химические свойства	306
9.1.	Введение	306
9.2.	Испытания методом погружения (<i>ASTM D543</i> , ИСО 155)	307
9.3.	Сопротивление образованию пятен	308
9.4.	Сопротивление образованию трещин в растворителях	309
9.5.	Образование трещин под воздействием окружающей среды (<i>ASTM D1693</i> , ИСО 4599)	311
	Литература	315

10. Аналитические испытания	316
10.1. Введение	316
10.2. Определение удельного веса (<i>ASTM D792</i>)	316
10.3. Измерение плотности с помощью градиентной колонки (<i>ASTM D1505</i> , ИСО R1183)	318
10.4. Измерение объемной (кажущейся) плотности (<i>ASTM D1895</i>)	320
10.5. Адсорбция влаги (<i>ASTM D570</i> , <i>ISO 62</i>)	321
10.6. Анализ на влажность	322
10.7. Ситовой анализ — определение размера части (<i>ASTM D1921</i>)	327
Литература	327
11. Кондиционирование	329
11.1. Принципы кондиционирования (<i>ASTM D612</i> , ИСО 291)	329
11.2. Описание условий кондиционирования	329
Литература	331
12. Различные методы испытаний	332
12.1. Реометр крутящего момента	332
12.2. Испытания на адсорбцию пластификатора	336
12.3. Определение вязкости методом «чаши»	340
12.4. Испытания на прочность при разрыве	341
12.5. Испытания на разрушение («краш-тест»)	346
12.6. Метод погружения в ацетон (<i>ASTM D2152</i>)	347
12.7. Метод погружения в уксусную кислоту (<i>ASTM D1939</i>)	347
12.8. Испытания изделий	348
12.9. Определение зольности (<i>ASTM D2584</i> , ИСО 3451)	351
Литература	352
13. Идентификация полимеров	353
13.1. Введение	353
13.2. Современные методы идентификации	359
13.3. Идентификация полимеров	364
Литература	371
14. Испытания пенопластов	373
14.1. Введение	373
14.2. Методы испытания жестких пенопластов	373
14.3. Мягкие пенопласты	383
14.4. Свойства пенопластов	389
Общие ссылки	389
15. Анализ причин разрушения	396
15.1. Введение	396
15.2. Типовые случаи разрушения	428
15.3. Анализ причин разрушения	437
15.4. Пример оформления протокола анализа разрушения изделия	464
Литература	466
15.5. Примеры исследований	467
16. Контроль качества	507
16.1. Введение	507
16.2. Статистические методы контроля качества	508
16.3. Введение в статистический контроль процесса	529
16.4. Системы контроля качества	534
16.5. Общие положения	546
16.6. Сертификация поставщика	547
Литература	553

17. Надежность продукции и испытания	554
17.1. Введение	554
17.2. Анализ конструкции продукции/оборудования	555
17.3. Упаковка	556
17.4. Инструкции, предупреждения и обучение	556
17.5. Испытания и хранение информации	557
17.6. Организации, занимающиеся вопросами стандартизации в области техники безопасности	558
Литература	558
18. Неразрушающие испытания и измерения	559
18.1. Введение	559
18.2. Ультразвук	559
18.3. Неразрушающие методы контроля с помощью ультразвуковой техники при испытаниях пластмасс	564
18.4. Обратное рассеяние гамма-лучей	566
18.5. Просвечивание бета-лучами	567
18.6. Лазерное сканирование	567
18.7. Рентгеновская флуоресценция	569
18.8. Эффект Холла	569
Литература	569
19. Профессиональные организации, занимающиеся испытаниями	572
19.1. Американский национальный институт стандартов (<i>ANSI</i>)	572
19.2. Международная организация <i>ASTM</i>	573
19.3. Администрация по контролю пищевых продуктов и лекарственных средств (<i>FDA</i>)	574
19.4. Национальный Институт стандартов и технологии (<i>NIST</i>)	574
19.5. Национальная ассоциация производителей электрооборудования (<i>NEMA</i>)	575
19.6. Национальная противопожарная ассоциация (<i>NFPA</i>)	575
19.7. Национальное санитарное объединение (<i>NSF</i>)	576
19.8. Общество инженеров промышленности пластмасс (<i>SPE</i>)	576
19.9. Общество промышленности пластмасс (<i>SPI</i>)	577
19.10. Гарантийные лаборатории (<i>Underwriters Laboratories, UL</i>)	578
19.11. Международная организация стандартизации (<i>ISO</i>)	579
20. Согласованные международные стандарты на методы испытаний	580
20.1. Введение	580
20.2. <i>ISO/IEC</i> стандарты	581
20.3. <i>ISO</i> и <i>ASTM</i>	581
20.4. Сбор и представление данных, полученных при испытаниях	597
20.5. Компьютерный предварительный выбор материала по согласованным стандартам (<i>CAMPUS</i>)	599
20.6. Справочные данные по свойствам полимеров	604
Литература	607
ПРИЛОЖЕНИЯ	608
Приложение А. Список производителей оборудования для испытаний пластмасс	608
Приложение В. Сокращенные наименования полимерных материалов	616
Приложение С. Глоссарий	618
Приложение Д. Торговые наименования	630
Приложение Е. Организации, занимающиеся стандартизацией	633
Приложение Ф. Профессиональные издания	638
Приложение Г. Список независимых испытательных лабораторий	640
Приложение Н. Спецификации (Методы испытаний конкретных материалов)	644

Приложение I. Справочные таблицы	655
Приложение J. Образовательные программы принятые в США и Канаде, по специальностям пластмассы/полимеры	718
Приложение К	722

Предисловие автора к русскому изданию

Мне доставило большое удовольствие узнать, что моя книга, озаглавленная *Handbook of Plastics Testing and Failure analysis*, 3rd ed, переведена на русский язык. Надеюсь, что она станет доступной для профессионалов, работающих в России в области промышленности пластмасс. Это, конечно, честь для меня.

Хотя мы живем в разных мирах, я верю, что когда мы говорим о полимерной науке и промышленности, мы стоим на общей почве.

Данная книга написана экспертом, который имеет значительный опыт работы в промышленности. Автор хотел бы перевести сложную область испытаний и анализа разрушения пластмасс на язык, доступный и понятый среднему читателю. Для многих профессионалов по всему миру эта книга оказалась полезной и удобной для практического использования. Я искренне надеюсь, что и русскоязычные читатели извлекут для себя пользу из этой книги.

Любые предложения по улучшению книги всегда горячо приветствуются.

Наконец, я хотел бы выразить свою благодарность издателю и всем тем людям, которые сделали возможным издание русского перевода книги. Особенно я хочу выразить мою личную признательность известному специалисту профессору А.Я. Маликину, который осуществил научное редактирование перевода книги.

Виниу Шах

1 ноября 2008 г.

Consultek Consulting Group, Brea, CA, USA

Предисловие редактора русского перевода

Это очень американская книга. Она основана на экспериментальном материале американских фирм, описывает американские стандарты и методы испытаний; и даже единицы измерений — американские (и редактор с согласия издательства решил их не пересчитывать, а лишь дать таблицы перевода единиц¹).

Казалось бы: «*Что он Гекубе, что ему Гекуба?*»². Однако есть что.

Ведь треть всех полимеров, выпускаемых в мире, производится в США, и огромный поток инноваций также идет оттуда. Поэтому гигантский и бесценный американский Опыт (именно, с большой буквы) очень важен для всех в едином полимерном мире, и в этой книге он обобщен.

Переведенная на русский язык книга Вишу Шаха стала в США бестселлером: она выдержала три издания (что очень не просто!), значит, она очень нужна читателям.

И по форме изложения — это тоже очень американская книга. Она написана для «простого» читателя с целью подсказать ему, что и как надо делать без подробной теории. В ней неоднократно встречаются повторения одних и тех же мыслей, чтобы читатель, наконец-то, не только понял, но и проникся тем, что хочет сказать автор.

Книга затрагивает очень широкий спектр вопросов и методов. Профессионал в каждой узкой области легко найдет неточности, отсутствие строгости в изложении, и мы уверены, что скажет: «Я бы написал по-другому и, наверное, лучше». Очень может быть. Но книга написана не для узких профессионалов, а для специалистов, которые хотят почерпнуть в книге сведения применить в своей повседневной деятельности, и именно простота изложения, широта круга обсуждаемых предметов, тесная привязка к практике делают ее интересной для широкого круга читателей.

Особенно привлекает внимание глава, посвященная анализу процесса разрушения. Действительно, это крайне важный вопрос, так как многие боятся применять полимеры именно потому, что такие материалы кажутся очень непрочными и изделия из них иногда неожиданно разрушаются (на самом деле — это далеко не всегда справедливо). Существующая литература в этой области зачастую очень сложна, и ее воспринимают только ученые. Автор, следуя общей линии книги, попытался изложить относящиеся сюда вопросы максимально просто и наглядно. Начиная с простого визуального анализа (а человеческий глаз — один из лучших и наиболее чувствительных инструментов в мире, особенно если это глаз специалиста), и да-

¹ См. приложение I.

² «*What's Hecuba to him, or he to Hecuba...*» — У. Шекспир «Гамлет» (действ. 2, сцена 2).

лее — шаг за шагом — вплоть до самых изощренных современных методов анализа, автор описывает основные типы и механизмы разрушения. Это изложение также адресовано, прежде всего, практическим работникам, которые нуждаются в базовых знаниях в этой области.

Стоит также обратить внимание на главу, посвященную идентификации полимеров. Здесь интересны не только технические аспекты, но и тесный контакт с такими областями, как криминалистика и промышленный шпионаж (впрочем, о последнем автор не упоминает).

Кроме чисто технических данных, в книге содержится очень много информации об организационной структуре контроля производства и стандартизации в США. Это не просто интересно — это крайне полезно знать, потому что и в России со временем будет столь же мощная и развитая система добровольных организаций и общественного контроля того, что касается всех (а именно, качества производимой продукции!), в то же время неразрывно связанная с государственной системой контроля. И при этом автор не раз справедливо подчеркивает, что интересы общества важнее и шире частных интересов промышленности.

Мы решили сохранить даже описание курсов, предлагаемых в американских университетах для студентов, специализирующихся в области полимерных материалов. У отечественных профессоров и преподавателей появится возможность сравнить состав учебных курсов. Однако не менее важно помнить, что Россия вошла в систему международного образовательного процесса, так что — кто знает? — может найдутся активные молодые люди, которые захотят попробовать завершить свое образование за рубежом. И если после этого они вернутся на родину, этот опыт будет очень полезным.

Это очень практичная книга. И огромный справочный материал, даваемый в приложениях, тоже очень практичен, потому что читателю не надо будет тратить время и искать конкретные цифры в различных источниках.

Нам представляется, что эта книга должна стоять на полке в любой даже самой небольшой заводской и исследовательской лаборатории, на которую возложена задача контролировать производимые полимеры и изделия из них.

*Научный редактор перевода
Доктор физ.-мат. наук, профессор А.Я. Малкин*

1 Основные концепции и достижения в технологии испытаний

1.1. Базовые концепции

Еще совсем недавно под испытаниями понимали просто некие дополнения к процессу получения и поставки материала. Но в настоящее время в связи с развитием науки и технологии испытания материала стали неотъемлемой частью исследований и создания новых материалов, проектирования изделий и их производства. Часто задают вопрос: «Зачем проводить испытания?» Ответ на этот вопрос прост. Времена меняются. Изменился подход к производству вещей. Сейчас основное внимание уделяется автоматизации производства, повышению производительности и снижению стоимости. Возрастает интерес к созданию сложных по форме и надежных изделий. Удовлетворение ожиданий потребителя, которые раньше просто игнорировались производителями, в настоящее время становятся первостепенной проблемой. В соответствии с этим изменяются наши приоритеты. На первый план при конструировании оборудования или создании изделия выдвигаются требования безопасности для здоровья человек. Производители и поставщики столкнулись с необходимостью соблюдать многочисленные стандарты и спецификации. Совершенно очевидно, что в таких условиях явно недостаточно опираться на предшествующий опыт и квалификацию обслуживающего персонала. Отсюда вытекают следующие основные причины, которые приводят к необходимости проведения испытаний:

- подтвердить правильность конструкции изделия;
- подтвердить выполнение основных требований к надежности;
- обеспечить безопасность;
- обеспечить защиту от отклонений к предъявляемым требованиям;
- осуществить контроль качества;
- подтвердить соответствие требованиям стандартов и спецификаций;
- проконтролировать технологический процесс;
- провести сравнение с конкурирующими продуктами;
- создать базис для сравнения с новыми материалами.

В течение двух последних десятилетий практически все производители пластмасс решают задачи снижения себестоимости, автоматизации производства и повышения производительности. Взрывной характер роста и версификации продуктов, которые не с чем сравнивать в прошлом, заставляют производителей полимерных материалов обращать особое внимание на испытания и развитие новых разнообразных способов выполнения оценки материалов. Благодаря усилиям различных организаций,

занимающихся стандартизацией, разработчиков материалов и главным образом многочисленным комитетам Американского общества испытателей материалов (*ASTM — American Society for Testing and Materials*) в настоящее время разработано более 10 000 различных методов испытаний.

Необходимость создания специализированных методов испытаний полимерных материалов обусловлено двумя причинами. Изначально свойства пластмасс определялись с помощью дублирования методов, ранее разработанных для металлов и других подобных материалов. Например, метод испытания на удар по Изоду был непосредственно заимствован из способов оценки свойств металлов. Однако из-за принципиально иной природы полимерных материалов возникла необходимость модификации методов испытаний. Как следствие этого, различные группы исследователей предлагали использовать разнообразные нестандартизованные методики. При этом для оценки одних и тех же свойств зачастую предлагались 8–10 различных и независимых методик. Такая практика породила полный хаос среди производителей материалов, поставщиков, инженеров-конструкторов и, в конечном счете, потребителей готовой продукции. Становилось все труднее разобраться среди различных методов и понять реальный смысл предлагаемых результатов испытаний. Стандартизация методов испытаний успешно решила проблему взаимопонимания между разработчиками материала, конструкторами и потребителями, позволив им общаться на одном языке при сопоставлении результатов испытаний и получаемых данных.

Несмотря на проведенную стандартизацию методов испытаний, средний специалист, работающий в промышленности пластмасс, все еще испытывает трудности в понимании и интерпретации результатов испытаний. Это обусловлено довольно сложной процедурой проведения испытаний, количеством предлагаемых методов и организаций, занимающихся стандартизацией. Ключ к преодолению этих трудностей состоит в углублении понимания того, что на самом деле измеряется при использовании той или иной методики, и смысла получаемых результатов с точки зрения применения материала [1]. К сожалению, в промышленности пластмасс уделяется большее внимание ответу на вопрос *как* и недостаточно внимания к вопросу *почему*, который несомненно более важен для трактовки получаемых данных и понимания истинного смысла результатов испытаний. Так, классическим примером недостаточного понимания смысла результатов испытаний является часто используемая трактовка реального смысла температуры деформационной теплостойкости как предела, до которого полимерный материал может выдерживать статическую или динамическую нагрузку в течение длительного времени. В последующих главах настоящей книги мы будем уделять особое внимание значению, интерпретации и ограниченности данных, относящихся к физическим свойствам материала, и особенностям процедуры испытаний.

И в заключение — одно важное предостережение. Чрезвычайно важно понять, что большинство результатов испытаний физических свойств материала получается с довольно большими погрешностями. Как общее правило, обычно считается, что ошибка измерений составляет $\pm 5\%$. Некоторые испытания дают более точные результаты, чем другие. Ошибки измерений возникают по трем основным причинам:

- из-за собственно ошибок применяемого метода;
- из-за ошибок оператора, выполняющего измерения;
- из-за колебаний свойств испытываемых образцов.

При анализе и оценке результатов испытаний необходимо определить источник ошибок измерений, чтобы быть уверенным, что на самом деле существуют реальные различия в получаемых данных [2].

1.2. Спецификации и стандарты

Спецификация — это детальное описание требований к размерам, материалу и т. п. Стандарт — это нечто, установленное для использования как правило или как основа для сравнения или определения объема, количества, состава, иных величин или качества.

Спецификации, разработанные для полимерных материалов, включают определение конкретных требований по отношению к плотности, пределу прочности, теплопроводности и иных характеристик материала. В спецификации также приводятся ссылки на стандарты, которые следует применять для определения тех или иных свойств. Таким образом, стандартные методы испытаний и получаемые при их использовании результаты составляют основу для получения характеристик, оговоренных в спецификации на материал, в отношении необходимых или желательных уровней свойств [3].

Как отмечалось выше, конечная цель создания стандарта — выработка такого общего языка, чтобы не возникало никаких недоразумений при общении между собой производителей, конструкторов, потребителей конечной продукции и иных заинтересованных лиц. Преимущества использования стандартов неисчислимы. Стандартизация обеспечивает производство такими преимуществами, как увеличение эффективности, возрастание производительности, повышение качества, однородность производимой продукции. Стандартизация открывает возможности для международной торговли, обмена технической информацией и для создания общих рынков. Можно только представить себе, какие недоразумения возникали бы в промышленности, если бы не было единых определений фундаментальных единиц длины, массы, времени, не было установленных на государственном уровне единиц весов и мер [4].

Большинство стандартов разрабатываются в промышленности. Промышленные стандарты, как правило, предлагаются самостоятельными организациями, которые прилагают усилия для того, чтобы эти стандарты на добровольной основе были приняты всеми заинтересованными лицами. К числу таких организаций, разработавших большинство стандартов, относятся Американское общество испытателей материалов, Национальный фонд здравоохранения (*National Sanitation Foundation*), ряд университетских лабораторий, Национальная ассоциация производителей электрического оборудования (*National Electrical Manufacturers Association*), Общество инженеров автомобильной промышленности (*Society of Automotive Engineers*). Довольно часто случается так, что стандарты, разработанные в промышленности, не дают адекватной

информации или не пригодны для конкретного применения материала. В таких случаях частные компании разрабатывают свои собственные стандарты, представляющие собой, как правило, модификации общих промышленных стандартов.

Другим основным источником стандартов является федеральное правительство. Стандарты и спецификации, относящиеся к области пластмасс, разрабатываются Министерством обороны США и Администрацией общих служб (*General Services Administration*) под общим руководством управлений военной стандартизации и федеральной стандартизации соответственно.

После окончания Второй мировой войны возникла мощная тенденция развития мировой торговли. Для того чтобы обеспечить создание международных стандартов была создана Международная Организация стандартизации — ИСО (*ISO — International Standards Organization*). ИСО включает в себя организации, занимающиеся вопросами стандартизации, из более чем 90 стран по всему миру. Работа ИСО построена на основе деятельности технических комитетов, которые создаются по соглашению пяти или более стран-участников. Технический комитет 61 ИСО, занимающийся стандартизацией в области пластмасс, является одним из наиболее активных комитетов ИСО.

1.3. Задачи спецификации

Существует много причин, по которым создаются спецификации, но основная из них состоит в создании единого базиса для осуществления продаж оборудования, материалов и продуктов. Спецификации, которые обычно готовятся в инженерных отделах компаний, позволяют отделу продаж сформулировать требования к материалу и быть уверенным, что свойства материала, получаемого в различное время, лежат в требуемых рамках [5]. Спецификация нужна для того, чтобы обеспечить однородность продукции, а также устранить возможные недоразумения между покупателем и продавцом: мы хорошо знаем, как часто покупатель получает от поставщика совсем не то, что он ожидал.

1.4. Основной формат спецификации

Существует множество указаний и руководств по составлению спецификации. Как правило, спецификация на материал должна содержать следующие сведения:

- название и обозначение материала;
- краткое, но достаточно полное описание содержания;
- прилагаемые документы;
- система классификации;
- определения используемых терминов;
- требования производителя к материалу;
- требования к физическим свойствам;
- процедура отбора проб;

- требования к приготовлению и кондиционированию образцов;
- ссылки на рекомендуемые методы, пригодные для подтверждения характеристик материала, или их описание;
- требования инспекции;
- инструкции по предъявлению претензий и отказу от поставки;
- требования к упаковке и маркировке.

1.4.1. Система классификации

Поскольку полимерные материалы крайне редко поставляются в чистом виде (без определенных добавок и наполнителей), должна существовать система классификации материала, которая позволяет устранить возможные недоразумения. Так, спецификация на полиацетали включает описание трех основных типов материалов — гомополимеров, сополимеров и терполимеров. К группе 1, классу 1 относятся гомополимеры общего назначения, к группе 3, классу 3 относятся ударопрочные сополимеры.

В табл. 1.1 приведены детальные требования к материалам на основе полиацеталей.

1.4.2. Требования

Требования к показателям физических свойств должны быть включены в спецификацию согласно классификации продукции.

1.4.3. Подготовка и кондиционирование образцов

Для того чтобы получать воспроизводимые результаты измерений, выполняемых в разное время, необходимо строго соблюдать условия подготовки образцов и их кондиционирования. Процедура подготовки и кондиционирования образцов должна быть ясно прописана в спецификации.

1.4.4. Методы испытаний

Спецификация, в которой не дается адекватная информация относительно методов испытаний, бессмысленна. Должны даваться четкие ссылки на стандарты и общепринятые методы испытаний. Если не существует стандартных методов, то необходимо привести детальное описание и требования к процедуре испытаний, что должно составлять неотъемлемую часть спецификации.

1.5. Достижения в технологии испытаний

В течение последнего десятилетия ситуация с испытаниями пластмасс значительно изменилась. Значительные успехи в создании новых материалов, а также возрастающие требования к надежности полимерных материалов при их применении привели к глобальной тенденции: к однотипности способов оценки материала и

Таблица 1.1. Материалы на основе ПОМ (полиоксиметилена) — Полиацетали. Требования к неокрашенным материалам*

Группа	Описание	Класс	Описание	Тип	Описание ^a	Показатель текучести ИСО 1133 ^b (г/10 мин)
1	Гомополи- меры	1	Материал общего на- значения с высокой скоростью литья	1	Другое	<8
				2		8 –16
				3		16 –28
				4		28 –55
				0		
		2	Для быстрого цикла литья	1	Другое	11 –18
				2		19 –33
				0		
		3	Стабилизирован против УФ-излучения	1	Другое	<8
				2		8 –16
				0		
		4	Ударопрочный	1	Другое	<3
				2		8 –15
				0		
		5	Вторичный полимер общего назначения с высокой скоростью литья	1		
				2		
				3		
		6	Вторичный полимер для быстрого цикла литья	4		
				1		
				2		
		7	Вторичный полимер, стабилизированный против УФ-излучения	1		
				2		
		8	Вторичный полимер, ударопрочный	1		
				2		
		0	Другое	0		
2	Сополи- меры	1	Материал общего на- значения с высокой скоростью литья	1		<4
				2		4 –7
				3		7 –11
				4		11 –16
				5		16 –35
				6		35 –60
				7		60+
				0		
		2	Стабилизирован против УФ-излучения	1	Другое	<4
				2		4 –7
				3		7 –11
				4		11 –16
				5		16 –35
				6		35 –60
				7		60+
				0		
					Другое	

Примечания.

* Данные, получаемые на 4-мм образце, имеют ограниченное значение. Минимальные получаемые величины могут быть изменены и впоследствии пересмотрены на основании статистической обработки результатов измерений, выполненных на образцах подходящих размеров.

^a Описание отсутствует, если только не требуется описание конкретной марки. Все остальные марки поставляются по требованию.

^b Показатель текучести при 190/2,16.

^c Скорость изменения температуры 10 °С/мин. Использовать вторую кривую плавления.

Температура плавления ИСО 3146, метод С2 ^c , °С, минимум	Плотность ИСО 527, г/см ³	Предел проч- ности при растяжении, ИСО 527 ^d , МПа, минимум	Модуль при изгибе, ИСО 178 ^e , МПа, минимум	Ударная проч- ность по Изоду, ИСО 180/1А ^f , КДж/м ² , минимум	Деформационная теплостойкость ИСО 75, Метод А ^g , 1,82 МПа °С, минимум
170	1,39 – 1,44	65	2400	8,5	100
170	1,39 – 1,44	65	2700	5,0	100
170	1,39 – 1,44	65	2700	4,5	105
170	1,39 – 1,44	65	2700	4,0	105
170	1,39 – 1,44	65	2400	4,5	100
170	1,39 – 1,44	65	2400	4,1	100
170	1,39 – 1,44	65	2400	8,5	100
170	1,39 – 1,44	65	2700	5,0	100
170	1,31 – 1,37	35	1100	70	70
170	1,36 – 1,42	45	1900	9,0	80
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 1, типа 1					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 1, типа 2					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 1, типа 3					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 1, типа 4					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 2, типа 1					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 2, типа 2					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 3, типа 1					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 3, типа 2					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 4, типа 1					
Те же свойства, что и у материала группы 1, класса 4, типа 2					
Другое					
160	1,38 – 1,43	58	2300	5,5	90
160	1,38 – 1,43	58	2300	4,5	90
160	1,38 – 1,43	58	2300	4,0	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	4,0	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	3,5	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	3,0	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	2,5	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	5,5	90
160	1,38 – 1,43	58	2300	4,5	90
160	1,38 – 1,43	58	2300	4,0	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	4,0	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	3,5	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	3,0	95
160	1,38 – 1,43	58	2300	2,5	95

^d Предел прочности определяется на образцах типа I согласно описанию требованиям ИСО 527. Скорость перемещения зажима должна равняться 5 мм/мин ± 10%.

^e Модуль при изгибе определяется на образцах размером 80±2 мм×10±0,2 мм×4±0,2 мм согласно требованиям ИСО 178.

^f Ударная прочность по Изоду должна определяться на образцах размером 80±2 мм×10±0,2 мм×4±0,2 мм, по методу А.

^g Деформационная теплостойкость должна определяться на образцах размером 120±2 мм×10±0,2 мм×4±0,2 мм.

Окончание табл. 1.1

Группа	Описание	Класс	Описание	Тип	Описание ^a	Показатель текучести ИСО 1133 ^b (г/10 мин)
		3	Ударопрочный	1	Другое	11 –26
				2		11 –26
				3		4 –11
				4		5 –11
				5		
				0		
		4	Модифицированный для работы на изгиб	1	Другое	<20
				0		
		5	Вторичный полимер общего назначения с высокой скоростью литья	1		
				2		
				3		
				4		
				5		
				6		
		6	Вторичный полимер, стабилизированный против УФ-излучения	1		
				2		
				3		
				4		
				5		
				6		
		7	Вторичный полимер, ударопрочный	1		
				2		
				3		
				4		
				5		
				1		
		8	Вторичный полимер, модифицированный для работы на изгиб	0		
				0		
		0	Другое			
3	Терполимеры	1	Материал с высокой прочностью расплава	1	Другое	<2
				0		
		2	Вторичный материал с высокой прочностью расплава	1		
				0		
		0	Другое	0	Другое	
0	Другое	0	Другое	0	Другое	

Температура плавления ИСО 3146, метод C2 ^e , °С, минимум	Плотность ИСО 527, г/см³	Предел прочности при растяжении, ИСО 527 ^d , МПа, минимум	Модуль при изгибе, ИСО 178 ^e , МПа, минимум	Ударная прочность по Изоду, ИСО 180/1A ^f , КДж/м², минимум	Деформационная теплостойкость ИСО 75, Метод A ^g , 1,82 МПа °С, минимум
155 155 155 155	1,34 – 1,40	40	1500	6,0	70
155					
155					
155					
155					
155					
155					
155					
155					
Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 1, типа 1 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 1, типа 2 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 1, типа 3 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 1, типа 4 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 1, типа 5 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 1, типа 6 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 1, типа 7					
Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 2, типа 1 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 2, типа 2 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 2, типа 3 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 2, типа 4 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 2, типа 5 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 2, типа 6 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 2, типа 7 Те же свойства, что и у материала группы 2, класса 2, типа 7					
160	1,38 – 1,43	56	2250	3,5	90
Те же свойства, что и у материала группы 3, класса 1, типа 1					

представлению их характеристик, что далеко выходит за границы первоначальных задач сравнительных испытаний. Результаты испытаний в настоящее время используются как основу для проектирования и создания комплексных моделей, которые бы позволили дать обоснованные предсказания относительно использования конечных изделий. Как следствие, те методы испытаний, которые в недавнем прошлом давали вполне адекватные экспериментальные данные, в настоящее время представляются устарелыми. Поэтому были предприняты попытки создания современного испытательного оборудования, что привело к радикальному обновлению лабораторий для испытаний пластмасс.

Традиционные лаборатории в прошлом представляли данные испытаний, которые основывались на подходах и стандартах, ранее разработанных для металлов и подобных материалов. Такие данные вполне пригодны для сравнения одного материала с подобным ему, но наблюдаемые различия никак не отражали влияние факторов, специфических для полимеров, таких как роль температуры и влияние структуры материала, которая играет столь важную роль при применении изделий на практике. По мере того как возрастала сложность условий применения изделий из пластмасс, увеличивалась необходимость в разработке строго обоснованных методов и соответствующей испытательной техники. Современные испытательные лаборатории оснащены полностью автоматизированным оборудованием, которое создает высокоточные базы данных, отражая при этом влияние внешних факторов на свойства полимерных материалов.

Хорошим примером в этом отношении является повышение строгости условий эксперимента при использовании универсальных испытательных машин. В прошлом это были сравнительно простые устройства, которые позволяли осуществлять растяжение, сжатие и изгиб или что-то иное. Как правило, такие испытания проводились (согласно требованиям *ASTM*) при комнатной температуре и результатом их была одна характерная точка, например предел прочности (выражавшийся в США в фунтах на квадратный дюйм, *psi*). В настоящее время произведено не только усовершенствование оборудования, но оно стало использоваться для получения комплекса технических характеристик, в частности зависимости напряжения от деформации при различных условиях окружающей среды. Это позволяет включать получаемые данные в единый реестр результатов многоточечных испытаний, предусмотренный требованиями стандарта ИСО 11403 «Сбор и представление результатов сопоставимых многоточечных испытаний» (*«Acquisition and Presentation of Comparable Multi-Point Data»*).

Другим примером могут служить испытания на сдвиг образцов с V-образным надрезом («метод Иосепеску»). Здесь предлагается использовать датчик деформаций, с помощью которого можно с высокой точностью измерить деформации и рассчитать модуль упругости армированных композиционных материалов.

В современных испытательных машинах используется компьютеризированный метод сбора информации, а применение программного обеспечения на базе *Windows* позволяет выполнять практически все инженерные расчеты, а также выполнять дополнительные функции типа расчета энергии разрушения. Датчики усилий и экстензиометры (датчики относительной деформации) калибруются независимо, скорость

движении зажимов контролируется с помощью числового программного обеспечения, так что в итоге получается реальная зависимость напряжения от деформации. Другим современным усовершенствованием, предлагаемым для универсальных испытательных машин, являются двухосные экстензиометры, которые позволяют измерять не только продольную, но и поперечную деформацию, что позволяет надежно определять коэффициент Пуассона. Предлагаются также прикрепляемые датчики деформации для исследования жестких композиционных материалов. Если в прошлом расчеты деформации основывались на скорости раздвижения зажимов, то в настоящее время обычным стало применение датчиков деформации — экстензиометров, которые вместе с лазерными датчиками дают гораздо более точную информацию относительно реальных величин деформации материала.

Важно отметить, что поскольку усовершенствовалась система сбора данных, соответственно повысились требования к точности измерений на испытательных машинах, а задача сбора данных включается в стандартизованную методику эксперимента. Так, стандарты *ASTM D638* и *ISO 527* требуют, чтобы при расчете модуля, основного при испытаниях на растяжение, использовались экстензиометры. Методики, основанные на измерении скорости движения зажимов, были признаны неадекватными, особенно если речь шла об измерениях в области малых деформаций, используемых для расчета модуля упругости.

Другая область измерений, в которой достигнуты значительные успехи, — технология ударных испытаний. Исторически испытания на ударные нагрузки ограничивались методом Изода, которые позволяли оценить энергию, сохраняющуюся после нанесения удара по образцу. Этот метод особенно важен для материалов, чувствительных к надрезу. Кроме этого метода, применялся неинструментальный метод стойкости к удару, наносимому падающим грузом. Это качественный метод, который характеризовал прочностные свойства материала при ударе по высоте падения груза, приводящего к разрушению образца. Хотя оба эти метода полезны при сравнительных испытаниях полимерных материалов, информация относительно того, каким образом происходит разрушение образца, оказывается очень скудной.

В настоящее время доступно оборудование для ударных испытаний, которое позволяет осуществлять многоосное нагружение образца с инструментальным контролем хода эксперимента. Это позволяет не только оценивать усилие, создаваемое при разрушении образца (в Ньютонах), но и определять полную временную зависимость силы, что позволяет находить энергетическую характеристику и проследить за всеми этапами процесса разрушения. Затраты энергии могут быть определены для любой точки на зависимости усилие–время или усилие–деформация. Данные такого рода обеспечивают достаточный объем информации для того, чтобы оценить характер разрушения: является ли процесс разрушения хрупким или пластичным, а также определить начальную точку разрушения образца.

Хотя одноточечные измерения, подобные описанным выше, были усовершенствованы с точки зрения их надежности и полезности для сравнения полимеров, все же они успешно вытесняются более строгими многоточечными испытаниями, которые дают необходимую информацию для конструирования изделий из полимерных материалов. Как уже упоминалось выше, такие одноточечные методы пришли из про-

мышленности металлов. Эти методы хороши для материалов, свойства которых не сильно зависят от температуры, что вполне справедливо для металлов. В случае же полимеров температура играет очень важную роль, поскольку изделия из полимеров используются в различных условиях окружающей среды, подвергаясь воздействию не только напряжений, но и различных химических агентов.

При использовании полимеров в более ответственных областях, например в автомобильной промышленности, роль многоточечных измерений становится все более значительной, поскольку эти данные используются инженерами-проектировщиками для моделирования механического поведения изделия в различных температурных режимах. Данные относительно механических свойств материала, получаемые с помощью такого оборудования, как, например, динамический механический анализатор (метод ДМА), дают необходимую информацию, касающуюся зависимости поведения изделий при различных температурах и частотах. Остальные обычно выполняемые многоточечные испытания описаны в стандарте ИСО 11403-1 «Пластмассы. Сбор и представление результатов сопоставимых многоточечных испытаний». Эти испытания включают зависимости напряжения от температуры при различных температурах, изохронные зависимости напряжения от деформации, получаемые при испытаниях на ползучесть, и ударная прочность по Шарпи при различных температурах.

Приводимые выше примеры относились преимущественно к описанию механических свойств. Однако прогресс в технологии испытаний коснулся практически всех областей материаловедения полимеров, включая термические и аналитические исследования. К числу примеров такого рода относятся измерения коэффициента термического расширения и Фурье-ИК (*FTIR*) анализ.

Коэффициент термического расширения, который характеризует изменения длины образца с ростом температуры, ранее измерялся с помощью аналогового dilatометра и ванны, что (согласно стандарту *ASTM D696*) позволяло проводить такие измерения только в ограниченном диапазоне температур, от -30 до 30 °C. Создание композитов и новых высокотемпературных пластиков потребовало расширения этого диапазона от -40 до 250 °C. Современные технологии измерений основаны на использовании термомеханического анализатора (метод ТМА). Работа этого прибора управляется компьютером, и зависимость расширения как функция температуры определяется с большей точностью в гораздо более широком температурном диапазоне. В этой связи стандарт *ASTM D696* пересмотрен, и разработан новый стандарт *ASTM E228*, распространяющийся на область высоких температур, который предусматривает контроль температуры в высокотемпературной области.

Фурье-ИК спектроскопия используется для измерения поглощения и пропускания светового потока в инфракрасной области спектра для того, чтобы можно было сравнивать характерные спектральные линии для различных полимеров. В прошлом химик-аналитик при анализе ИК-спектров использовал справочные пособия и сравнивал получаемые спектры для рассматриваемого материала со спектрами, приводимыми в литературе, что позволяло идентифицировать исследуемый образец. Это был довольно трудоемкий и длительный процесс. В настоящее время компьютеризированная библиотека данных предлагается многими библиотеками для тысяч

образцов, что делает операцию идентификации образца достаточно быстрой, более надежной, позволяя одновременно определить все имеющиеся загрязнения.

В дополнение к технологическим применениям, промышленность испытаний сделала значительный рывок в глобальном распространении стандартов, в которых используются новые методы характеристики материалов, предлагаемых ИСО и Международным электрохимическим комитетом (IEC). Предлагаемые методики испытаний имеют воистину международный характер, поскольку они приняты согласно процедуре «одна страна — один голос». Такие стандарты создают общепринятый язык испытаний для промышленности в доминирующей части мира.

Система *CAMPUS* («*Computer-aided Materials Pre-selection by Uniform Standards*»), в которой используются данные, получаемые по стандартам ИСО и IEC, предоставляют данные по свойствам материалов в едином формате, что дает такие возможности сравнения и выбора материала для инженера, дизайнера, продавца, которые раньше были недостижимы.

Технические достижения, обсуждавшиеся выше, представляют собой лишь отдельные примеры многочисленных изменений, которые произошли в технологии измерений в последнее десятилетие. Для того чтобы почувствовать дыхание перемен, профессионалы, работающие в этой области, должны постоянно обновлять свои знания о технологии измерений, насущных требованиях промышленности и возможностях получения более точной информации, имеющей физический смысл. Справочники и в частности «Справочник по методам и технологии испытаний пластмасс» открывают возможности следить за происходящими изменениями. Кроме того, участие в деятельности таких организаций, как *ASTM* и ИСО, предоставляет информацию из первых рук в отношении того, что происходит в промышленности, а также об изменениях в действующих стандартных методах испытаний. Применения полимерных материалов захватывают все более передовые области промышленности, а информация, исходящая из испытательных лабораторий, позволяет сверять шаг с технологическими достижениями.

1.6. Новые достижения и тенденции в технологии испытаний

Автоматизация, скорость и инструментальный контроль — вот три ключевые положения в современной технике испытаний XXI века. Возрастающее число производителей испытательной техники позиционируют себя как компании, которые требуют меньший объем инвестиций и позволяют работать с большей производительностью.

Автоматизация сопровождается использованием робототехники. Было установлено, что использование автоматизированных систем такого типа снижает затраты на проведение стандартных испытаний большого количества образцов на растяжение, изгиб и удар, что позволяет использовать персонал для решения более сложных задач. При использовании робота с шестью степенями свободы и сканером такая система позволяет обслуживать несколько испытательных машин одним роботом. Такая система была разработана ведущим производителем [6] и позволяет использовать

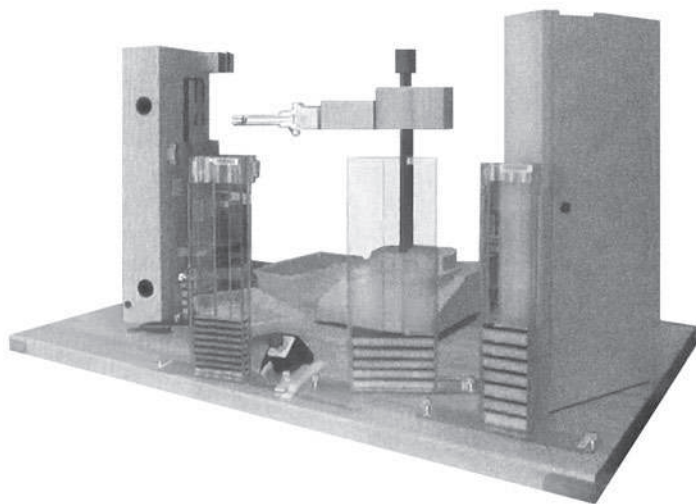


Рис. 1.1. Автоматизированная установка для проведения испытаний (с разрешения *CEAST USA*)

продвинутые технологии, включая посылку сообщений по электронной почте, через СМС и т. п., обеспечивая постоянный контроль процесса и его дистанционную диагностику.

Экспериментальные данные, получаемые при испытаниях, анализируются и непрерывно передаются в другую офисную программу, интегрирующую всю поступающую информацию.

На рис. 1.1 показан пример такой высокоавтоматизированной измерительной системы.

Автоматизация процесса измерений также способствует повышению точности и воспроизводимости подготовки и установки образцов. Устройство для нанесения надреза на образцы при испытаниях на удар, управляемое микропроцессором, может проделывать эту операцию на 50-ти образцах одновременно. Это устройство основано на осуществлении линейного движения резца, что уменьшает трение и снижает напряжение, которые создаются при применении обычного роторного режущего инструмента. Устройство для автоматического создания надреза показано на рис. 1.2.

Все большее количество компаний заинтересовано в ускорении стандартных испытаний. Производители испытательного оборудования отвечают на это требование, создавая оборудование, способное к осуществлению более быстрых измерений. В качестве примера можно привести двухцилиндрический капиллярный реометр, показанный на рис. 1.3.

Использование такой измерительной схемы позволяет непосредственно в одном эксперименте определять входовую поправку по Бэгли, что вдвое повышает эффективность измерений благодаря фактическому использованию двух одновременно работающих капиллярных реометров. Все это приводит к существенной экономии времени, поскольку позволяет выполнить большее количество измерений зависимости

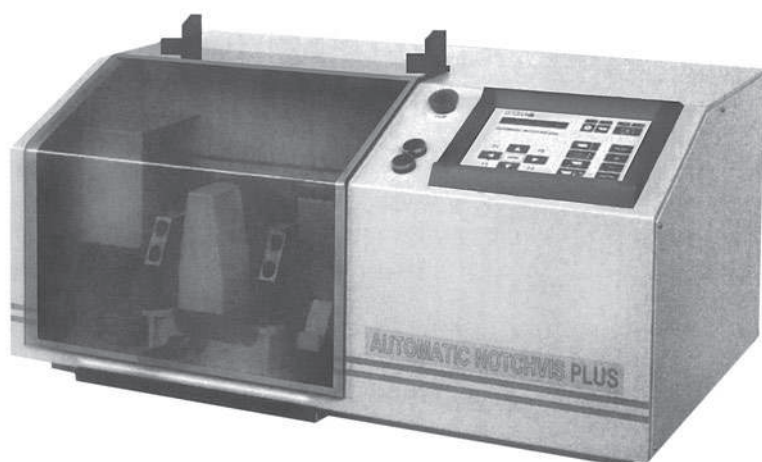


Рис. 1.2. Устройство для автоматического нанесения надреза (с разрешения *CEAST USA*)



Рис. 1.3. Двухцилиндровый капиллярный реометр (с разрешения *CEAST USA*)

скорость–давление на одном образце, ступенчато изменяя режим течения. При этом оператор свободен и может выполнять другие задачи.

Расширяется использование интернета для передачи данных испытаний потребителю. Последний получает результаты испытаний в течение нескольких минут после завершения измерений. Существенно, что такая передача данных может быть защищена против постороннего проникновения [7], что позволяет безопасно хранить и воспроизводить данные для большого количества испытуемых материалов в комплексном формате. Это относится и к данным, используемым для моделирования в системе CAE. Производители материалов, таким образом, получают возможность хранить и мгновенно распространять необходимую информацию по всему миру.

Получает развитие использование инструментальных методов ударных испытаний полимерных материалов. В настоящее время мы наблюдаем заметную экспансию таких методов в промышленности. Испытательное оборудование такого типа позволяет получать гораздо больше осмысленной информации по сравнению с результатами традиционных испытаний. Инструментальные методы используют в основном для исследования и создания новых материалов, а также для моделирования реальных условий эксплуатации изделий. В то время как традиционные методы испытаний дают только суммарное значение энергии, затрачиваемой на разрушение образца, инструментальные методы контроля разрушения при ударе позволяют получить высокоскоростную картину зависимости нагрузки от деформации. Это позволяет судить о том, происходит ли разрушение по хрупкому или пластическому механизму деформаций, а также разделить вклады энергии на инициирование образования и распространение трещины. Такой метод позволяет выявлять нюансы в картине пластического разрушения образцов [8].

Использование инструментальных методов исследования разрушения при ударе основывается на том, что молот испытательной машины или падающий груз снабжаются датчиками усилия. Реальная зависимость усилия от времени при ударных испытаниях сохраняется с помощью быстродействующей системы сбора данных. Эти экспериментальные данные могут использоваться для расчета силы, энергии, скорости и деформации как функций времени. Анализ данных такого рода позволяет определить: а) усилия, затрачиваемую энергию и деформации, которые необходимы для инициирования роста трещины и затем полного разрушения образца; б) чувствительность материала к скорости нанесения удара и в) температуру, при которой происходит переход от хрупкого к пластическому разрушению образца.

Полагают, что успехи в создании пьезоэлектрического датчика для инструментального контроля процесса ударного разрушения полимеров позволяют резко повысить чувствительность, что в свою очередь делают возможным испытания очень тонких пленок, пенопластов и большинство других материалов, используемых в упаковочной отрасли промышленности.

Достижения анализа механики разрушения полимером привели к тому, что соответствующие подходы к испытаниям зафиксированы в стандарте ИСО 17281. Это сделало возможным в настоящее время исследовать внутренние процессы, происходящие в материале при его ударном разрушении. В качестве количественных характеристик этих процессов предлагается использовать два параметра — фактор



Рис. 1.4. Тестер для инструментального контроля процесса разрушения (с разрешения CEAST USA)

критической интенсивности напряжений (K_{Ic}) и скорость высвобождения энергии (G_{Ic}). Эти параметры не зависят от размеров и формы исследуемого образца или конечного изделия, и в качестве независимых физических параметров могут быть использованы в программе *CAD* для определения условий разрушения изделия. Пример тестера для осуществления инструментального контроля процесса ударного разрушения показан на рис. 1.4.

Бюджетные ограничения и необходимость сокращения обслуживающего персонала играют огромную роль практически во всех секторах промышленности пластмасс, а большие исследовательские центры находятся под особо пристальным контролем. В результате этого усиливается финансирование независимых аналитических и испытательных лабораторий. В соответствии с недавними оценками финансирование составляет порядка 10 млрд долларов, причем его рост ожидается более чем на 20% в год. Примером такой первой в своем роде доступной для прямых контактов аналитической испытательной лабораторией является *Neolytica*TM [9]. Эта глобальная, доступная в Интернете система дает возможность потребителям наилучшим образом снижать затраты на оборудование и персонал и осуществлять свои проекты с помощью обширной сети аккредитованных исследовательских лабораторий. Используя обслуживание с помощью внешних лабораторий, компания может значительно

снизить затраты на организацию своих не полностью используемых лабораторий, уменьшить расходы на дорогостоящую рабочую силу и сохранить собственные лаборатории только для проведения наиболее продвинутых исследований и решения возникающих проблем.

Использование полимерных материалов в областях применения, связанных с высокой ответственностью, потребовало создания методов испытаний, моделирующих реальные условия эксплуатации изделий. При этом традиционные методы сопоставления и ранжирования материалов зачастую оказываются неадекватными, поскольку при этом результаты испытаний не отражают конкретных условий применения полимера. При лабораторных испытаниях материал исследуется в специальных условиях и по стандартным методикам. Новые правила побуждают поставщиков материалов и производителей в автомобильной промышленности проводить испытания и характеризовать полимеры по их способности поглощать энергию, если эти материалы используются для изготовления приборных панелей и иных деталей, которые могут приходить в столкновение с водителем и пассажирами при дорожных происшествиях. Высокоскоростные испытания на удар гораздо точнее моделируют динамику нагрузок при авариях, нежели традиционные ударные испытания.

Для того чтобы моделировать условия, возникающие при ударе внутри кабины автомобиля, ведущими компаниями, занимающимися испытаниями пластмасс, была создана климатическая камера. Она первоначально была сконструирована для наблюдения через стекло за поведением образцов нестандартных размеров, например, автомобиля целиком, а также и маленьких стандартных образцов размером 10×15 мм.

Оценить влияние различных типов лобовых и боковых стекол на интерьер автомобиля можно, установив их в испытательной камере. Измерения цвета и блеска стекол, а также их визуальную оценку проводят в соответствии с существующими методиками испытаний. На рис. 1.5 показан один из вариантов блока, в котором могут быть установлены различные детали, в частности радио-наушники, системы дистанционного контроля, крышки для проигрывателя, а также пленки для покрытия стекол.

В последнее время была предложена новая методология для характеристики инженерных пластиков. Она основана на моделировании процессов экструзии и литья под давлением и направлена на то, чтобы оценить, насколько данный материал стоек к действию сдвиговых деформаций, температуры, давления и длительности пребывания в различных условиях. В этом случае поведение материала можно предсказать до осуществления процессов переработки. Для этой цели используется реометр непрерывного действия, и измеряется вязкость образцов, выходящих из насадки в реальном времени. Получаемые данные используют для регулировки скорости вращения червяка в экструдере с тем, чтобы поддерживать требуемый уровень вязкости [10].

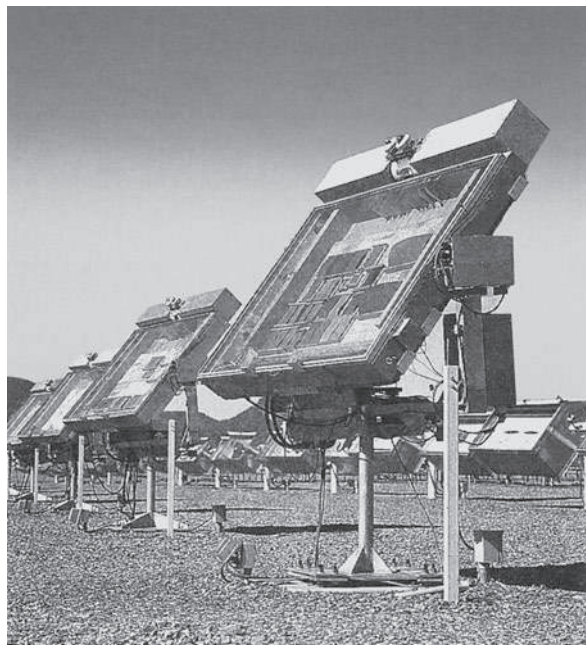


Рис. 1.5. Климатическая камера (с разрешения *Atlas Material Testing, Inc.*)

Литература¹

1. Lamond L., «Right Perspective on Test Data Matches Material to Application Criteria», *Plastics Design and Processing* (Mar 1976), pp. 6–10.
2. «A Guide to Standard Physical Test for Plastics», *Dupont Tech. Rept. No. TR 91*.
3. Schmitz J.V. (Ed.), *Testing of Polymers*, Interscience, New York, 1965, p. 3.
4. *Ibid*, p. 4.
5. *Ibid*, p. 22.
6. Zwick USA, 1620 Cobb International Blvd., Kennesaw, GA 30152.
7. Datapoint Labs., 95 Brown Road., Ithaca, NY 14850.
8. Sherman L.M., «Impact: Which Test to Use? Which Instrument to Buy?» *Plastics Technology online*, www.plasticstechnology.com/articles/200110fal.html.
9. Neolytica. 3606 W. Liberty Road., Ann Arbor, MI 48103.
10. Stewart R., «Plastics Testing», *Plastics Engineering* (June 2003), pp. 20–28.

¹ Здесь и далее списки литературы приведены по оригинальному изданию.

2 Механические свойства

2.1. Введение

Механические свойства, среди прочих, являются часто основными, поскольку практически при всех применениях пластмасс в самых различных областях конечные изделия в той или иной степени подвергаются силовым нагрузкам. Вместе с тем инженеры-конструкторы лучше всего воспринимают информацию именно о механических свойствах материала. Выбор материала для разных применений часто основывается на знании механических свойств, таких как предел прочности, удлинение при разрыве, ударная прочность. Как правило, соответствующую информацию можно получить из технической литературы, предоставляемой производителями материалов. Слишком часто конструктор обращается к сопоставлению опубликованных характеристик различных полимеров и их марок, а не к оценке реальных свойств материала применительно к конкретному изделию. В действительности на практике полимер очень редко, а может быть и никогда, не подвергается действию стационарной деформации одного типа, особенно если учитывать действие таких факторов, как влияние температуры и окружающей среды. Поскольку справочные данные относительно свойств полимеров основываются на результатах лабораторных испытаний, проведенных в строго стандартизованных условиях, опасность выбора материала, основываясь только на таких данных, вполне очевидна. Поэтому чрезвычайно важно понимать смысл результатов лабораторных испытаний механических свойств и реальных условий эксплуатации изделия в течение длительного времени.

Понимание принципов деформационного поведения полимерных материалов имеет для проектировщика первостепенное значение. Типичный пример диаграммы напряжение–деформация (или нагрузка–удлинение) показан на рис. 2.1. Для лучшего восприятия таких диаграмм следует дать определения нескольким основным терминам, используемым при обсуждении деформационной кривой.

Напряжение — усилие, приложенное для создания деформации, отнесенное к единице площади поперечного первоначального сечения образца; выражается в фунтах/дюйм².

Деформация — отношение удлинения к базовому расстоянию между метками датчика; изменение длины, отнесенное к первоначальной длине ($\Delta l/l$); безразмерная величина.

Удлинение — увеличение длины образца под действием приложенной силы.

Точка текучести — первая точка на деформационной кривой, начиная с которой увеличение деформации происходит без роста напряжения.

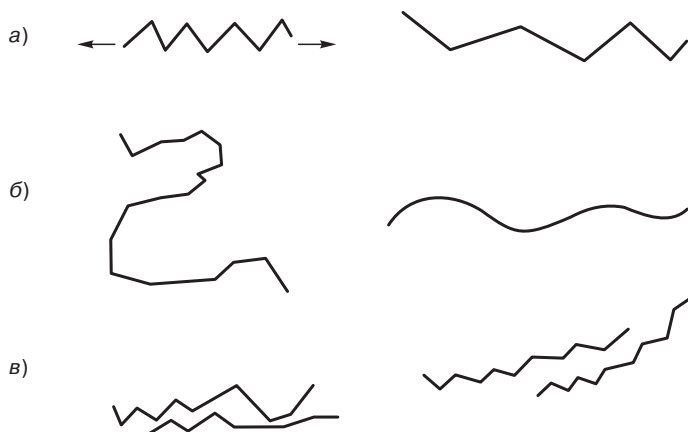


Рис. 2.2. Деформации макромолекул при растяжении: а — изгиб связей; б — распрямление клубков; в — скольжение

называется пределом пропорциональности, поскольку только до этой точки напряжения пропорциональны деформации. Деформации полимера до точки *C* по своей природе упругие и, следовательно, эти деформации полностью обратимы.

Деформации до точки *B* на деформационной кривой на рис. 2.1 малы, и они обусловлены изгибом и растяжением внутримолекулярных связей в полимерной молекуле, как это показано на рис. 2.2, а. Деформации этого типа происходят мгновенно, и они обратимы. При этом отсутствует смещение молекул друг относительно друга. Деформации, осуществляемые за точкой *C* (рис. 2.1), отвечают распрямлению свернутых участков макромолекулы, как это показано на рис. 2.2, б. При этом также не происходит относительного перемещения макромолекул, а деформации такого рода обратимы, хотя и не мгновенны.

Растяжение, происходящее за точкой текучести или за пределом упругости (рис. 2.2, в), оказываются необратимыми. Эти деформации действительно связаны с относительным перемещением макромолекул друг относительно друга. Молекулы после такого смещения не могут вернуться в первоначальное положение, так что достигается состояние сохраняющихся деформаций.

Три типа деформаций, показанные на рис. 2.2, не осуществляются независимо, а налагаются друг на друга. Деформации внутримолекулярных связей происходят практически мгновенно. Распрямление клубков — более медленный процесс, а самым медленным является относительное скольжение макромолекул [1].

Характер развития деформаций различных типов может быть объяснен на механических моделях, которые показывают, что происходит при различных условиях нагружения. Одна из таких моделей, называемая моделью Максвелла, представляет собой сочетание пружины и цилиндра с движущимся в нем поршнем (рис. 2.3).

В этой модели свойства пружины описываются законом Гука, и она представляет собой модель идеально упругого тела. Растяжение пружины моделирует деформации, происходящие при изгибе и растяжении внутримолекулярных связей. Если заменить линейную пружину на нелинейную, то такая пружина будет моделировать процессы,

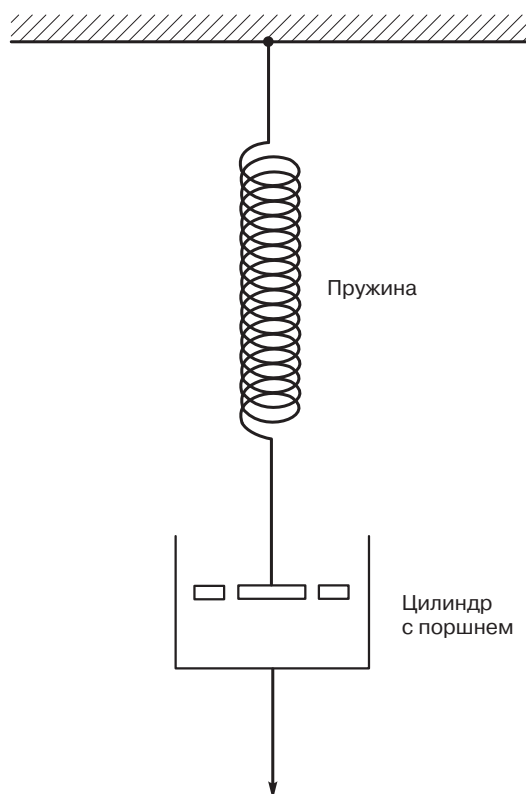


Рис. 2.3. Модель Максвелла

происходящие при разворачивании частей макромолекулы, образующих клубки. В цилиндр залита вязкая жидкость, которая протекает через отверстия в дискообразном поршне при его перемещении. Перемещения поршня моделируют необратимые деформации, которые приводят к новому деформированному состоянию материала. Этот процесс моделирует проскальзывание молекул друг относительно друга.

Анализ поведения такой модели позволяет обнаружить ряд интересных особенностей механического поведения полимера, в частности, связанных с влиянием температуры. Так, при повышении температуры вязкость жидкости уменьшается и это облегчает перемещения поршня, что в итоге приводит к большим величинам его смещения. При понижении температуры наблюдается обратный эффект — жидкость становится более вязкой, так что при растяжении происходит разрушение раньше, чем достигаются значительные деформации. Это явление аналогично хрупкому разрыву. Другие аспекты поведения полимера выявляются, если рассмотреть влияние скорости движения поршня как модели роли скорости деформации [2].

Известно большое разнообразие механических моделей, подробно рассмотренных в монографиях Родригеса [3], Бэера [4] и Уильямса [5].

Полимерные материалы можно в первом приближении классифицировать, основываясь на характеристиках их мягкости, хрупкости, твердости и пластичности. Основой такой классификации служит деформационная диаграмма [6]. Площадь под деформационной кривой может трактоваться как мера пластичности материала. Рис. 2.4 иллюстрирует различные типы поведения полимерных материалов.

Мягкие и низкопрочные материалы характеризуются низкими значениями модуля упругости, низким пределом текучести и умеренными значениями удлинения при разрыве. Типичным представителем таких материалов является политетрафторэтилен.

Мягкие и пластичные материалы отличаются низкими значениями модуля и предела текучести, но высокими удлинениями при разрыве и соответствующим высоким значениям прочности. Классическим представителем материалов этого типа является полиэтилен.

Твердые и хрупкие материалы — это пластмассы с высоким значением модуля и низкой деформируемости; у них вообще может не наблюдаться предел текучести. Один из примеров таких материалов — это фенольные смолы общего назначения.

Твердые и высокопрочные материалы отличаются высокими значениями модуля, предела текучести и, как правило, высокой прочностью, но низким разрывным удлинением. Хорошим примером таких материалов являются полиацетали.

Твердые и пластичные материалы характеризуются высокими значениями модуля, предела текучести, прочности и к тому же у них наблюдаются высокие разрывные удлинения. К классу таких материалов относится, например, поликарбонат.

На рис. 2.4, б показано соотношение между пластичностью и прочностью полимерных материалов.

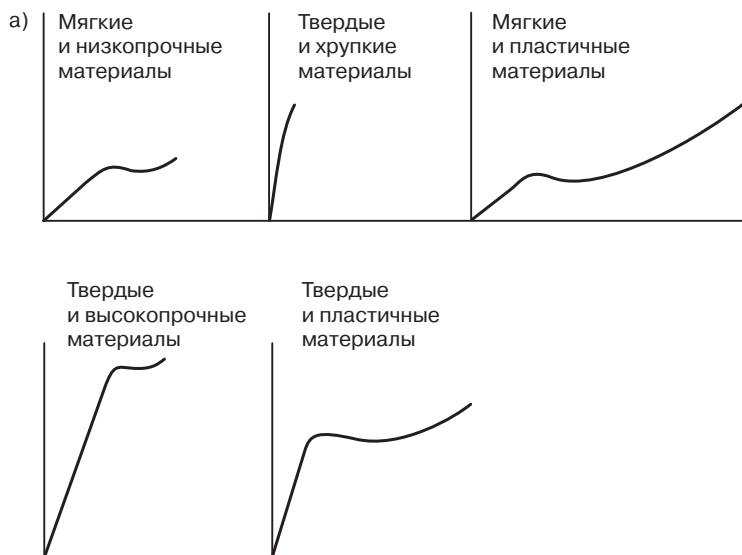
В табл. 2.1 представлены основные характеристики материалов различных типов применительно к их механическим свойствам [7].

В некоторых случаях конструктору полезно знать зависимость напряжения от деформации для конкретного материала не только при растяжении, но и при сжатии. В области небольших деформаций деформационные кривые при растяжении и сжатии почти совпадают. Поэтому модуль упругости при сжатии равен модулю упругости при растяжении. Однако при больших деформациях сжимающие напряжения оказываются существенно выше, чем соответствующие растягивающие напряжения. Этот эффект показан на рис. 2.5.

Табл. 2.1. Соотношение между напряжением и деформацией для полимерных материалов различных типов

Описание типа полимера	Модуль	Предел текучести	Предел прочности	Удлинение при разрыве
Мягкий и низкопрочный	Низкий	Низкий	Низкий	Умеренный
Мягкий и пластичный	Низкий	Низкий	Предел текучести	Высокий
Твердый и хрупкий	Высокий	Отсутствует	Умеренный	Низкий
Твердый и высокопрочный	Высокий	Высокий	Высокий	Умеренный
Твердый и пластичный	Высокий	Высокий	Высокий	Высокий

Из книги Billmeyer F., *Textbook of Polymer Science* (с разрешения John Wiley & Sons Inc.).



Площадь под деформационной кривой как мера пластичности

Способность термопластичного полимера адсорбировать энергию деформирования определяется пластичностью и прочностью материала, которые влияют на пластичность противоположным образом. Полная адсорбируемая энергия пропорциональна площади, ограниченной деформационной кривой, проведенной до определенной точки, и осью абсцисс.

Материал типа А — это высокоэластичный эластомер и его поведение подобно материалу В, который ведет себя как типичный металл. Поведение большинства пластиков описывается кривой Б, которая занимает промежуточное положение между кривыми А и В.

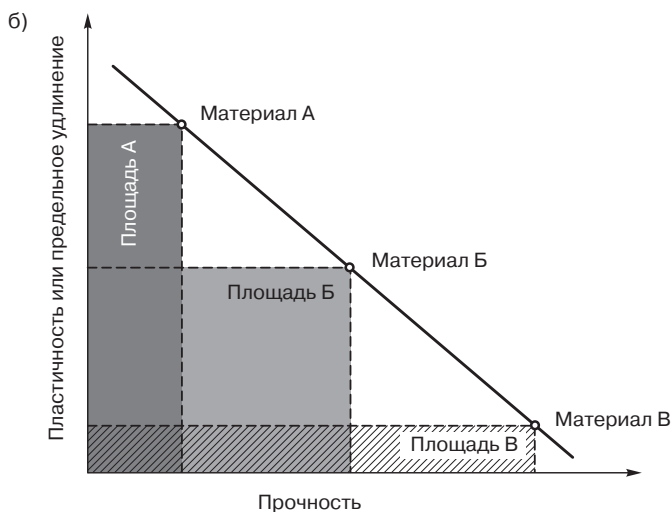


Рис. 2.4. а) Типы деформационных кривых (с разрешения издательства *Wiley Interscience*); б) соотношение между пластичностью и прочностью

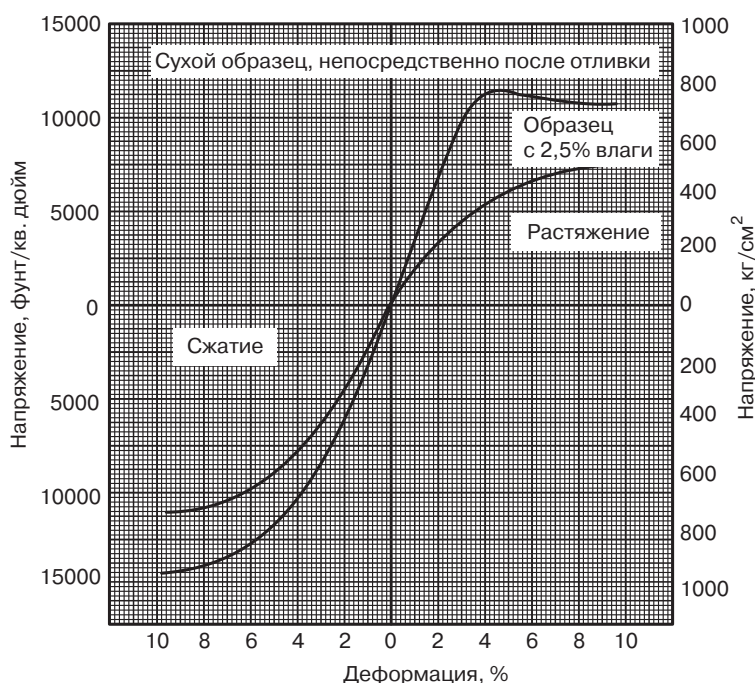
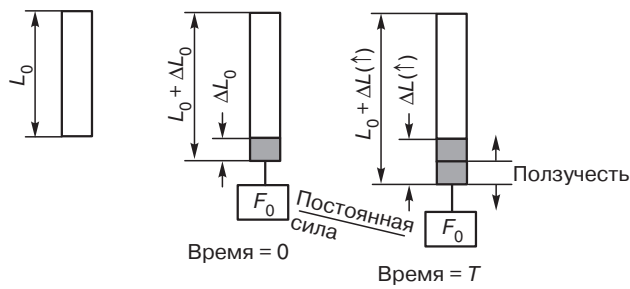


Рис. 2.5. Зависимость напряжения от деформации при растяжении и сжатии (данные любезно предоставлены компанией *Du Pont*)

Определение деформационной кривой относится к числу кратковременных испытаний. Это означает, что нагрузка на образец действует в течение сравнительно короткого периода времени, что ограничивает ценность получаемых результатов для оценки поведения реальных изделий из пластмасс. Испытания такого рода не способны учесть изменения жесткости и прочности материала во времени. Это ограничение может быть исключено на основании долговременных испытаний материала на ползучесть (крип) и релаксацию.

Релаксация состоит в том, что фиксируется некоторая деформация образца и измеряется изменение во времени усилия, которое необходимо приложить для того, чтобы сохранялась эта деформация. Испытания на ползучесть состоят в том, что к образцу прикладывается фиксированная нагрузка и измеряется развитие деформации во времени под действием этой нагрузки [8]. Явления ползучести и релаксации схематически изображены на рис. 2.6, а на рис. 2.7 показаны ползучесть и развитие холодного течения пластмассы.

При приложении нагрузки возникают упругие деформации, которые продолжают развиваться пока действует нагрузка. Существенная часть упругих деформаций создается не мгновенно, а возврат к первоначальным размерам или длине также растягивается во времени. Полагается, что если восстановление произошло не полностью, то это обусловлено возникновением необратимых деформаций.



РЕЛАКСАЦИЯ

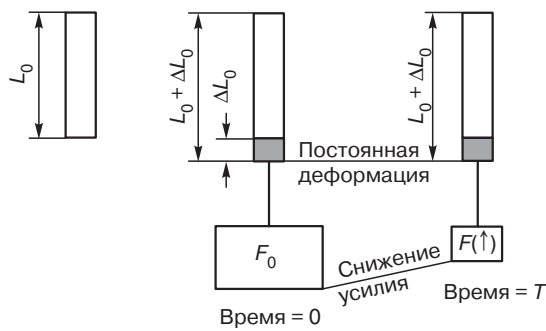


Рис. 2.6. Диаграмма, иллюстрирующая явления ползучести и релаксации (с разрешения Van Nostrand Reinhold Company)

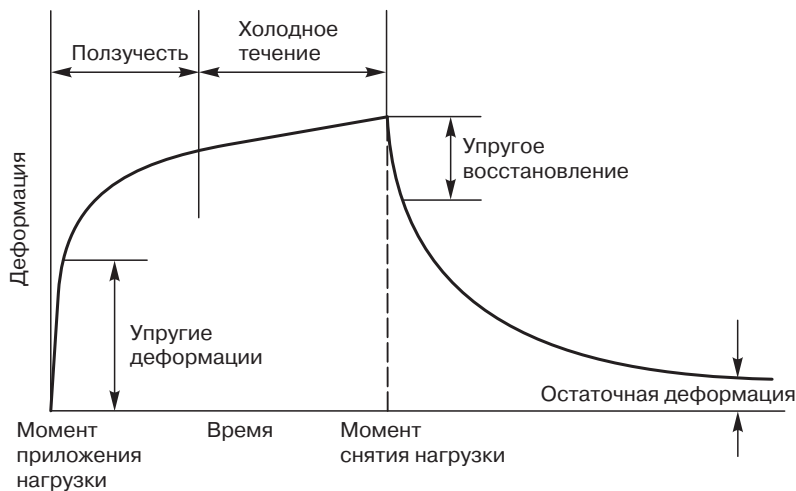


Рис. 2.7. Диаграмма, иллюстрирующая явления ползучести и холодного течения (с разрешения McGraw-Hill Company)

Величина остаточных деформаций зависит от приложенного напряжения, длительности его действия, а также от температуры [9]. Такой характер механического поведения материала также может быть представлен путем последовательного соединения моделей Максвелла и Фойхта [10, 11].

2.2. Испытания на одноосное растяжение (ASTM D638 и ISO 527-4)

Измерения деформаций при растяжении и модуля упругости относятся к числу наиболее важных характеристик механических свойств полимерных материалов, которые широко представлены в спецификации на полимеры. Испытания на растяжение, в широком смысле этого термина, представляют собой оценку способности материала противостоять действию приложенных нагрузок и возможность растягиваться до разрушения. Модуль упругости при растяжении характеризует жесткость материала. Эта величина может быть определена из диаграммы зависимости напряжения от деформации. Различные типы полимерных материалов часто сопоставляются именно по таким показателям их свойств, как предел прочности при растяжении, удлинение при разрыве и значение модуля упругости. Для многих пластмасс характерна также сильная зависимость их свойств от скорости деформирования и условий окружающей среды. Поэтому данные, получаемые рассматриваемым методом, не следует рассматривать как прямую оценку применимости материала, поскольку реальные условия эксплуатации изделия могут значительно отличаться от условий проведения испытаний.

Данные испытаний на одноосное растяжение более полезны как основа первичного отбора конкретного типа полимера из обширной группы различных материалов. Но эти данные имеют очень ограниченную ценность для конструирования изделий. Основная причина этого явления состоит в том, что при испытаниях обсуждаемого вида не принимается во внимание зависимость свойств материала от времени.

2.2.1. Аппаратура

Обычно испытания на растяжение проводят с помощью машин, в которых растяжение осуществляется при постоянной скорости движения зажима, в котором закреплен конец образца. Машина имеет стационарную часть, к которой крепится один из зажимов, и перемещающуюся часть, в которой установлен второй зажим. Использование самоустанавливающихся зажимов, в которых закрепляется образец, позволяет исключить проблему центровки. Постоянная скорости движения контролируется схемой привода машины. В некоторых машинах, предлагаемых на рынке, использована схема замкнутой обратной связи с сервоконтролируемым приводом. Это позволяет обеспечить высокую точность поддержания заданной скорости. Для измерения нагрузки используют устройство, позволяющее получать показания с ошибкой, не превышающей 1% или даже меньше от полной шкалы прибора. В последнее время используют цифровые индикаторы нагрузки, которые облегчают считывание показаний по сравнению с аналоговыми индикаторами.

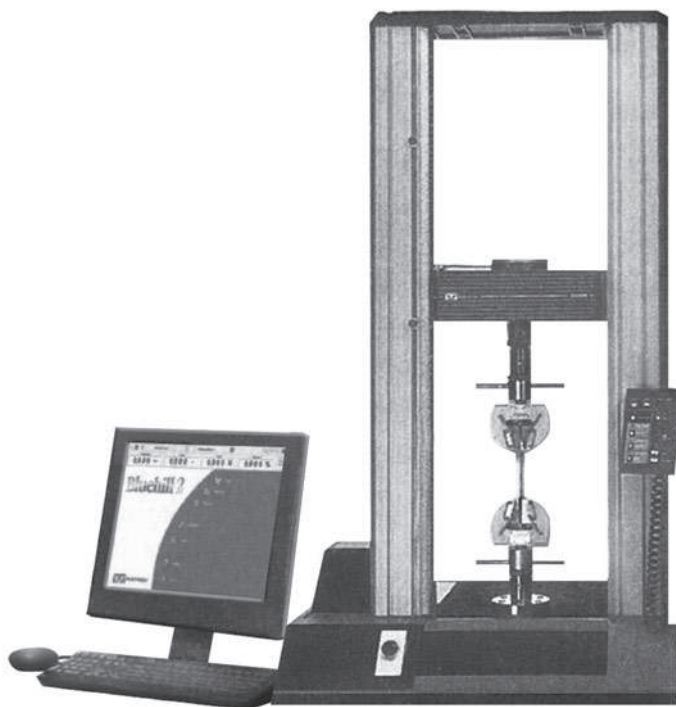


Рис. 2.8. Испытательная машина для растяжения образцов (с разрешения *Tinius Olsen Corporation*)

Для измерения деформаций применяют так называемые экстензиометры, которые отслеживают изменение расстояния между двумя выделенными точками на образце в пределах выбранной базы измерений, изменяющееся по мере растяжения.

На рис. 2.8 показан коммерческий образец испытательной машины. Прогресс в этой области состоит в использовании микропроцессоров, которые призваны устранить операции, выполняемые вручную и требующие много времени. Значения напряжения, удлинения, модуля упругости, энергии и статистические данные представляются автоматически на дисплее или распечатываются на бумаге в конце испытаний.

2.2.2. Образцы для испытания и их кондиционирование

Образцы для испытаний на растяжение могут приготавливаться различными способами. Наиболее часто их получают либо литьем под давлением, либо методом компрессионного литья. Образцы могут быть также изготовлены методом механической обработки из заготовок, которые представляют собой листы, пластины, блоки или изделия иной формы. Размеры образцов строго регламентируются требованиями стандартов. Они, в частности, описаны в сборнике стандартов *ASTM*. На рис. 2.9 показан образец тип I по стандарту *ASTM D638*. Такой образец наиболее часто используют для испытаний жестких и полужестких полимерных материалов.

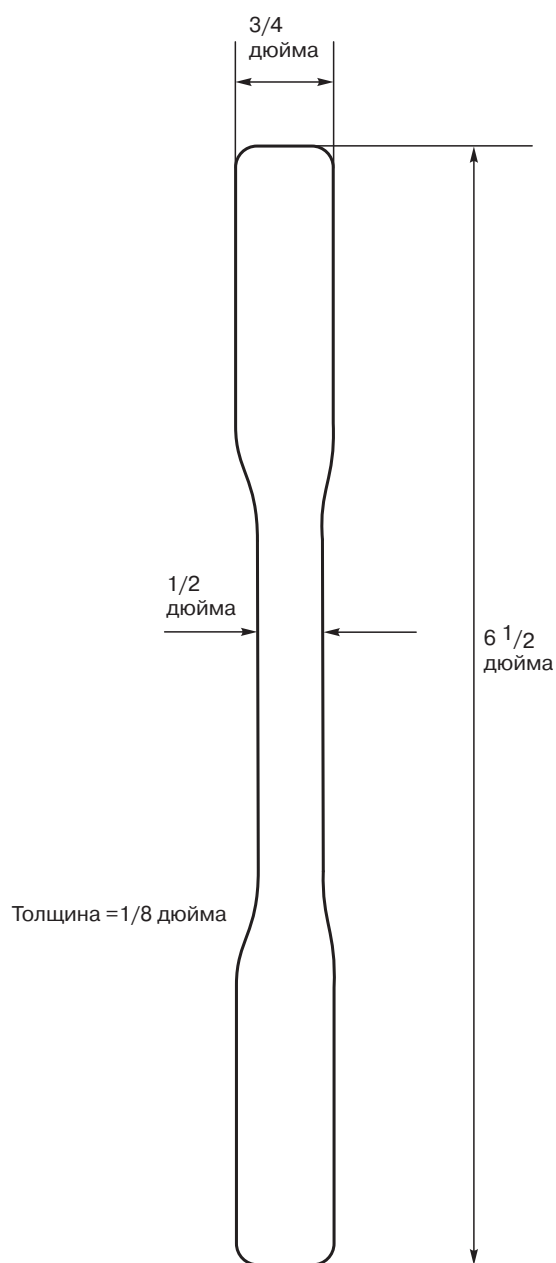


Рис. 2.9. Стандартный образец для испытаний на растяжение (тип I)

Образцы перед испытаниями кондиционируют, используя стандартизованные условия. Поскольку свойства некоторых пластмасс резко изменяются даже при небольших колебаниях температуры, рекомендуется проводить испытания в стандартной лабораторной атмосфере при температуре 23 ± 2 °C и относительной влажности окружающего воздуха $50 \pm 5\%$. Согласно рекомендациям *ASTM D618*, для выполнения испытаний необходимо следовать процедуре A (см. объяснения в главе 11).

2.2.3. Процедура испытаний

А. Предел прочности при растяжении

Скорость растяжения определяется либо по относительной скорости перемещения зажимов, либо по меткам на образце. Стандарт *ASTM D638* устанавливает пять различных основных скоростей. Как общее правило, наиболее часто испытания проводят при скорости 0,2 дюйма/мин. Если это возможно, то следует использовать ту скорость испытаний, которая указана в спецификации на материал. Если же скорость не указана, то следует выбирать скорость испытаний исходя из того, что разрыв образца в результате его растяжения должен наступить во временном интервале между 30 с и 5 мин.

Образец в испытательной машине располагается в вертикальном положении. Зажимы должны обеспечивать безусловное отсутствие проскальзывания образца. После того как выбрана подходящая скорость, машина запускается. По мере растяжения сопротивление деформированию возрастает, что фиксируется датчиком усилия. Усилия записываются как функции времени. В некоторых машинах предусмотрена фиксация максимального усилия (пика усилия), достигнутого в процессе испытания. Растяжение продолжается, пока не наступит разрушение образца. При этом фиксируется усилие в момент разрушения. Далее рассчитываются значения прочности, отвечающие пределу текучести и разрушению по формулам:

$$\text{Предел прочности} = \frac{\text{Усилие (в фунтах)}}{\text{Площадь поперечного сечения (в кв. дюймах)}};$$

$$\text{Предел текучести (psi)} = \frac{\text{Максимальное зарегистрированное усилие (в фунтах)}}{\text{Площадь поперечного сечения (в кв. дюймах)}};$$

$$\text{Предел прочности (psi)} = \frac{\text{Усилие в момент разрушения (в фунтах)}}{\text{Площадь поперечного сечения (в кв. дюймах)}}.$$

Б. Модуль упругости и разрывное удлинение

Модуль упругости и удлинение при разрыве находят из диаграммы зависимости напряжения от деформации. На рис. 2.10, а показан экстензиометр, с помощью которого измеряют деформацию. Это устройство представляет собой датчик перемещений, позволяющий существенно повысить точность измерения действительной деформации при растяжении.

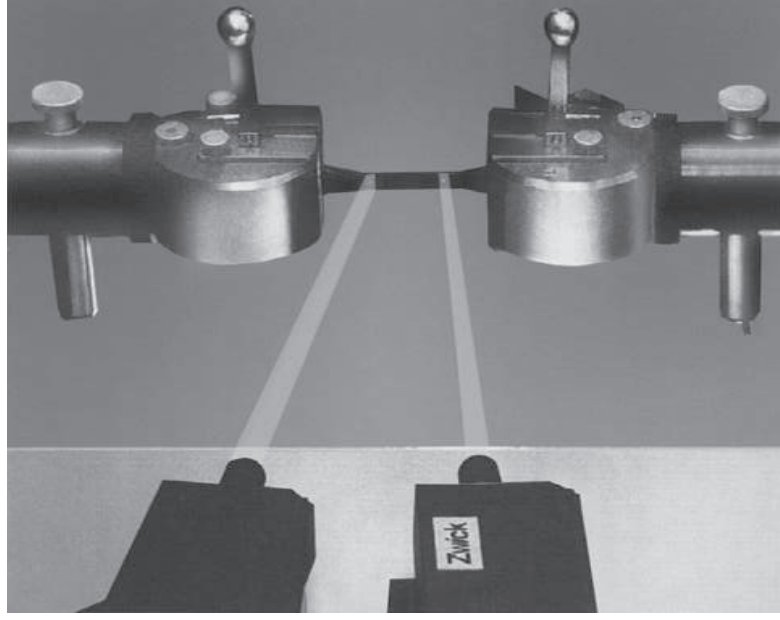
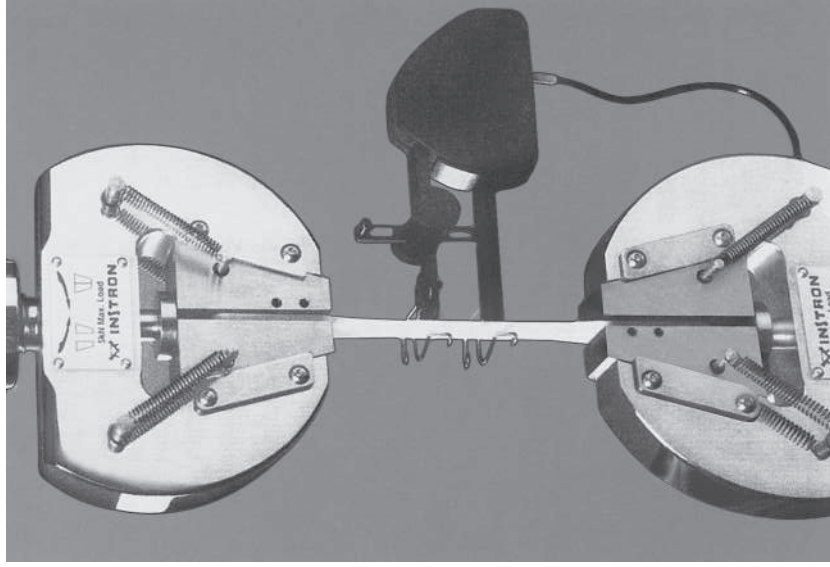


Рис. 2.10. Рисунки, иллюстрирующие датчик деформаций — экстензиометр (*Instron Corporation*) — устанавливаемый на образце (а) и бесконтактный оптический экстензиометр (*Zwick, USA*) (б)

Надежность получения значений деформаций с помощью традиционных экстензиометров ограничена тем, что необходимо обеспечить реальный физический контакт датчика с образцом. Эта проблема усугубляется, когда испытываются высокоэластичные материалы, или, напротив, жесткие и хрупкие полимеры, или же очень легкие образцы. Кроме того, с помощью контактных экстензиометров оказывается невозможным измерять большие деформации вплоть до точки разрыва, а также проводить измерения при повышенных температурах в ограниченной по объему камере.

В последнее время производители испытательного оборудования разработали бесконтактные измерительные системы, основанные на использовании оптики, видеоизображений и лазерных устройств, что позволило преодолеть проблемы, возникающие при использовании контактных экстензиометров. На рис. 2.10, б показан такой оптический экстензиометр.

Одновременно измеряемые временные зависимости напряжения и деформации наносятся на график. Далее используется следующая процедура обработки данных (основанная на анализе зависимости, показанной на рис. 2.11).

1. На оси x наносятся значения напряжения. Это делается путем деления измеренного усилия на площадь поперечного сечения образца.
2. На оси y наносятся значения относительной деформации. Это делается путем пересчета показания прибора в относительные единицы.
3. Аккуратно проводится прямая линия KL как касательная к начальной части деформационной кривой.

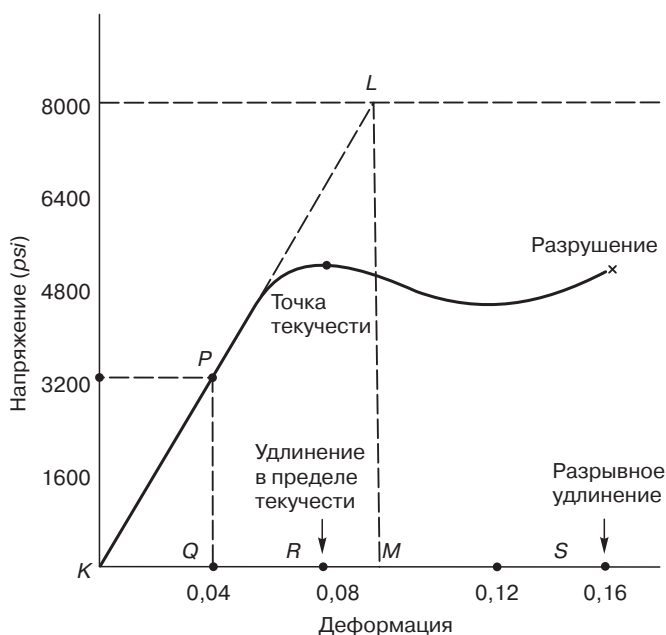


Рис. 2.11. Диаграмма, представляющая зависимость напряжения от деформации, на основании которой находят модуль упругости и разрывное удлинение

4. Выбираются две произвольные точки на прямой (например, точки P и L , показанные на рисунке).
5. Проводятся прямые линии PQ и LM , соединяющие точки P и L с осью x на рисунке.
6. Значение напряжения в точке L , равное 8000 фунт/дюйм², соответствует деформации 0,08 в точке M , а напряжение в точке P , равное 3200 фунт/дюйм², соответствует деформации 0,04 в точке Q .

Отсюда вычисляется модуль упругости:

$$\text{Модуль упругости} = \frac{\text{Разность напряжений}}{\text{Разность соответствующих деформаций}};$$

$$\text{Модуль упругости} = \frac{8000 - 3200}{0,08 - 0,04} = \frac{4800}{0,04} = 120,000 \text{ psi};$$

$$\text{Деформация} = \frac{\text{Изменение длины (удлинение)}}{\text{Начальная длина (база датчика)}};$$

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

или $\Delta l = \epsilon \cdot l$.

Удлинение в точке текучести равно $0,06 \cdot 2 = 0,12$ дюйма.

Относительное удлинение в точке текучести равно $0,12 \cdot 100 = 12\%$.

8. Удлинение в момент разрыва равно $0,16 \cdot 2 = 0,32$ дюйма.

Относительное удлинение при разрыве равно $0,32 \cdot 100 = 32\%$.

Для повышения точности не следует определять модуль упругости по одной единственной деформационной кривой. Необходимо провести несколько испытаний и вычислить усредненное значение модуля.

2.2.4. Факторы, влияющие на результаты испытаний

А. Подготовка образцов и их размеры

При испытаниях образцов на растяжение существенную роль играет молекулярная ориентация. Нагрузки, измеренные параллельно направлению ориентации, могут быть существенно выше, чем при испытаниях в перпендикулярном направлении. В отношении разрывного удлинения справедливо обратное утверждение. В связи с этим большое значение имеет процедура приготовления образцов. Так, например, предел прочности образцов, полученных литьем под давлением, оказывается, как правило, существенно бóльшим, чем для образцов, изготовленных методом компрессионного литья. Для образцов, полученных механической обработкой, прочность и разрывное удлинение оказываются заниженными из-за возможных небольших дефектов, появившихся в процессе формования.

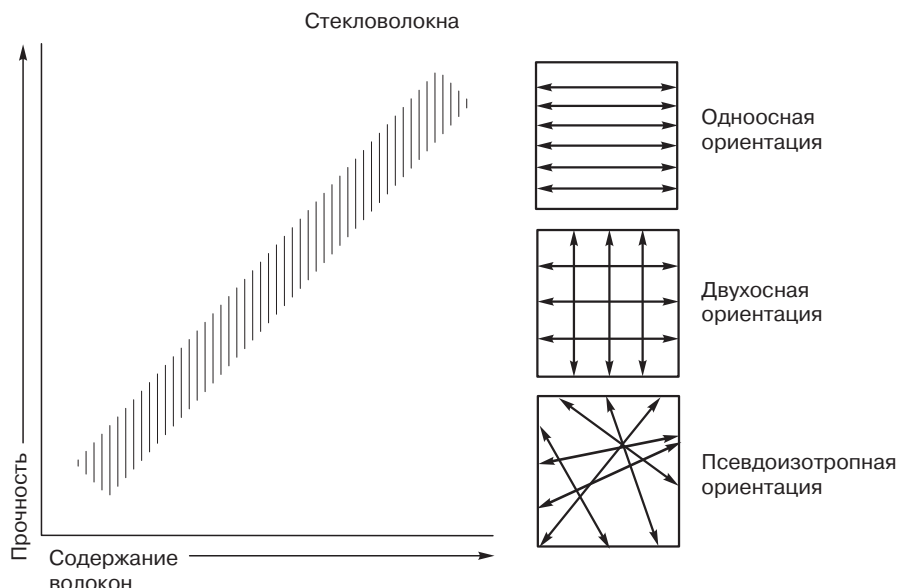


Рис. 2.12. Влияние ориентации стекловолокна (с разрешения Van Nostrand Reinhold Company)

Другим важным фактором, влияющим на результаты испытаний, является расположение мест впуска и размер литников при литье образцов. Это особенно справедливо для пластмасс, армированных стекловолокнами [12, 13]. Впускной литник располагающийся у верхушки образца, способствует ориентации волокон вдоль образца, что, в свою очередь, приводит к завышенным значениям прочности. Если впуск расположен сбоку, то волокна в образце ориентируются хаотически. Это явление иллюстрирует рис. 2.12.

Сопоставление свойств полимеров, измеренных при растяжении, возможно только при эквивалентных условиях изготовления образцов и одинаковых размерах.

Б. Скорость растяжения

По мере увеличения скорости растяжения прочность и модуль упругости увеличиваются. Однако разрывное удлинение обратно пропорционально скорости растяжения. Влияние скорости растяжения на значения модуля показаны на рис. 2.13.

В. Температура

Как говорилось выше, температура оказывает очень сильное влияние на свойства некоторых пластмасс, которые изменяются очень сильно при минимальных колебаниях температуры. При увеличении температуры предел прочности и модуль упругости снижаются, а разрывное удлинение возрастает. На рис. 2.14 показан пример влияния температуры на прочность материала, а на рис. 2.15 представлен внешний вид коммерчески доступной камеры, с помощью которой можно исследовать влияние температуры на свойства полимеров.

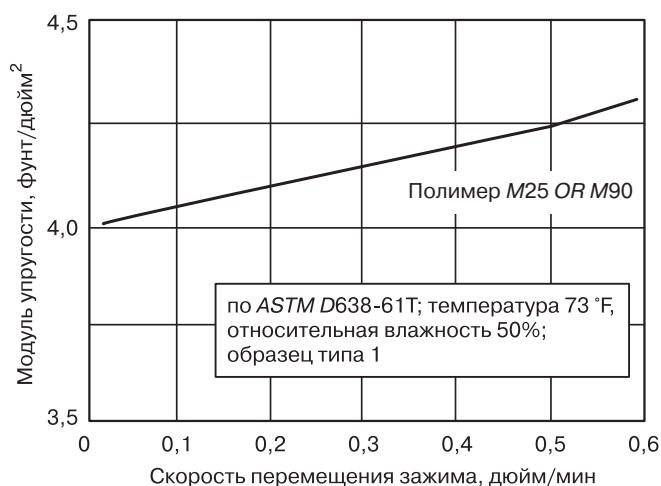


Рис. 2.13. Влияние скорости деформации на значения модуля (с разрешения *Ticona*)

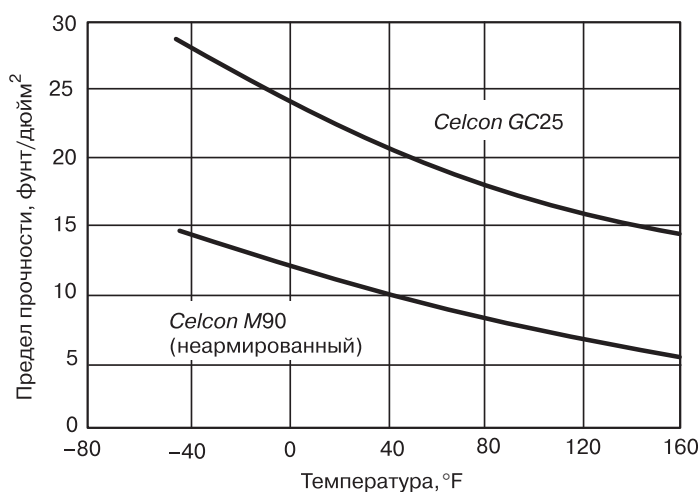


Рис. 2.14. Влияние температуры на прочность полимеров (с разрешения *Ticona*)

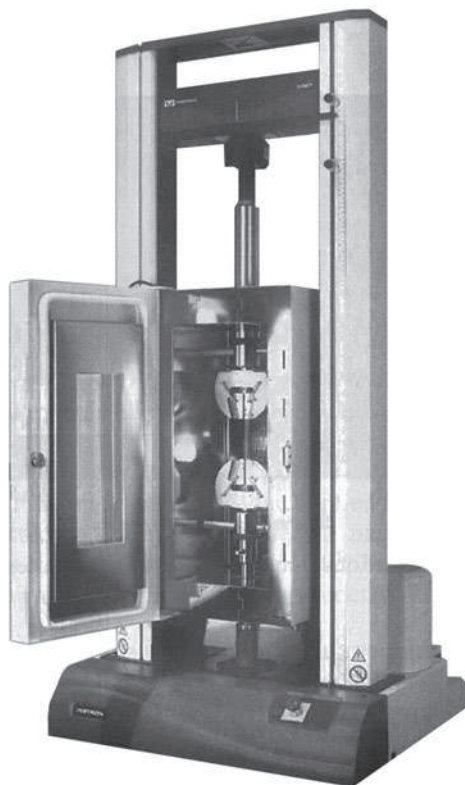


Рис. 2.15. Климатическая камера для испытаний пластмасс на растяжение при различных температурах (с разрешения *Instron Corporation*)

2.3. Испытания на изгиб (ASTM D790 и ISO 178)

Результаты испытаний пластмасс на изгиб представляют интерес как для конструктора, так и для производителя полимеров. Прочность на изгиб характеризует способность материала противостоять действию изгибающих сил, приложенных перпендикулярно оси образца.

При приложении изгибающей нагрузки в образце возникает сложная комбинация растягивающих и сжимающих напряжений (рис. 2.16).

Характеристикой свойств материала, измеряемых при изгибе, служат значения максимального напряжения и деформации на наружной поверхности бруса. Многие полимеры не разрушаются при изгибе даже при очень больших прогибах бруса. Это делает невозможной оценку прочности материала по моменту разрушения образца. В таких случаях в качестве характеристик прочностных свойств обычно используют величину предела текучести, определяемого как напряжение в наружных слоях образца, отвечающее деформации образца равной 5%. Если полимер легко разрушается

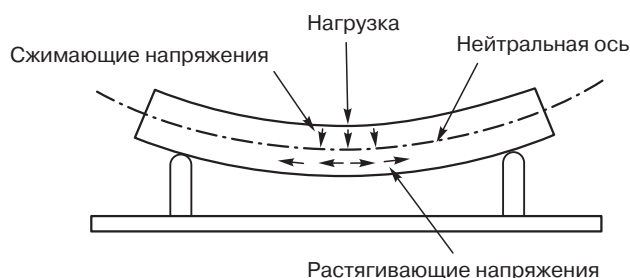


Рис. 2.16. Напряжения, возникающие в бруске под действием изгибающей нагрузки (с разрешения McGraw-Hill Company)

при приложении изгибающей нагрузки, то испытания продолжают до тех пор, пока не начнет разрушаться наружная поверхность образца.

Испытания на изгиб имеют ряд преимуществ перед испытаниями на растяжение [14]. Если изделия представляют собой нечто подобное брускам и они работают в условиях действия изгибающих нагрузок, данные таких испытаний гораздо точнее отражают свойства материала как для проектирования изделий, так и для спецификации материала по сравнению с результатами испытания на растяжение. Значения прочности, получаемые при растяжении, могут значительно расходиться с прочностью, рассчитанной для наружных слоев изгибающегося изделия. Образцы для испытания на изгиб сравнительно просто изготовить так, чтобы остаточные напряжения отсутствовали. Также довольно сложно достичь соосности образца и приложенной силы при испытаниях на растяжение. Кроме того, при установке образца в зажимах вблизи них возникает концентрация напряжений. И наконец, при испытаниях на изгиб даже при небольших деформациях смещения оказываются достаточно большими, чтобы их можно было измерить весьма точно.

Существуют два основных метода испытания пластмасс на изгиб. Метод 1 представляет собой схему трехточечного нагружения, согласно которой образец устанавливается на двух опорах. Он имеет форму бруска прямоугольного поперечного сечения. Нагрузка прикладывается строго посередине между опорами. Максимальная деформация создается в волокне непосредственно под наконечником, через который нагрузка передается на образец. Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.17. Этот метод особенно удобен для качественного контроля и получения характеристик, которые входят в спецификацию на материал.

Метод 2 основан на схеме четырехточечного изгиба (рис. 2.18). При такой схеме нагружения усилие прикладывается в двух точках, а расстояние между точками нагружения составляет одну треть от расстояния между опорами. При этом образец по-прежнему устанавливается на двух опорах, но нагрузка создается в двух точках, расположенных на равном расстоянии от опор. Метод 2 особенно удобен для испытаний материалов, которые не разрушаются при максимальном напряжении, создаваемом при испытаниях по схеме трехточечного нагружения. В рассматриваемом случае максимальные аксиальные напряжения создаются в области между точками приложения нагрузки.

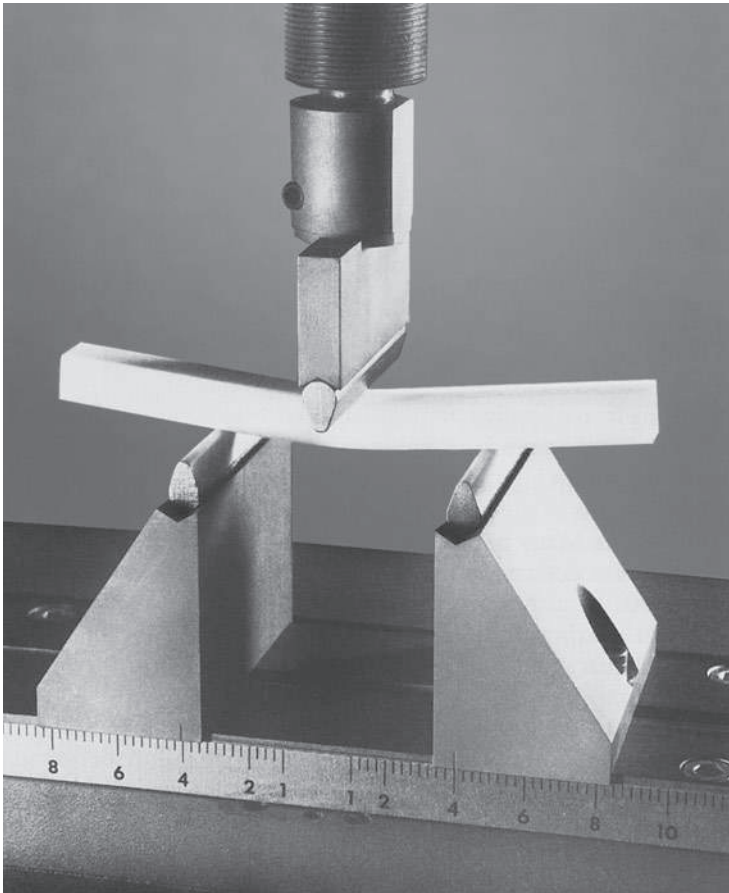


Рис. 2.17. Установка для испытаний на изгиб по схеме трехосного нагружения (с разрешения *DuPont Company*)

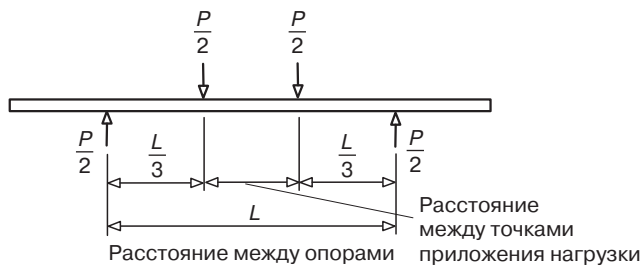


Рис. 2.18. Схема образца и условий нагружения при четырехточечном изгибе — метод 2 (с разрешения *ASTM*)

Для каждого из этих методов может использовать одна из двух процедур испытаний. Процедура *А* предлагается для материалов, которые разрушаются при сравнительно низких деформациях. Процедура *В* предназначена для материалов, которые могут подвергаться большим деформациям без разрушения. Основное различие методик, предусмотренных этими процедурами, состоит в выборе скорости деформации. Для процедуры *А* она составляет 0,01 дюйм/(дюйм·мин), а для процедуры *В* 0,10 дюйм/(дюйм·мин).

2.3.1. Аппаратура

Очень часто для испытаний на изгиб применяют то же самое оборудование, что и для испытаний на одноосное растяжение. Для этого используют верхнее или нижнее положение подвижного зажима. Датчик усилия имеет двойное назначение, поскольку он позволяет измерить силу, действующую как при растяжении, так и при сжатии. Пример такой универсальной испытательной машины показан на рис. 2.19. С помощью такой машины можно проводить измерения во всем диапазоне скоростей

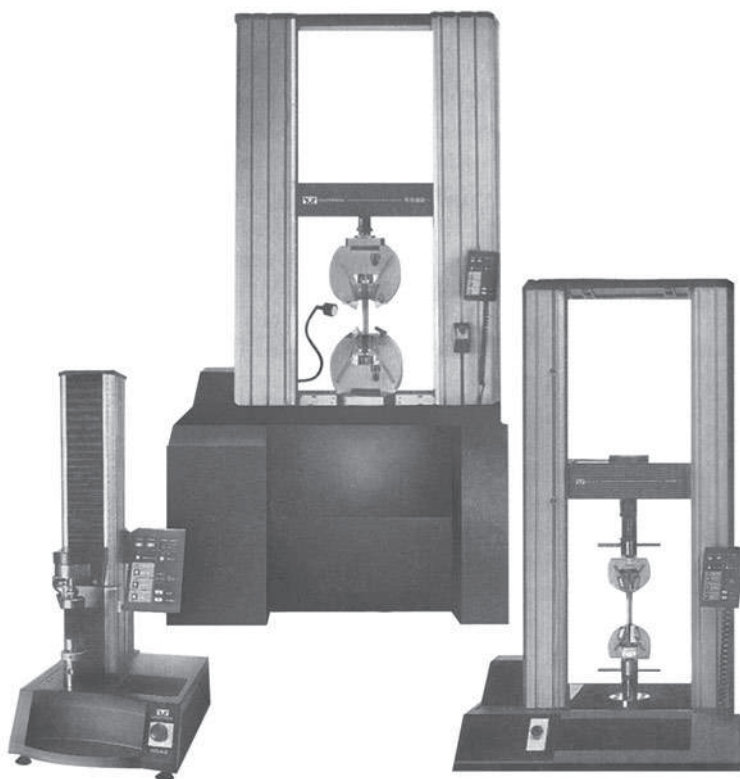


Рис. 2.19. Универсальная испытательная машина для измерений свойств образцов при растяжении и сжатии (с разрешения *Instron Corporation*)

движения перемещающегося зажима, и при этом ошибка измерения не будет превышать 1% от верхней шкалы прибора.

Головка, через которую нагрузка передается на образец, а также опоры должны иметь форму цилиндра. Радиус кривизны головки и опор должен равняться по крайней мере 1/8 дюйма, что позволит избежать нежелательного внедрения этих элементов измерительного устройства в образец, равно как и разрушения из-за недопустимой концентрации напряжений непосредственно в области нагрузочной головки. Для измерения прогиба образца используют датчик деформаций, называемый дефлектометром или компрессиометром.

2.3.2. Образцы для испытания и их кондиционирование

Образцы, используемые для испытаний на изгиб, представляют собой бруски с прямоугольным поперечным сечением. Их изготавливают, вырезая из листов или пластин, а также формуют литьем под давлением. Обычно на практике образцы изготавливают литьем в форму требуемых размеров. Образцы кондиционируют согласно требованиям процедуры А стандарта *ASTM D618*, как это подробно описано в главе 11 настоящей книги.

Наиболее часто используют образцы с размерами 0,125×0,5×4 дюйма.

2.3.3. Методика испытаний и порядок расчетов

Испытания начинаются с задания требуемой скорости и начала движения подвижного зажима. Прогиб измеряется либо с помощью датчика, установлено под образцом посередине между опорами, либо по движению зажима испытательной машины. Далее строится зависимость усилия от прогиба, если в итоге требуется определить модуль упругости при изгибе.

Максимальное напряжение рассчитывается, исходя из нагрузки и размеров образца, с помощью следующей формулы:

По методу 1:

$$S = \frac{3PL}{2bd^2},$$

где S — напряжение (в фунт/дюйм²); P — усилие (в фунтах); L — расстояние между опорами (в дюймах); b — ширина образца (в дюймах); d — толщина образца (в дюймах).

Предел прочности при изгибе соответствует максимальному напряжению в наружных волокнах в момент разрушения образца. Этот параметр рассчитывается по максимальному значению усилия в момент разрушения с использованием записанной выше формулы.

Для материалов, которые не разрушаются в испытаниях такого рода до деформаций, равных 5%, предел прочности рассчитывается по той же самой формуле, а за предельную нагрузку принимается величина, которая перестает увеличиваться при дальнейшем возрастании прогиба.

Максимальная деформация наружных волокон также достигается в центральной части образца. Она рассчитывается по следующей формуле:

$$r = \frac{6Dd}{L^2},$$

где r — деформация (в относительных единицах); D — прогиб (в дюймах); L — расстояние между опорами (в дюймах); d — толщина образца (в дюймах).

При использовании метода 2 расчетные уравнения для определения максимального напряжения и деформации несколько отличаются от приведенных выше.

2.3.4. Модуль упругости (модуль упругости при изгибе)

Модуль упругости при изгибе — это мера жесткости материала в начальной стадии деформационного процесса. Во многих случаях значения модуля упругости при изгибе совпадают с модулем упругости, измеренным при одноосном растяжении.

Модуль упругости при изгибе рассчитывается по углу наклона прямой линии, представляющей собой зависимость напряжения от деформации в области малых деформаций. Он рассчитывается как отношение изменения напряжения к соответствующему изменению деформации. Процедура определения модуля упругости при изгибе совершенно такая же, как и описанная выше для определения модуля упругости при растяжении.

2.3.5. Факторы, влияющие на результаты испытаний

А. Подготовка образцов

На результаты испытания оказывает заметное влияние молекулярная ориентация. Так, например, если имеется значительная степень молекулярной ориентации в направлении, перпендикулярном приложенной нагрузке, то получаемые значения механических параметров оказываются выше, чем для образцов с ориентацией, параллельной приложенной нагрузке. Прочностные характеристики образцов, полученных литьем под давлением, как правило, оказываются выше, чем образцов, сформованных методом компрессионного литья.

Б. Температура

Предел прочности и значения модуля, измеренные при изгибе, обратно пропорциональны температуре. При повышенных температурах получаемые значения этих параметров оказываются более низкими. Этот эффект иллюстрирует рис. 2.20.

В. Условия испытаний

На получаемые результаты может влиять скорость деформации, которая зависит как от заданной скорости движения в испытательной машине, так и от размеров образца и расстояния между опорами. При одном и том же расстоянии между опорами прочность при изгибе увеличивается при возрастании толщины образца. Модуль упругости увеличивается с возрастанием скорости деформирования [15].

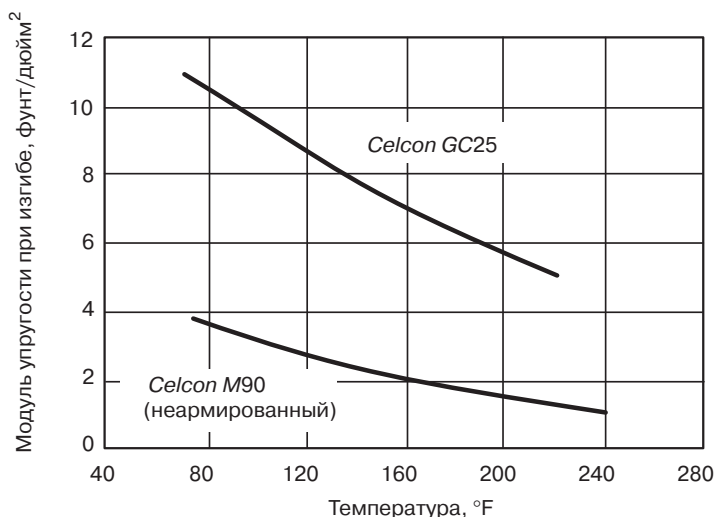


Рис. 2.20. Влияние температуры на модуль упругости при изгибе (с разрешения *Ticona*)

2.4. Испытания на сжатие (ASTM D695 и ИСО 75-1 и 75-2)

Свойства материала, исследуемого в условиях одноосного сжатия, отражают его поведение при сравнительно медленном и равномерном нагружении. Хотя изделия из полимеров часто используют в условиях сжатия, все же характеристики, получаемые в испытаниях такого рода, имеют очень ограниченное значение для практических расчетов. В реальных условиях сжатие крайне редко создается мгновенно. Поэтому стандартные испытания, в которых никак не отражается фактор времени, не дает значений прочности и жесткости, которые могли бы использоваться для конкретных расчетов. При реальных расчетах необходимо использовать характеристики, отражающие сопротивление материала ударным нагрузкам, ползучесть и долговременную прочность. Данные, получаемые при испытаниях на сжатия, имеют значение для исследовательских работ, качественного контроля, а также для включения в спецификацию на материал; в последнем случае они могут служить основанием для принятия или отклонения материала потребителем. При испытаниях на сжатие получают такие параметры, как модуль упругости при сжатии, предел текучести, деформации за пределом текучести, прочность при сжатии, предельные деформации при сжатии и устойчивость при сжатии. Однако на практике нашли применение два параметра — предел прочности и модуль упругости при сжатии.

В случае полимеров, которые при сжатии реально распадаются на кусочки, использование понятия о пределе прочности имеет определенный смысл. В противоположном случае, если распад образца на части не происходит, понятие о пределе прочности достаточно условно: оно зависит от принятой степени искажения образца, которая принимается как показатель разрушения. В таких случаях поставщик материала

принимает за его прочность сжимающее напряжение, при котором деформация составляет 1 или 10% от первоначальной высоты образца. Такие полимеры могут продолжать деформироваться при дальнейшем сжатии, превращаясь в плоский диск. При этом сжимающее напряжение продолжает возрастать, и никаких видимых признаков разрушения не наблюдается. В таких случаях понятие о пределе прочности при сжатии утрачивает всякий смысл.

2.4.1. Аппаратура

Универсальная испытательная машина, та же, что используется для исследований материала при растяжении и изгибе, пригодна и для испытаний на сжатие. Требования к аппаратуре были подробно описаны в разделе, посвященном испытаниям на растяжение. Для того чтобы измерять расстояние между двумя фиксированными точками на образце в процессе всего эксперимента, применяют дефлактометры или компрессиометры. На рис. 2.21 показан типичный прибор для испытаний на сжатие.

2.4.2. Образцы для испытания и их кондиционирование

Для выполнения испытаний на сжатие рекомендуется использовать образцы либо в виде прямоугольных блоков размером 0,5×0,5×1 дюйм, либо цилиндры диаметром 0,5 дюйма и высотой 1 дюйм. Образцы могут готовиться либо машинной

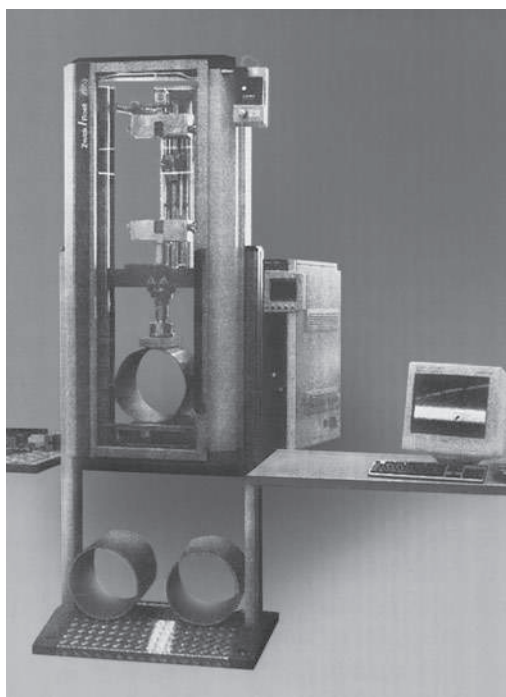


Рис. 2.21. Типичная установка для испытаний на сжатие (с разрешения Zwick, USA)

обработкой, либо литьем под давлением. Условия кондиционирования образцов должны соответствовать требованиям процедуры А стандарта *ASTM D618* (см. главу 11).

2.4.3. Процедура испытаний

Образец помещают между двумя поверхностями сжимающего устройства, причем необходимо убедиться, что края образца параллельны поверхностям, которые осуществляют сжатие. Испытания состоят в том, что подвижная поверхность опускается вниз с заданной скоростью. Фиксируется максимальное усилие, которое развивается в процессе испытаний. Зависимость напряжения от деформации получается путем измерения нагрузки и деформации сжатия, либо с помощью автоматической системы записи результатов измерений.

Предел прочности при сжатии рассчитывается как отношение максимального усилия сжатия, которое выдерживает образец, к площади первоначального сечения образца. Результаты испытаний выражаются в фунт/дюйм². Модуль упругости при сжатии вычисляется точно так же, как при растяжении и изгибе — по наклону начального участка зависимости напряжения от деформации, и рассчитывается как отношение разности напряжений к разности деформаций, соответствующих этим напряжениям. Подробно процедура расчета описана в разделе 2.2 применительно к испытаниям на растяжение.

2.5. Измерения ползучести

В сегодняшнем применении пластмасс предъявляются высокие требования к их техническим характеристикам и надежности. Многие детали, которые раньше традиционно изготавливались из металлов, в настоящее время делают из пластмасс. К инженерам-проектировщикам предъявляются требования наиболее эффективного использования материала. Все большее число специалистов сегодня осознают понимание важности поведения полимерных материалов в условиях долговременного нагружения и изменяющейся температуры. Свойства полимера, отражающие такие условия применения, получают, проводя испытания на ползучесть.

Когда к полимерному образцу прикладывается постоянная нагрузка, он вначале деформируется быстро в соответствии с характеристиками, измеренными при определении его деформационной диаграммы. Но затем деформации продолжают развиваться неопределенно долго до тех пор, пока не наступит разрыв образца или пластические деформации не приведут к его разрушению [16]. Такое поведение полимерных материалов под нагрузкой называют ползучестью (или крипом). Все полимеры в большей или меньшей степени склонны к ползучести. Степень ползучести зависит от многих факторов, таких как природа полимера, уровень нагрузки, температуры и длительность нагружения.

Как было объяснено выше в настоящей главе, кратковременные испытания полимеров дают очень мало для проектирования реальных изделий, поскольку в

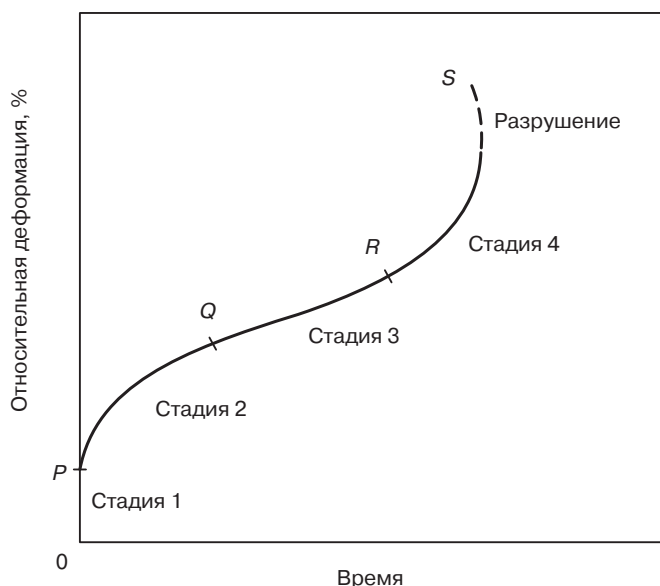


Рис. 2.22. Обобщенная кривая ползучести

действительности изделия подвергаются длительному воздействию нагрузки. Поведение различных полимеров при ползучести весьма различно. Однако при правильном выборе подходящих нагрузок и температуры можно обнаружить характерные особенности ползучести, общие для всех пластмасс. Такая обобщенная характерная кривая ползучести показана на рис. 2.22.

Полная кривая ползучести может быть разделена на четыре характерные участка. На первой стадии (OP) происходят мгновенные упругие деформации. За первой стадией следует вторая — участок PQ , на которой деформации развиваются довольно быстро, но их скорость убывает. Эту стадию убывающей во времени скорости иногда называют ползучестью или первичной ползучестью. Прямолинейный участок 3 между точками QR характеризуется постоянной скоростью деформации. Эту область называют «холодным течением». Для заключительной стадии RS характерно возрастание скорости ползучести, и она завершается разрушением образца.

Если внешняя нагрузка устраняется, не доходя до момента разрушения, то происходит мгновенное восстановление, отвечающее первому участку кривой на рис. 2.22, а затем наблюдается период медленного восстановления. Как общее правило, полного восстановления первоначальных размеров образца не происходит, так что сохраняется некоторая остаточная деформация, величина которой зависит от длительности нагружения, величины приложенного усилия и температуры [20].

Ползучесть под действием постоянной приложенной нагрузки может наблюдаться при различных видах напряженного состояния — при растяжении, сжатии, изгибе; во всех этих случаях измеряется временная зависимость деформации. При обсуждении получаемых в таких испытаниях значений деформации следует указывать вид напряженного состояния — растяжение, сжатие или изгиб.

2.5.1. Ползучесть при растяжении

Ползучесть при сдвиге изучают в условиях приложения растягивающего напряжения к образцу и измерения развития деформации во времени. Эксперименты такого рода могут осуществляться несколькими способами. Простейший путь — на образец наносятся отметки и измеряется расстояние между ними через определенные промежутки времени. Относительная деформация в процентах определяется как отношение текущего расстояния между метками к первоначальному, умноженное на 100. Далее относительная деформация (выраженная в процентах) строится на графике как функция времени. Один из примеров такой зависимости показан на рис. 2.23.

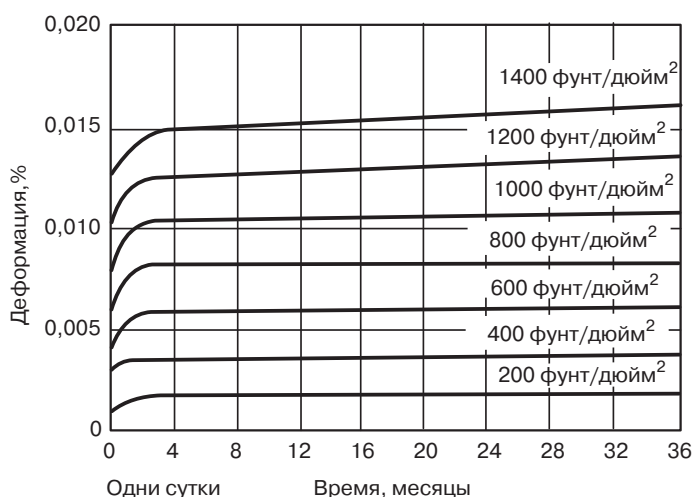


Рис. 2.23. Кривые ползучести при различных нагрузках (с разрешения *Ticona*)

Значения растягивающих напряжений выбираются через определенные интервалы до тех пор, пока они не приводят к разрушению образца.

Для более точных измерений необходимо использовать датчики деформации, с помощью которых удобно измерять малые изменения деформации, которые затем представляются в виде, удобном для нанесения на график.

На рис. 2.24 представлен пример типичной установки для измерения ползучести. Испытания проводят при различных нагрузках и температурах для того, чтобы изучить влияние этих факторов на ползучесть.

2.5.2. Ползучесть при изгибе

Испытания на ползучесть при изгибе также проводят, используя постоянную нагрузку, прикладываемую к стандартному образцу и измеряя зависимость прогиба от времени. Типичный пример установки для измерения ползучести при изгибе показан на рис. 2.25.

Измерения прогиба в центре образца осуществляют с помощью цифрового индикатора. Для этой цели вместо цифрового индикатора можно использовать

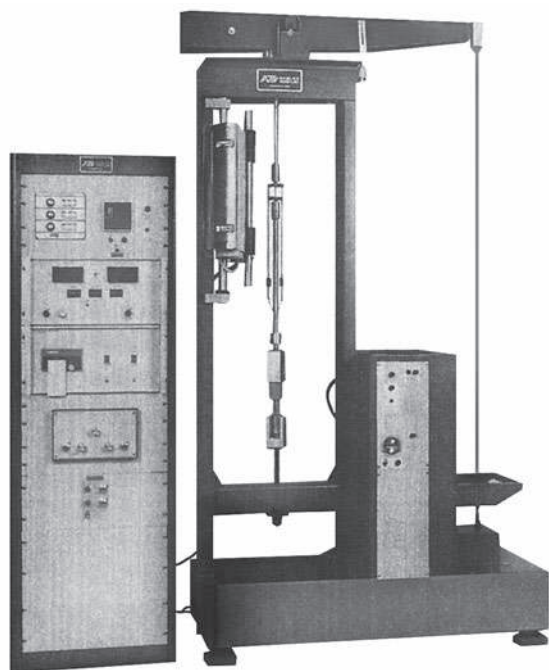


Рис. 2.24. Типичный пример установки для измерений ползучести (с разрешения *Applied Test Systems Inc.*)

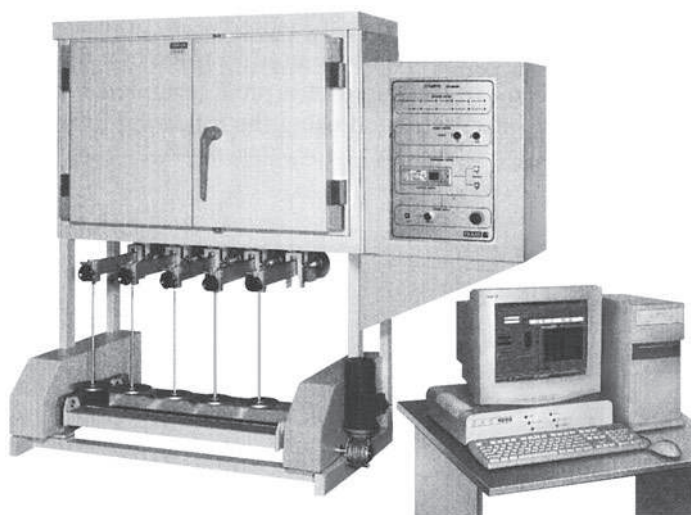


Рис. 2.25. Установка для испытаний на ползучесть при изгибе (с разрешения *CEAST USA Inc.*)

электрический датчик сопротивления. Значения прогиба измеряют через определенные промежутки времени. Значения деформаций при испытаниях на изгиб рассчитывают по формуле

$$r = \frac{6Dd}{L^2} \cdot 100,$$

где r — максимальная величина прогиба (в процентах); D — максимальное смещение в средней плоскости образца (в дюймах); d — высота образца (в дюймах); L — расстояние между опорами (в дюймах).

Величина деформации при ползучести представляется в зависимости от времени, что дает кривую ползучести (рис. 2.26).

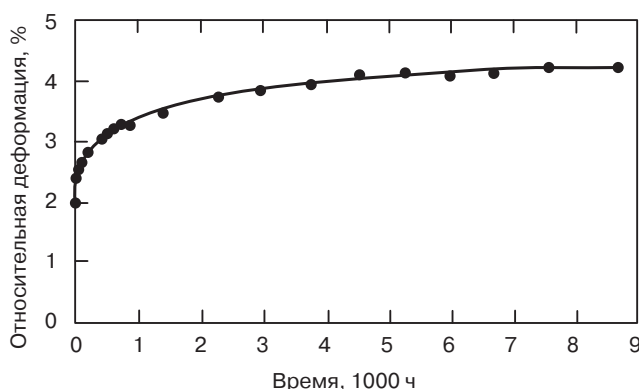


Рис. 2.26. Зависимость относительных деформаций при ползучести от времени (воспроизведено с разрешения *McGraw-Hill Company*)

Испытания такого рода проводят при различных уровнях нагрузки и температуры, что дает серию подобных кривых. Если есть необходимость, то по следующей формуле также можно вычислить максимальное напряжение для каждого образца (в фунт/дюйм²):

$$S = \frac{3PL}{2bd^2},$$

где S — напряжение (в фунт/дюйм²); P — усилие (в фунтах); L — расстояние между опорами (в дюймах); b — ширина образца; d — высота образца.

2.5.5. Интерпретация и применения данных по ползучести

Одним из существенных недостатков ранних представлений кривых ползучести (см. рис. 2.26) была невозможность «одноточечной» оценки свойств материала, таких как предел прочности или модуль упругости, особенно если исходные данные были получены при различных уровнях напряжения и температурах. Более того, данные по ползучести, представляемые в виде временной зависимости деформаций, непригодны как основа для конструирования или сравнения различных материалов. Очевидно, что

кривые ползучести было необходимо представлять в более осмысленной и удобной форме, которая бы позволяла непосредственно их использовать. Кривые ползучести легко пересчитываются в значения модуля ползучести («эффективного» модуля) просто путем деления приложенного напряжения на деформацию, изменяющуюся во времени:

$$\text{Эффективный модуль ползучести} = \frac{\text{Начальное приложенное напряжение}}{\text{Деформации ползучести}}.$$

На рис. 2.27 показаны те же самые данные, которые представлены на рис. 2.26, но построенные в форме зависимости модуля от времени в линейных координатах.

Для дальнейшего упрощения использования кривых ползучести те же данные на рис. 2.28 показаны в логарифмических координатах. Такое представление, позволившее получить линейную зависимость, особенно удобно для экстраполяции

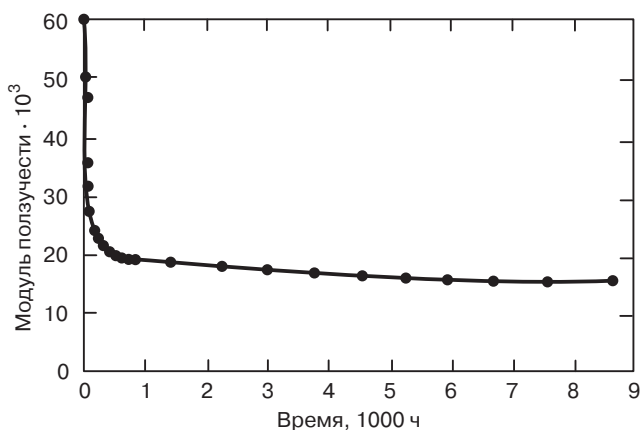


Рис. 2.27. Временная зависимость эффективного модуля ползучести в линейных координатах (воспроизведено с разрешения McGraw-Hill Company)

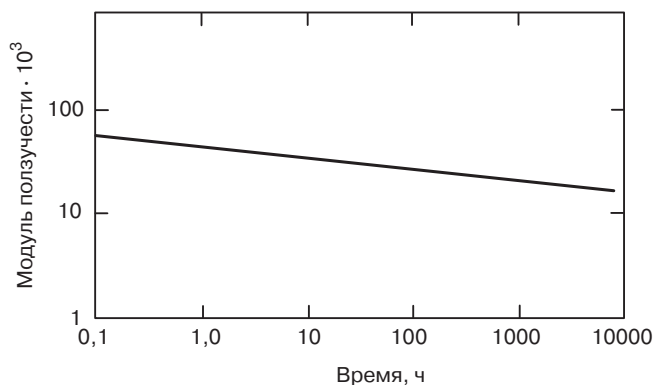


Рис. 2.28. Данные по ползучести, представленные в логарифмических координатах (воспроизведено с разрешения McGraw-Hill Company)

оценки свойств материала, пересчитанных на реальный срок эксплуатации изделия. Известны различные методы экстраполяции, используемые для расширения области ползучести [21].

2.5.4. Изохронные зависимости напряжение–деформация

Очень часто при проектировании изделий из пластмасс возникает необходимость сравнения различных материалов. Исходные экспериментальные данные по ползучести, такие как зависимости деформации или эффективного модуля от времени, не вполне удобны для сопоставления различных материалов. Такое сопоставление становится особенно затруднительным, если при испытаниях используются данные, полученные при различных уровнях напряжения.

Большинство конструкторов предпочитают использовать для этой цели изохронные (т. е. отвечающие одинаковым моментам времени) зависимости деформации от напряжения. Зависимости напряжения от соответствующей деформации представляются для выбранных моментов времени, которые отвечают условиям применения изделия.

Предположим, что перед проектировщиком стоит задача сконструировать полку, которая должна выдерживать постоянно действующую нагрузку в течение 1000 ч. Если налагается требование, чтобы в течение 1000 ч деформация, созданная постоянно действующей нагрузкой, не превышала 2% — каково допустимое напряжение? Для того чтобы ответить на поставленный вопрос, конструктор должен прежде всего на кривых ползучести выделить координату, отвечающую выбранному временному базису (рис. 2.29). Затем находят деформации, соответствующие этому базису, при

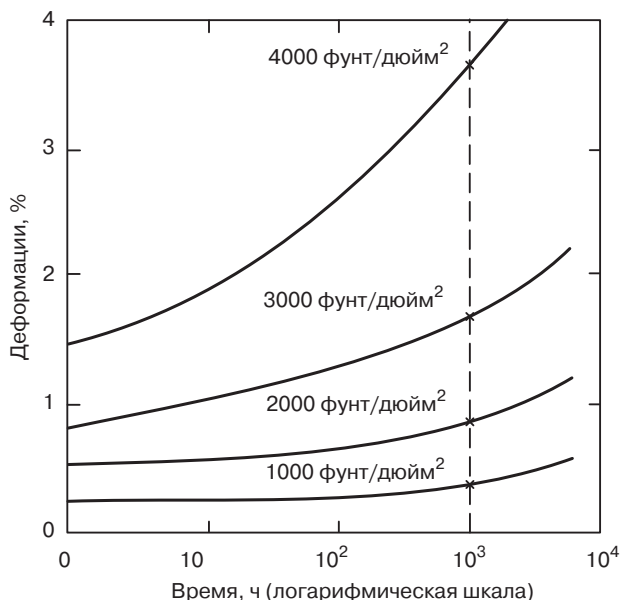


Рис. 2.29. Кривые ползучести и выбор временной базы в 1000 ч

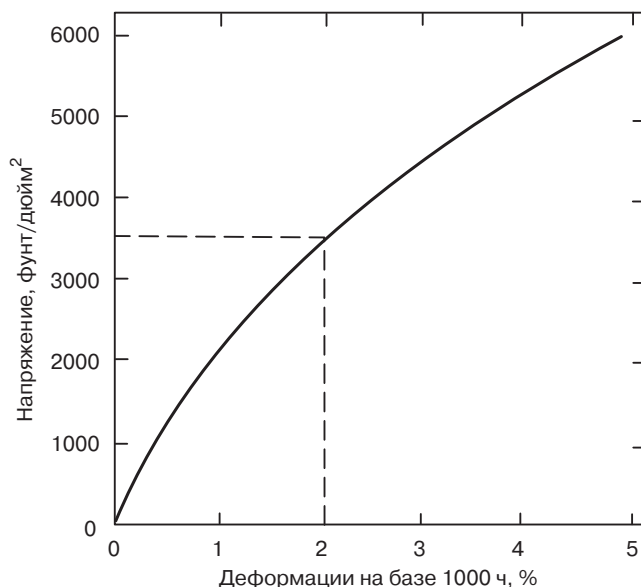


Рис. 2.30. Изохронная зависимость напряжения от деформации

различных напряжениях. Эти данные позволят конструктору построить график зависимости деформации от напряжения, отвечающий выбранному временному интервалу (рис. 2.30). Максимальное допустимое напряжение находится просто по пересечению координатной линии, отвечающей допустимому уровню деформации в 2%, с построенной кривой (рис. 2.30). Как видно, это напряжение составляет 3500 фунт/дюйм².

Этот подход дает основания для сравнения многочисленных материалов, для которых строятся изохронные зависимости напряжения от деформации. Пример такого сопоставления различных материалов показан на рис. 2.31 [22].

2.5.5. Влияние напряжения и температуры на модуль ползучести

Как уровень действующих напряжений, так и температуры непосредственно влияют на модуль упругости при ползучести. Если не считать модуля, относящегося к области очень малых деформаций, порядка 1%, то модуль ползучести убывает с увеличением напряжения. Эта закономерность иллюстрируется рис. 2.32. Подобным образом с повышением температуры модуль ползучести также значительно снижается. Этот эффект показан на рис. 2.33, где видно влияние температуры на зависимость модуля ползучести от времени. Совместное влияние уровня напряжений и температуры приводит к очень значительным изменениям модуля ползучести, которыми нельзя пренебрегать.

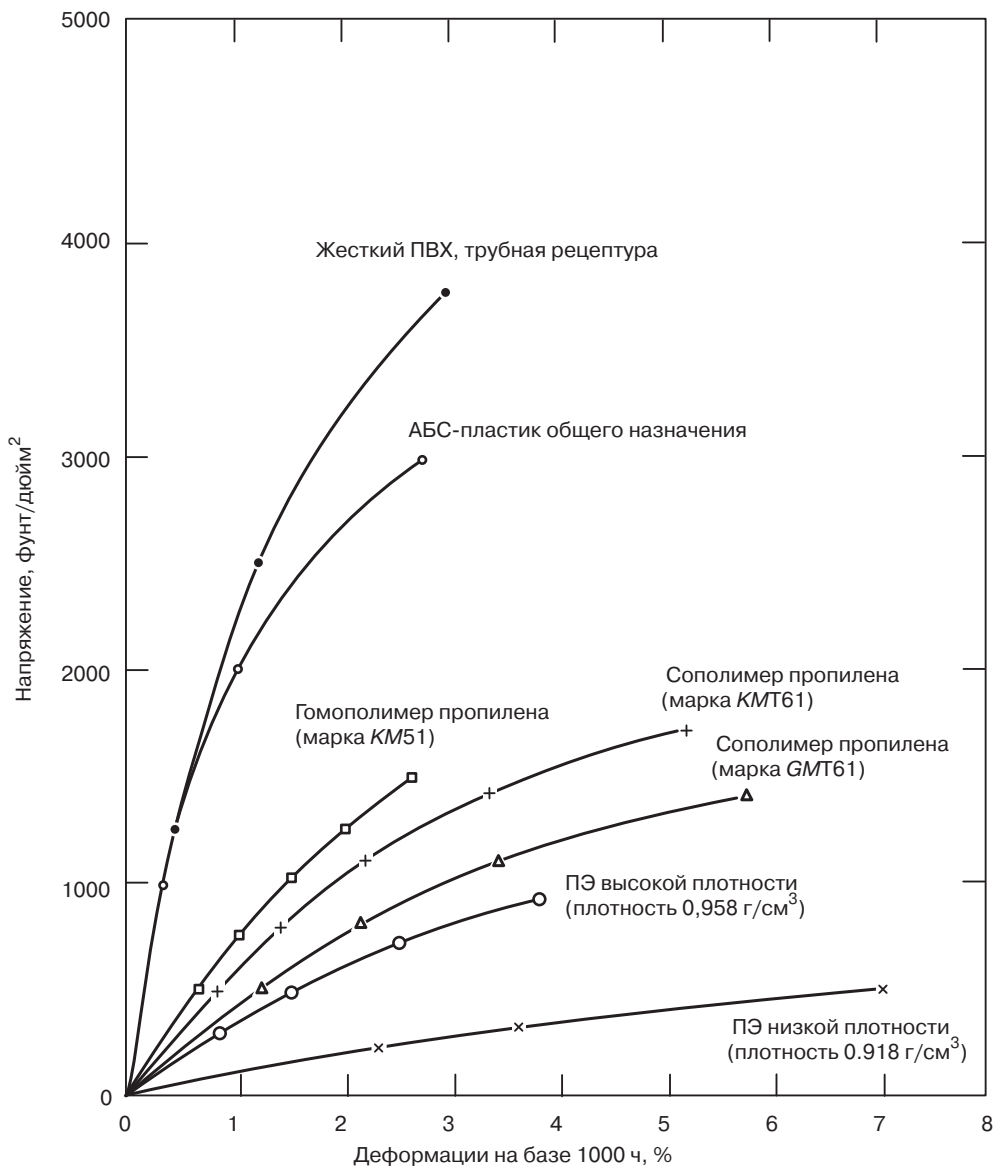


Рис. 2.31. Изохронные зависимости напряжения от деформации для различных материалов

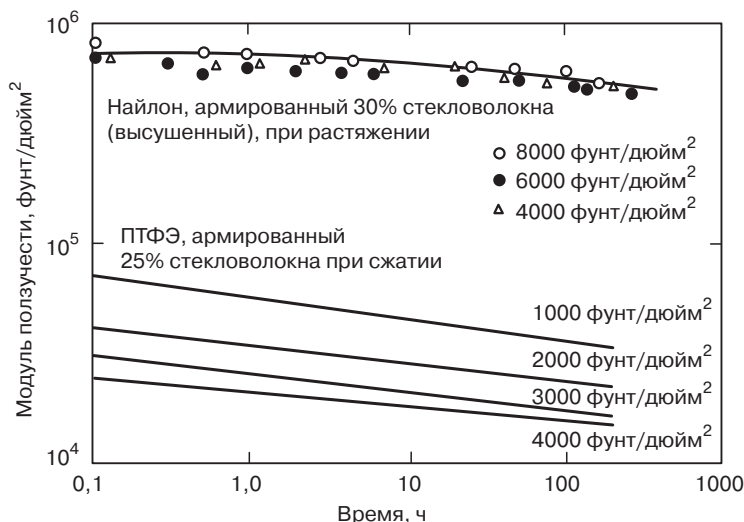


Рис. 2.32. Влияние уровня напряжения на модуль ползучести (воспроизведено с разрешения McGraw-Hill Company)

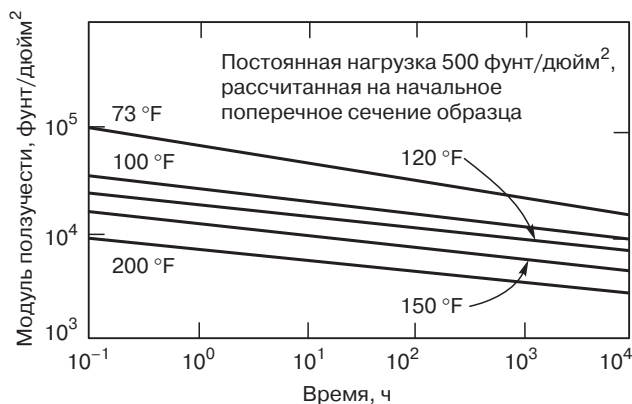


Рис. 2.33. Кривые ползучести, полученные при различных температурах (воспроизведено с разрешения McGraw-Hill Company)

2.5.6. Основные методики использования и применения результатов измерения модуля ползучести

В последние годы предпринимались многочисленные усилия, направленные на стандартизацию метода измерения ползучести и представления получаемых данных с тем, чтобы результаты таких измерений стали общепринятыми и понятными. Данные по результатам измерения ползучести промышленно производимых пластмасс накапливались, причем это делалось совместно с фирмами-производителями полимерных материалов. Результатом этих работ было составление таблиц, обобщающих полученные результаты, как это показано в табл. 2.2.

Несмотря на довольно широкое распространение и использование данных, получаемых методом ползучести, все же, как это видно из табл. 2.2, в настоящее время еще не существует единого метода испытаний, общепринятого в промышленности пластмасс. Производители материалов используют все три метода испытаний на ползучесть – растяжение, изгиб и сжатие. Кроме того, существуют и другие различия в используемых методиках испытаний в отношении способа получения образцов, их типе и размерах. Эти факторы в значительной степени влияют на свойства материала, определяемые методом ползучести. Конструктор, использующий эти данные при сопоставлении различных материалов, должен быть уверен, что они были получены в идентичных условиях.

Рекомендуется следующая процедура использования значений модуля ползучести [23]:

Устанавливается продолжительность использования изделия.

1. Обратитесь к таблицам или постройте графики значений модуля для температур, представляющих практический интерес для конкретных применений; в случае необходимости, экстраполируйте соответствующие зависимости, имея в виду, что значения модуля, как и ползучесть материала, в сильной степени зависят от температуры. Кроме того, ориентируйтесь на данные, отвечающие необходимому уровню напряжений. Для каждого материала или его типа составьте таблицу значений модуля при выбранных температурах и напряжениях. Для очень жестких пластмасс, таких как реактопласты, наполненные термопласты и аморфные термопласты, в области ниже комнатной температуры значения модуля не слишком сильно изменяются в зависимости от температуры и приложенного напряжения. Однако для большинства мягких и пластичных термопластов модуль изменяется в зависимости от температуры и нагрузки систематически и весьма значительно: чем больше нагрузка, тем ниже модуль ползучести. Этот эффект является следствием вязкоупругих свойств полимерных материалов.
2. С учетом роли напряжений конструктору предоставляется следующая альтернатива. Если заранее задан уровень действующих напряжений, то конструктор должен выбрать из существующих данных ту кривую для модуля ползучести, которая лежит наиболее близко к установленному напряжению. Если же уровень напряжений не задан, то конструктор должен использовать значения модуля ползучести при некотором напряжении, выбираемом «с запасом», и затем — после расчета напряжения — проверить результаты вычислений.
3. Исходя из имеющейся зависимости для модуля, выбрать его значение, отвечающее установленной продолжительности срока службы изделия (см. п. 1). Это и будет расчетное значение модуля, которое должно приниматься при дальнейших вычислениях.
4. Выбрать некоторое значение коэффициент запаса и ввести поправку на значение модуля. Эта процедура практически никогда не нужна при проектировании деталей из металла, но при проектировании деталей из пластмасс поправка на неопределенности всякого рода (например, возникающие при экстраполяции или иных причин) вводить коэффициент запаса необходимо. Обычно он составляет величины порядка 0,5–0,75.

Таблица 2.2 Данные по ползучести ряда промышленных полимерных материалов
(Данные в таблице воспроизведены по *Modern plastics Encyclopedia* 1980–1981, *McGraw-Hill*)

Материал					Испытуемый образец ¹³					Условия	
Тип поли- мера	Постав- щик	Торговое наименование и марка	Описание	Стан- дарт, военная специ- фикация или класси- фикация	Метод литья	Тип образца	Размеры	Способ испытаний	Способ измерения деформации	Способ кондиционирования образца	Темпе- ратура испыта- ний, °F
ABS	GE	<i>Cycolac DFA-R</i>	Литьевой образец, средний уровень ударной прочности, гладкая поверхность	<i>Fed. Spec. L-P-1183 Type 2</i>	IM	RB	4	F2	3		73 120 140
		<i>Cycolac GSE</i>	Экструзионный образец, высокая ударная прочность, высоко-модульный материал	<i>Fed. Spec. L-P-1183 Type 2, 5 and 6</i>	IM	RB	4	F2	3		73 120 140 160
		<i>Cycolas LS</i>	Экструзионный образец, высокая ударная прочность, термоформование	<i>Fed. Spec. L-P-1183</i>	IM	RB	4	F2	3		73 120 140
		<i>Cycolas DH</i>	Литьевой образец, повышенная теплостойкость		IM	RB	4	F2	3		73 100 120 140
		<i>Cycolas X-37</i>	Литьевой образец, повышенная теплостойкость (230 °F по методу <i>D TUL</i>), средний уровень ударной прочности		IM	RB	4	F2	3		73 100 120 140 180
		<i>Cycolas KJB</i>	Литьевой образец, средний уровень ударной прочности, огнестойкость 94 V0 при толщине образца 0,060 дюймов)		IM	RB	4	F2	3		73 140
		<i>Cycolas FBK</i>	Структурный пенопласт, огнестойкость 94 V0 при толщине образца 0,240 дюймов)		IM Solid Sp. Gr. 1,02	RB	4	F2	3		73

испытания ¹³	Данные испытаний на ползучесть ^{1, 2, 3}								
Начальное напряже- ние, фунт/ дюйм ²	Эффективный модуль ползучести ³ (в тыс. фунт/дюйм ²)							Время дости- жения по- следней точки	Время до разрушения илинаступле- ния предела текучести при началь- ном значении напряжения (в фунт/ дюйм ²)
	Значения, рассчитанные по деформации при ползучести ² или по прогибу (до разрушения или достижения предела текучести) при следующих значениях времени								
	1 ч	10 ч	30 ч	100 ч	300 ч	1000 ч	При по- следней точке испыта- ний		
1,000	345	323	313	278	244	215			
2,000	345	323	308	274	243	211			
1,000	303	222	187	154	125	94			
2,000	290	211	167	132	108	90			
1,000	137	93	78	63	53	44			
1,000	294	286	278	256	238	208			
2,000	294	286	278	256	233	204			
1,000	238	182	159	133	116	100			
2,000	227	172	149	124	106	90			
1,000	179	122	100	83	71	60			
1,000	105	59	49	41	36	32			
1,000	238	217	204	200	189	159			
2,000	224	211	200	189	179	155			
1,000	169	135	118	98	83	71			
2,000	159	121	103	86	74	63			
1,000	133	87	72	61	51	43			
1,000	351	333	303	263	227	200			
1,000	256	208	185	163	147	132			
1,000	238	185	161	139	121	105			
1,000	192	132	111	93	81	70			
1,000	364	339	328	299	267	230			
1,000	304	256	235	208	187	165			
1,000	270	220	200	180	160	143			
1,000	238	179	156	135	119	104			
500	167	80	69	59	50	43			
1,000	244	233	222	204	182	156			
1,000	93	56	46	36	33	28			
1,000	280	260	230	220	200	160			

Продолжение табл. 2.2

Материал					Испытуемый образец ¹³					Условия	
Тип полимера	Поставщик	Торговое наименование и марка	Описание	Стандарт, военная спецификация или классификация	Метод литья	Тип образца	Размеры	Способ испытаний	Способ измерения деформации	Способ кондиционирования образца	Температура испытаний, °F
					<i>IM foam Sp. Gr. 1.11</i>	<i>RB</i>	4	<i>F2</i>	3		73
		<i>Cycovin KAB</i>	Сплав АБС-пластик и ПВХ, экструзионный образец, огнестойкость — 94 VI при толщине образца 0,058 дюйма			<i>RB</i>	4	<i>F2</i>	3		73 120
	<i>Uniroyal</i>	<i>Kralastic W</i>	Экструзионный, трубный образец	<i>Fed. Spec. L-P-1183 Type 2, 5 and 6</i>	<i>CM</i>	<i>T1</i>	1	<i>T</i>	1		73
						<i>RS</i>	2	<i>T</i>	1		73
		<i>Kralastic MH</i>	Высокотекучий, литьевой образец	<i>Fed. Spec. L-P-1183 Type 1 and 2</i>	<i>CM</i>	<i>T1</i>	1	<i>T</i>	1		73
		<i>Kralastic MV</i>	Литьевой образец, листовой	<i>Fed. Spec. L-P-1183 Type 2, 5 and 6</i>	<i>CM</i>	<i>T1</i>	1	<i>T</i>	1		73 140
		<i>Kralastic K-2938</i>	Теплостойкий, литьевой образец	<i>Fed. Spec. L-P-1183 Type 1, 2, 3 and 4</i>	<i>CM</i>	<i>T1</i>	1	<i>T</i>	1		73 160
		<i>Kralastic SRS</i>	Экструзионный образец, листовой	<i>Fed. Spec. L-P-1183 Type 1, 2, 5 and 6</i>	<i>CM</i>	<i>T1</i>	1	<i>T</i>	1		73

испытания ¹³	Данные испытаний на ползучесть ^{1, 2, 3}								
Начальное напряже- ние, фунт/ дюйм ²	Эффективный модуль ползучести ³ (в тыс. фунт/дюйм ²)							Время дости- жения по- следней точки	Время до разрушения илинаступле- ния предела текучести при началь- ном значении напряжения (в фунт/ дюйм ²)
	Значения, рассчитанные по деформации при ползучести ² или по прогибу (до разрушения или достижения предела текучести) при следующих значениях времени								
	1 ч	10 ч	30 ч	100 ч	300 ч	1000 ч	При по- следней точке испыта- ний		
1,000	230	220	200	190	160	130			
1,000 1,000	280 133	250 86	235 71	206 62	185 54	160 45			
2,000 2,500 3,000 1,500	230 223 211 230	220 208 185 224	211 195 165 217	200 180 130 211		200	188	194 172 128 140	167 167 111 50,000
1,500 2,000 2,500 3,000 3,500 4,000	284 284 254 233 167	278 268 224 165	273 260 203	263 245 170	254 230 198 133	240 211 211	125 146	390 17	
3000 2,500 3,000 500 ⁵ 1,000 ^s 1,500 ^s	216 202 181 161 171 168	196 172 136 132 136 127	181 152 109 77 114 99	161 77 76	140 49 44		132	83	
2,000 3,000 4,000 5,000 500 1.000 1,500	330 328 308 279 263 263 263	323 305 278 237 250 233 203	308 288 256 201 227 189 170	290 265 230 200 147 147 135	270 244 197 147 118 105	244 217 104 84 75	167 188	580 42	
2,000 2,500 3,000 3,500	282 278 265 206	263 253 234	247 236 214	233 216 176	213 192 132	192 156	125 146	350 3	

Окончание табл. 2.2

Материал					Испытуемый образец ¹³						Условия	
Тип полимера	Поставщик	Торговое наименование и марка	Описание	Стандарт, военная спецификация или классификация	Метод литья	Тип образца	Размеры	Способ испытаний	Способ измерения деформации	Способ кондиционирования образца	Температура испытаний, °F	
	Mon-santo	Lustran 261	Экструзионный образец, листовый	Fed. Spec. L-P-1183 Type 1	ES	T1	1	T	1		73	
		Lustran 461	Экструзионный образец, листовый	Fed. Spec. L-P-1183 Type 1	ES	T1	1	T	1		73	
		Lustran 761	Экструзионный образец, листовый	Fed. Spec. L-P-1183 Type 1	ES	T1	1	T	1		73	
	Shulman	Polyman 511	Сплав, высокотемпературный, литевой образец		IM	RB	4	F4	3		73 150	
	LNP	Thermocomp AF-1004	Литевой образец, армированный 20% стекловолокон		IM	RB	4	F4	3		75	
		Thermocomp AF 1008	Литевой образец, армированный 40% стекловолокон		IM	RB	4	F4	3		75	

Объяснения использованных сокращений при обозначении образцов и условий испытаний

Методы литья:

- CA — компрессионное литье по ASTM D1928.
- CB — компрессионное литье, отжиг в течение 2 ч при 140 °C, закалка при 0 °C.
- CC — компрессионное литье, отжиг в течение 2 ч при 140 °C, медленное охлаждение.
- CD — компрессионное литье, отжиг в течение 2 ч при 140 °C, охлаждение со скоростью 40 °C в час.
- CE — компрессионное литье, нагрев до 700 °F, охлаждение со скоростью 170 °F в час.
- CF — компрессионное литье, нагрев до 675 °F, охлаждение со скоростью 175 °F в час.
- CG — компрессионное литье, нагрев до 720 °F, охлаждение со скоростью 180 °F в час.
- CH — компрессионное литье, нагрев до 720 °F, охлаждение со скоростью 300 °F в час.
- CI — компрессионное литье, нагрев до 716 °F, охлаждение со скоростью 54 °F в час.
- CL — листы, полученные каландрованием.
- CM — компрессионное литье.
- CS — листы, полученные методом полива.
- DS — непосредственное смешение при литье под давлением.
- ES — экструдированные листы.
- IM — литье под давлением.
- IZ — литье под давлением, температура литья 265 °F.

испытания ¹³	Данные испытаний на ползучесть ^{1, 2, 3}								
Начальное напряже- ние, фунт/ дюйм ²	Эффективный модуль ползучести ³ (в тыс. фунт/дюйм ²)							Время дости- жения по- следней точки	Время до разрушения илинаступле- ния предела текучести при началь- ном значении напряжения (в фунт/ дюйм ²)
	Значения, рассчитанные по деформации при ползучести ² или по прогибу (до разрушения или достижения предела текучести) при следующих значениях времени								
	1 ч	10 ч	30 ч	100 ч	300 ч	1000 ч	При по- следней точке испыта- ний		
2,000	476	465	465	465	465	465			
2.000	571	513	488	417	377	328			
2,000	328	282	250	222	1290	155			
1,500 2,000 1,000	360 335 250	355 330 230	350 321 219	340 318 165	320 315 138	305 300	283 280	2,200 2,200	
2,000 5,000		810 800	800 790	790 780	780 775	780 770			
5,000 ⁴ 10,000 ⁵	1,720 1,760	1,680 1,710	1,650 1,690	1,636 1,670	1,600 1,650				

M — механическая обработка.
SF — структурный пенопласт, литье под давлением.
TM — трансферное литье.

Типы образцов
CR — брусок цилиндрической формы.
DC — штамп типа *C* по *ASTM D412*.
D1 — отливка типа штамп *C* с сужением размером 3,4 дюйма.
HC — полый цилиндр, по прим. 17.
I2 — прямоугольный брусок по ИСО *R527*.
RB — прямоугольбный брусок.
RC — прямоугольная колонка.
RS — прямоугольная полоска.
T — брусок для растяжения.
TB — брусок для растяжения, по прим. 14.
T1 — брусок для растяжения, тип 1, по *ASTM D638*.
T2 — брусок для растяжения, тип 2, по *ASTM D638*.
T3 — брусок для растяжения, тип 3, по *ASTM D638*.

Объяснения использованных сокращений при обозначении образцов и условий испытаний

Размеры, в дюймах

(общие размеры для брусков и цилиндров, а также приведенные размеры для образцов с утолщенными концами)

- 1 — $0,5 \times 1/8$
- 2 — $5 \times 1 \times 0,090$
- 3 — $4 \times 1 \times 0,026$
- 4 — $5 \times 0,5 \times 1/8$
- 5 — $1/4 \times 1/16$
- 6 — $0,5 \times 1/16$
- 7 — 0,5 (по диаметру) \times 1 (по высоте)
- 8 — $0,25 \times 1/8$
- 9 — $0,25 \times 1/12$
- 10 — $4 \times 0,125 \times 0,218$
- 11 — $5 \times 0,5 \times 1/16$
- 12 — $0,24 \times 0,075$
- 13 — $5 \times 0,031 \times 0,392$
- 14 — $5 \times 0,5 \times 0,5$
- 15 — $16 \times 1 \times 0,125$ или 0,25
- 16 — $8 \times 0,5 \times 0,125$
- 17 — $0,190 \times 0,190 \times 2$ (по высоте)
- 18 — $5/8$ (внутренний диаметр) $\times F3/4$ (наружный диаметр) $\times 2,5$ (по высоте)
- 19 — $0,024 \times 0,035$
- 20 — $3,5 \times 0,25 \times 0,125$
- 21 — $120 \times 20 \times 6$ мм (или $4,72 \times 0,79 \times 0,25$ дюйма)
- 22 — $0,39 \times 0,16$
- 23 — $4 \times 0,500 \times 0,175$
- 24 — $6,5 \times 0,5 \times 0,25$
- 25 — $5 \times 0,5 \times 0,25$

Типы деформаций

- G — сжатие.
- C1 — сжатие, по прим. 1.
- F — изгиб: простой изгиб бруса, приложение нагрузки по центру.
- F2 — изгиб: простой изгиб бруса, приложение нагрузки по центру, расстояние между опорами 2 дюйма.
- F3 — изгиб: простой изгиб бруса, приложение нагрузки по центру, расстояние между опорами 3 дюйма.
- F4 — изгиб: простой изгиб бруса, приложение нагрузки по центру, расстояние между опорами 4 дюйма.
- F6 — изгиб: однородный изгибающий момент, расстояние между опорами 6 дюймов.
- F7 — изгиб: четырехточечный изгиб, постоянное напряжение в наружных волокнах.
- T — растяжение.

Способ измерения деформаций

- 1 — деформации в суженном сечении.
- 1A — деформации в суженном сечении, по прим. 15.
- 1B — деформации в суженном сечении, по прим. 16.
- 1C — деформации в суженном сечении, с поправкой на усадку.
- 2 — по раздвижению зажимов.
- 3 — по прогибу в центре бруска.
- 4 — по уменьшению высоты.
- 5 — с помощью экстензиометра, по прим. 17.

6. Замените значение модуля в расчетных уравнениях с учетом введенного коэффициента запаса. В качестве примера рассчитаем необходимую ширину прямоугольного бруса, исходя из требования ограниченности максимального прогиба, причем предполагается, что расстояние между опорами и толщина бруса заданы. После того как было определено расчетное значение модуля, необходимая ширина бруса определяется по следующей формуле:

$$b = \frac{P}{E\Delta} \frac{L^3}{4d^3},$$

где b — ширина бруса; d — высота бруса; L — расстояние между опорами; P — нагрузка; Δ — максимальный допустимый прогиб; E — модуль ползучести.

2.6. Релаксация напряжений

Под релаксацией напряжения понимают постепенное уменьшение напряжения при сохранении постоянной деформации. Это характерное для полимерных материалов поведение исследуют, создавая фиксированную деформацию образца и измеряя изменение усилия, необходимого для ее поддержания. Этот тип эксперимента противоположен исследованию ползучести, когда фиксируется нагрузка и измеряется изменение деформации во времени. На рис. 2.34 схематически сопоставлены явления ползучести и релаксации.

Эффект релаксации напряжения часто не учитывается при конструировании изделий из пластмасс, в частности, потому, что явление ползучести более очевидно и наглядно. Однако в целом ряде практически важных случаев релаксация напряжений играет существенную роль. Так, например, при закрывании горловин бутылок требуется, чтобы релаксация была исключительно медленной с тем, чтобы

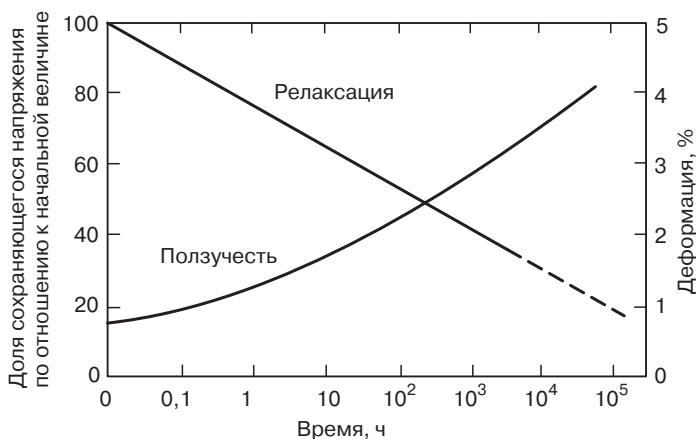


Рис. 2.34. Ползучесть и релаксация

созданная при завинчивании деформация сохранялась как можно дольше. Если же материал, используемый для изготовления горлышка бутылки, склонен к релаксации напряжения при созданной деформации, то плотность контакта бутылки и пробки исчезнет. Аналогичные по смыслу проблемы возникают при установке металлических вкладышей в изделия из пластмасс, а также при установке пружинных устройств многоразового пользования в различных камерах, бытовых приборах и иных устройствах.

Исследования релаксации напряжений могут выполняться с помощью стандартных испытательных машин, подобных описанным выше в настоящей главе. Однако такое применение испытательных машин нерационально, поскольку эксперименты на релаксацию загружают машину в течение длительного времени. Оборудование для испытаний на релаксацию должно позволять измерять с высокой точностью очень маленькие деформации, даже если деформирование происходит с высокой скоростью. Во многих современных машинах для этой цели используют специальные датчики деформации или дифференциальные трансформаторы, работающие вместе с записывающими устройствами для фиксации изменений напряжения во времени.

Типичная кривая релаксации напряжений схематично представлена на рис. 2.35. В начале эксперимента в образце создается необходимая деформация, которая развивается при постоянной скорости деформирования. После того как достигается заданная деформация, она сохраняется постоянной в течение длительного времени. При этом измеряется процесс релаксации — спада напряжений во времени. Если непрерывная запись напряжения отсутствует, то напряжение измеряется через определенные отрезки времени с тем, чтобы в итоге получить график зависимости напряжения от времени.

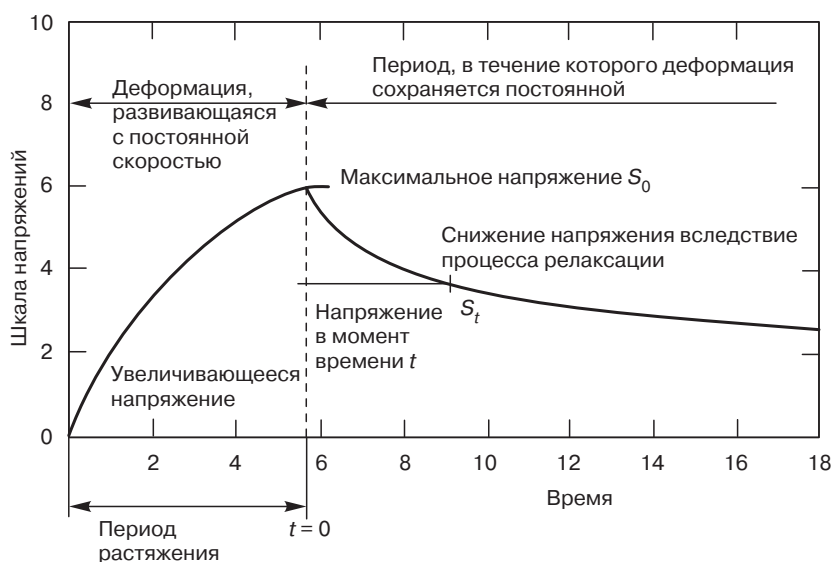


Рис. 2.35. Зависимость напряжения от времени (с согласия фирмы *Inston Corporation*)

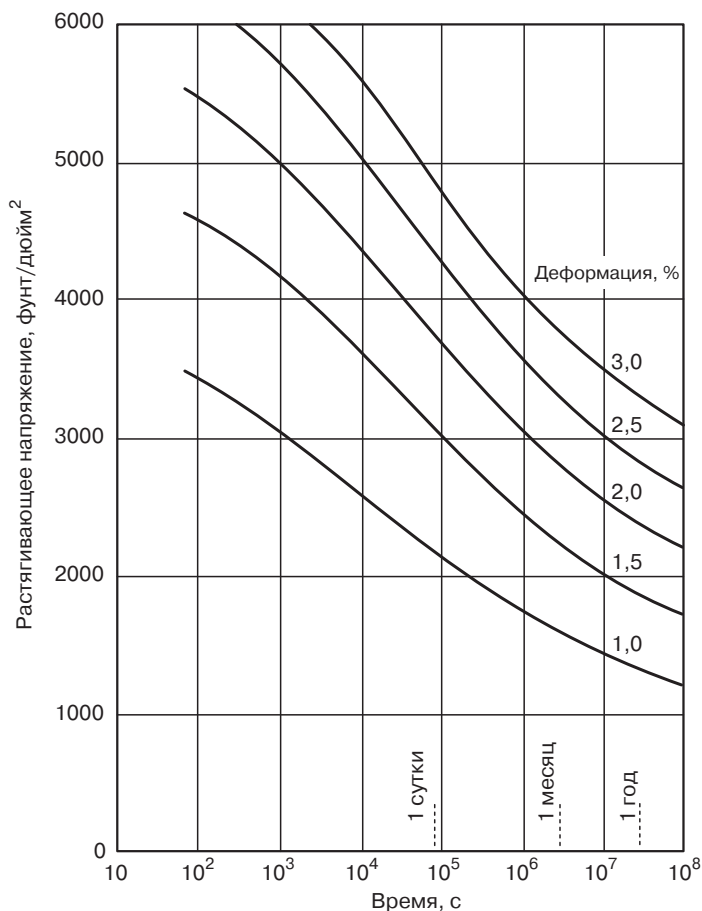


Рис. 2.36. Релаксационные кривые, полученные при различных уровнях заданных деформаций (с разрешения фирмы *Ticona*)

Пример релаксационных кривых, полученных при различных заданных деформациях, показан на рис. 2.36. Процесс релаксации часто исследуют при различных температурах и разных уровнях заданных деформаций.

Результаты измерений снижения напряжения во времени могут быть преобразованы в более осмысленные величины эффективного модуля, что достигается просто делением напряжения на заданную деформацию. Тогда релаксационные кривые могут быть перестроены, что позволяет представить зависимость эффективного модуля от времени. Дальнейшее упрощение представления экспериментальных данных достигается использованием логарифмической шкалы, что облегчает выполнение стандартной процедура экстраполяции, как это делалось при обработке экспериментальных данных по ползучести.

2.7. Сопротивление ударным нагрузкам

2.7.1. Введение

Сопротивление ударным нагрузкам непосредственно определяется суммарной пластичностью полимерного материала. Под последней понимается способность материала поглощать энергию деформирования. Площадь под кривой напряжение–деформация прямо пропорциональна пластичности. Энергия, поглощаемая при ударе, представляет собой меру пластичности: чем выше эта энергия, тем более пластичен материал, и наоборот. Сопротивление ударным нагрузкам — это способность материала выдерживать удар, не разрушаясь, или же, другими словами, способность сопротивляться разрушению при приложении механической нагрузки с высокой скоростью.

Теория, связывающая пластичность и хрупкость материала, довольно сложна для восприятия. Определяющую роль в том, является ли материал пластичным или хрупким, играет молекулярная подвижность. Так, в таких жестких материалах, как полистирол или акрилаты, сегменты макромолекул не могут выйти из взаимного зацепления и тем самым противостоять быстрому воздействию механической нагрузки. Вследствие этого такие полимеры разрушаются хрупко. Такие же полимеры, как пластифицированный ПВХ, напротив, обладают гибкостью и поэтому обладают высокой сопротивляемостью ударным нагрузкам из-за того, что большие сегменты макромолекул могут перемещаться относительно свободно и тем самым быстро реагировать на изменение механических напряжений [24].

Ударные характеристики полимеров часто модифицируют, просто добавляя модификаторы различного рода, такие как бутадиеновые эластомеры или некоторые акриловые полимеры. Введение в полимер пластификатора также способствует повышению ударной прочности, но за счет снижения жесткости. Такие материалы как нейлон, которые сами по себе обладают неплохой стойкостью к ударным нагрузкам, могут ориентироваться, так что их макромолекулы оказываются выпрямленными, и это заметно сказывается на сопротивлении ударным нагрузкам. Другой путь повышения стойкости к удару состоит в введении в полимер волокнообразных наполнителей, которые перераспределяют нагрузки в материале [25].

Разрушение большинства полимеров под действием ударных нагрузок происходит весьма характерным образом. Под действием удара на поверхности возникает трещина. Энергия, необходимая для образования трещины, называется энергией инициирования возникновения трещины. Если приложенная энергия превышает энергию инициирования, то трещина продолжает распространяться. Разрушение материала происходит тогда, когда приложенная энергия превысит энергию, необходимую для распространения трещины. Таким образом, оба компонента — энергия инициирования и энергия распространения трещины — дают свой вклад в полную энергию разрушения.

Можно выделить четыре основных типа разрушения, обусловленного действием ударных нагрузок [26].

Хрупкое разрушение. При разрушении такого типа образец быстро разделяется на части без каких-либо признаков текучести. При этом наблюдается катастрофическое

разрушение, какое, например, происходит при разрушении образцов полистирола общего назначения.

Слабое образование трещин. При разрушении такого типа видны образующиеся трещины и наблюдаются некоторые признаки текучести, но разрушение происходит практически без изменения формы образца.

Текучесть. В этом случае действительно наблюдаются большие деформации текучести и побеление материала, но каких-либо признаков образования трещин не видно.

Пластичное разрушение. При этом возникают большие деформации типа текучести одновременно с образованием трещин. Примером материалов, разрушающихся по механизму такого рода, является поликарбонат.

Различие между этими четырьмя типами разрушения не вполне очевидно, так что всегда возможно некоторое перекрытие механизмов разрушения. На рис. 2.37, а представлена иллюстрация различных типов разрушения.

Испытания на удар представляют собой один из наиболее точно и подробно описанных методов оценки свойств полимерных материалов. Но в то же время получаемые результаты испытаний — одни из наиболее плохо понимаемых. Предсказание поведения пластмассы при ударе — это одна из наиболее сомнительных оценок при конструировании изделий из полимера. Изначально проблема состояла в том, что ранние варианты стандартных испытаний по Изоду и по Шарпи были просто заимствованы промышленностью полимерных материалов из металлургии. Представления, описывающие разрушение металлов при ударе, оказались неудовлетворительными при их перенесении на полимеры из-за сложности строения последних.

а) ВИДЫ РАЗРУШЕНИЯ

ХРУПКОЕ

Образец разбивается вдребезги

ХРУПКОЕ/ПЛАСТИЧНОЕ

Заметные следы текучести, трещины в образце распространяются в радиальном направлении
Обнаруживаются окружные трещины

ПЛАСТИЧНОЕ/ХРУПКОЕ

Наблюдается пик текучести, видно растрескивание в радиальном направлении
Большинство радиальных трещин затормаживаются, не распространяясь на все сечение

ПЛАСТИЧНОЕ

Полностью развиваются пластические деформации

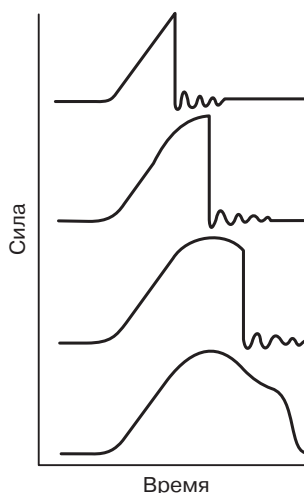
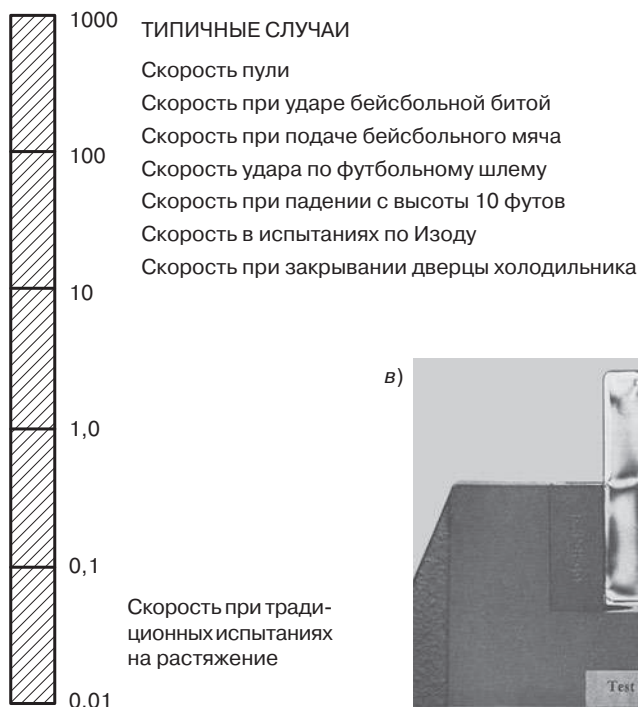
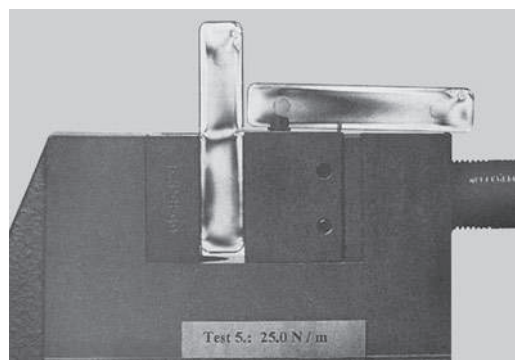


Рис. 2.37 а) основные типы разрушения (с разрешения *Instron Corporation*); б) типичные скорости при некоторых вариантах ударных нагрузок (с разрешения *Dow Chemical Company*); в) способ установки образца в зажимах (с разрешения *CEAST USA Inc*)

б) Скорость, фут/с



в)



Окончание рис. 2.37

2.7.2. Факторы, влияющие на ударную прочность

А. Скорость нагружения (деформирования)

Скорость, с которой удар наносится на образец, играет огромную роль в проявлении свойств полимерного материала. При низких скоростях нагружения даже относительно жесткие материалы неплохо сопротивляются удару. Однако же при высоких скоростях для всех материалов существует некоторая критическая скорость деформирования, при которой происходит переход к хрупкому разрушению, типа разрушения стекла.

На рис. 2.37, б приведены некоторые характерные скорости, наблюдаемые как во время испытаний, так и в реальной жизни. Представим себе, что мы должны спроектировать футбольный шлем¹. Очевидно, что при выборе материала мы не можем ориентироваться на результаты ударных испытаний по Изоду, поскольку скорость удара в последнем случае примерно в 10 раз ниже, чем та, которой подвергается конечное изделие при его применении. Более реалистичные данные дают испытания по удару падающим грузом, при которых скорость ближе к осуществляемой в реальной жизни.

¹ Речь идет об американском футболе. — Примеч. перев.

Б. Чувствительность к надрезу

Надрез, сделанный на образце, или острый угол в детали, значительно понижает стойкость изделия к удару. Наличие надреза приводит к концентрации напряжений и поэтому способствует разрушению при ударной нагрузке. Все пластмассы чувствительны к надрезу, однако степень этой чувствительности различна в зависимости от типа полимера. Как глубина надреза, так и радиус скругления при вершине влияют на прочность при ударе. Так, например, при большей величине радиуса у вершины концентрация напряжений меньше, и поэтому требуется большая энергия для разрушения образца. Из сказанного выше очевидно, что при конструировании изделий из пластмасс следует избегать надрезов, острых углов и иных факторов, играющих роль концентраторов напряжений.

В. Температура

Сопротивление полимеров ударным нагрузкам в сильной степени зависит от температуры. Понижение температуры приводит к резкому уменьшению стойкости к удару. Наиболее резко этот эффект проявляется вблизи температуры стеклования. И напротив, при повышенных температурах ударная прочность пластмасс возрастает.

Г. Ориентация

Характер молекулярной ориентации в изделии в значительной степени влияет на сопротивление ударным нагрузкам. Молекулярная ориентация, достигаемая при производстве волокон и пленок, придает дополнительную прочность материалу по сравнению с его изотропным состоянием [28]. Однако одноосная ориентация макромолекул в изделиях, полученных литьем под давлением, может иметь фатальные последствия при эксплуатации этих изделий, поскольку при реальных применениях обычно имеют дело с многоосной нагрузкой. Ударная прочность всегда выше при ее измерении в направлении течения при литье.

Д. Условия переработки

Технологические условия переработки полимера играют ключевую роль в проявлении стойкости к ударным нагрузкам. При неудачном выборе технологического режима материал может потерять присущую ему пластичность. При неправильных режимах формования материала появляются поры, которые играют роль концентраторов напряжений. При превышении температуры может происходить термодеструкция, которая также способствует снижению ударной прочности. Неверно выбранные режимы переработки приводят к появлению линий сварки, что практически всегда понижает ударную прочность изделия в целом. Ударная прочность образцов, полученных методом компрессионного формования, всегда ниже по сравнению с образцами, изготовленными методом литья под давлением.

Е. Степень кристалличности. Молекулярный вес

Увеличение кристалличности во всех случаях приводит к снижению стойкости к удару, что способствует повышению вероятности хрупкого разрушения. Уменьшение средней молекулярной массы определяет тенденцию к понижению ударной прочности и наоборот.

Ж. Метод создания нагрузки

Способ осуществления ударной нагрузки в значительной мере влияет на результаты испытаний. Использование удара маятникового копра дает иные результаты по сравнению с данными, получаемыми с помощью падающего груза или высокоскоростного удара шариком.

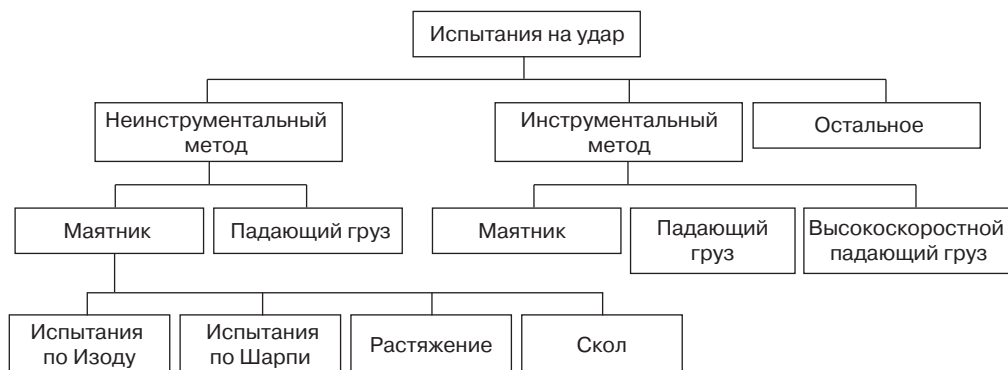
3. Способ установки образца в зажиме

Дополнительное усилие, которое создается при креплении образца в зажиме, приводит к возникновению предварительно напряженных областей, в частности, если испытывают образцы с надрезом. Эти напряжения способствуют снижению ударной прочности (см. рис. 2.37, в).

2.7.3. Типы ударных испытаний

В последние два десятилетия по всему миру было затрачено огромное количество времени, денег и усилий на разработку и исследование различных способов испытаний полимерных материалов на удар. При этом использовались образцы различной формы и размеров, а также разные варианты испытательного оборудования. Образцы исследовались при различных геометрических схемах нагружения — при растяжении, сжатии, изгибе и кручении. Ударные нагрузки создавались с помощью различных устройств — молотов, штампов, маятников, а также падающих грузов и пуль. К сожалению, существует очень слабая корреляция, если она вообще существует между результатами различных предлагаемых методов испытаний. Было опубликовано огромное количество статей и технических отчетов, в которых доказывались преимущества одного метода над другим. Однако к настоящему времени в промышленности не существует сколько-нибудь широкого консенсуса по поводу того, какой метод испытаний на удар следует рассматривать как идеальный.

В настоящем разделе предпринимается попытка рассмотреть самые различные методы испытаний на удар с тем, чтобы оценить их относительные достоинства и ограничения.



Методы испытаний можно разделить на три основные группы, которые делятся на подклассы, как это показано в приводимой ниже схеме.

А. Испытания на удар с помощью маятникового копра

Этот метод испытаний по Изоду–Шарпи стандартизован в ряде документов, в частности в стандартах *ASTM D256*, *ASTM D4812*, *МСО 179*. Целью таких испытаний является определение относительной чувствительности стандартного образца к удару, наносимому с помощью падающего маятника. Результаты испытаний представляются в виде величины энергии, затраченной на то, чтобы разрушить образец. В действительности энергия затрачивается на то, чтобы деформировать образец, инициировать образование трещины и ее распространение по всему сечению, а также на то, чтобы отбросить отколовшуюся часть от оставшегося образца. Последняя компонента называется «фактором отбрасывания». Энергия, затрачиваемая на трение и создание колебаний аппаратуры, обычно минимальна и не учитывается при анализе результатов испытаний.

На образце, испытываемом по методу Изода, должен быть сделан надрез. Целью этой операции является создание концентратора напряжений, что должно привести к хрупкому разрушению образца. При этом наличие надреза практически исключает развитие пластических деформаций. Нанесение надреза на образец в очень сильной степени влияет на результаты испытаний, поскольку различные материалы по-разному чувствительны к надрезу. Этот эффект будет обсуждаться в разделе 2.7.2, Б.

При испытаниях по Изоду образец закрепляется в вертикальном положении, образуя консоль. Далее по образцу наносится удар падающим маятником, который высвобождается на определенном расстоянии от места зажима образца. Аналогичная схема, за исключением способа крепления образцов, используется и при испытаниях по Шарпи. В этом методе образец устанавливается горизонтально, представляя собой свободно лежащий брусок. Затем удар наносится падающим маятником по середине образца. Преимуществом такой схемы установки образца является отсутствие зажимов, давление в которых может влиять на результаты испытаний. В настоящее время метод Шарпи считается предпочтительным для испытаний полипропилена.

Аппаратура и образцы

Испытательное оборудование состоит из массивной платформы с приспособлением для установки испытуемых образцов. В большинстве случаев крепление образцов осуществляется таким образом, чтобы они располагались либо вертикально (при испытаниях по Изоду), либо горизонтально (при испытаниях по Шарпи). Маятник с молотом на конце устанавливается в антифрикционном подшипнике. Для проведения испытаний очень жестких образцов на маятник дополнительно навешиваются грузы. С маятником соединен индикатор со шкалой, по которой можно определить, какая энергия осталась после разрушения образца. Шкала прокалибрована непосредственно в дюймах · фунт или футах · фунт. На конце молота установлен ударник, выполненный из закаленной стали. В методах Изода и Шарпи используется несколько различная конструкция ударника. Детальное описание всех элементов эксперимента содержится в стандартах *ASTM*.

В одной из новых разработок тестера для испытаний на удар использована автоматическая система обработки результатов испытаний, основанная на измерении

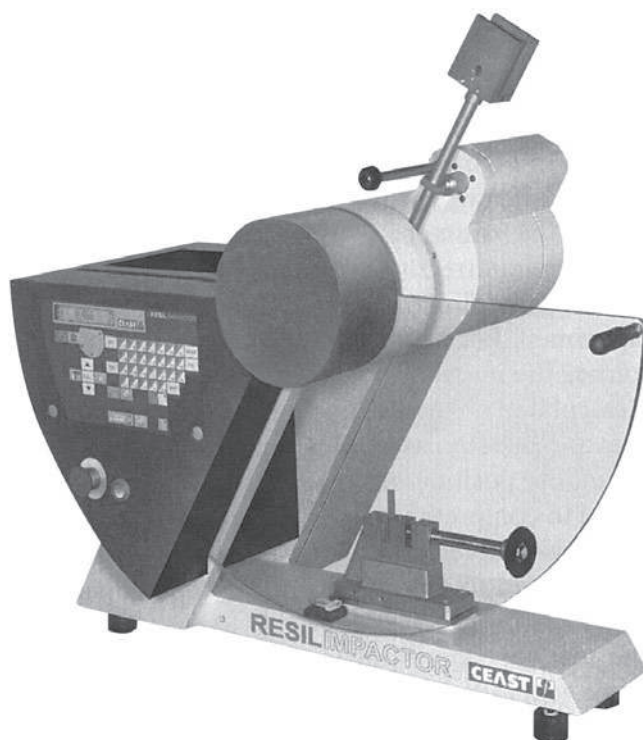


Рис. 2.38. Маятниковый копер для испытаний пластмасс на удар (разработка CEAST USA, Inc)

импульсов от оптического датчика, закрепленного на оси маятника. На рис. 2.38 показана типичная аппаратура для испытаний пластмасс на удар.

Образцы для испытаний на удар могут изготавливаться либо литьем под давлением, либо вырезаться из листовых заготовок. Для испытаний по Изоду используются образцы размером $2,5 \cdot 0,5 \cdot 0,125$ дюйма. Но чаще всего используют образцы толщиной 0,125 дюйма. Но все же более предпочтительны образцы толщиной 0,25 дюйма, поскольку они менее чувствительны к изгибу и разрушению. Надрез на образец следует наносить очень аккуратно с помощью фрезерного или токарного станка. Рекомендуемая глубина надреза 0,100 дюйма. На рис. 2.39 показан коммерчески доступный станок для нанесения надреза.

Процедура испытаний

Испытания по Изоду

Образец устанавливается в зажиме таким образом, чтобы его плоскость была ориентирована перпендикулярно по отношению к направлению удара. Правильное расположение образца показано на рис. 2.40.

Далее высвобождается молот, который бьет по образцу и, разрушая его, пролетает дальше. Если при ударе образец не разрушается, то на маятник навешиваются дополнительные грузы и эксперимент повторяется до тех пор, пока вес груза не

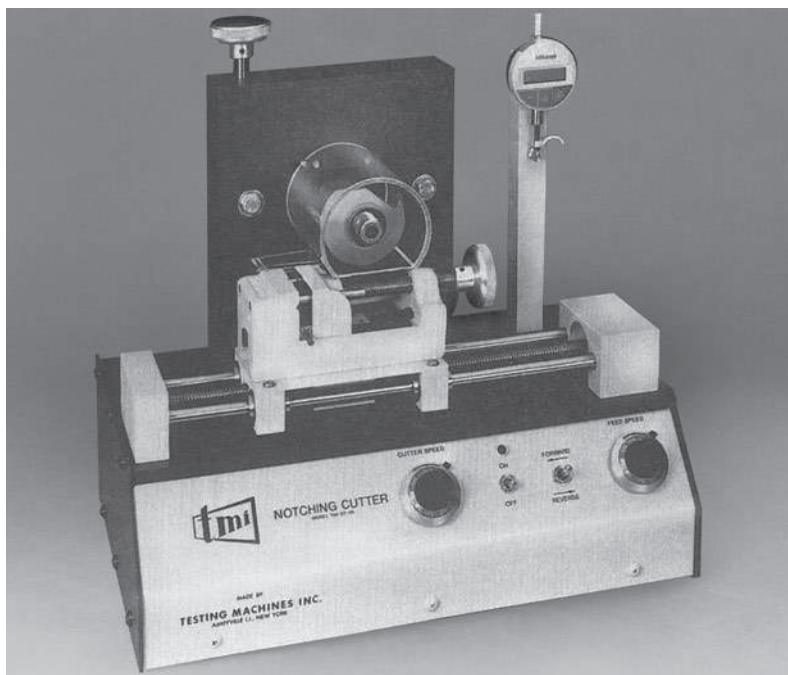


Рис. 2.39. Станок для нанесения надреза на образцы, используемые при ударных испытаниях (с разрешения *Testing Machines, Inc.*)

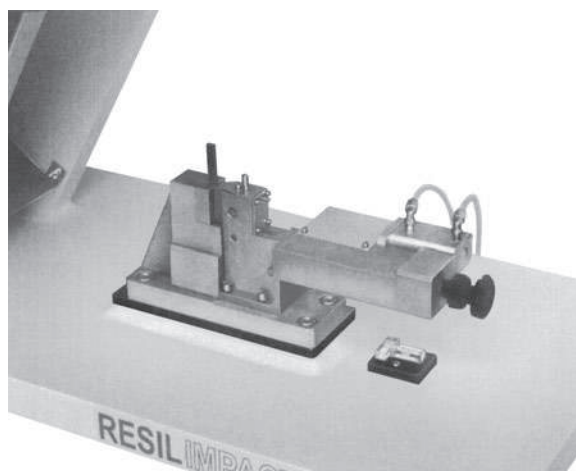


Рис. 2.40. Фотография, показывающая правильное расположение образца при испытаниях на удар по Изоду (с разрешения *CEAST USA, Inc.*)

окажется достаточным для разрушения образца. Результаты испытаний определяются непосредственно по шкале прибора и выражаются в дюймах · фунт или футах · фунт. Конечный результат испытаний представляет собой величина, определяемая по шкале прибора, деленная на толщину образца. Например, если на шкале прибора считывается показание в 2 фут · фунт, а испытывался образец толщиной 0,125 дюйма, то ударная прочность образца характеризуется величиной 16 (фут · фунт)/дюйм. Таким образом, значения ударной прочности всегда относятся к толщине 1 дюйм, хотя в действительности всегда испытываются более тонкие образцы.

В ряде случаев измеряют ударную прочность при обратном расположении надреза по отношению к направлению удара. В этой ситуации в области надреза возникают сжимающие, а не растягивающие напряжения.

Как уже говорилось выше, энергия, используемая при разрушении образца, складывается из нескольких составляющих — энергии деформирования, энергии инициирования образования трещины и ее распространения, а также энергии, затрачиваемой на отбрасывание разрушенного конца образца.

При испытаниях образцов с надрезом энергия деформирования резко снижается и ее вклад можно не учитывать. Если речь идет о достаточно пластичных образцах, у которых ударная прочность по Изоду превышает 0,5 (фут · фунт)/дюйм, то вклад энергии, затрачиваемой на отбрасывание конца образца также пренебрежимо мал. При испытаниях хрупких материалов, у которых ударная прочность составляет величины, меньшие 0,5 (фут · фунт)/дюйм, энергия, затрачиваемая на отбрасывание разрушенной части образца, составляет заметную долю от общей энергии, так что ее вкладом пренебречь нельзя. Способ оценки этого компонента энергии описан в работе [30].

Испытания по Шарпи

Методика этих испытаний очень близка к процедуре испытаний по Изоду. Единственное различие состоит в положении образца. На рис. 2.41 показана соответствующая установка. Как видно, в этом случае образец располагается горизонтально и не

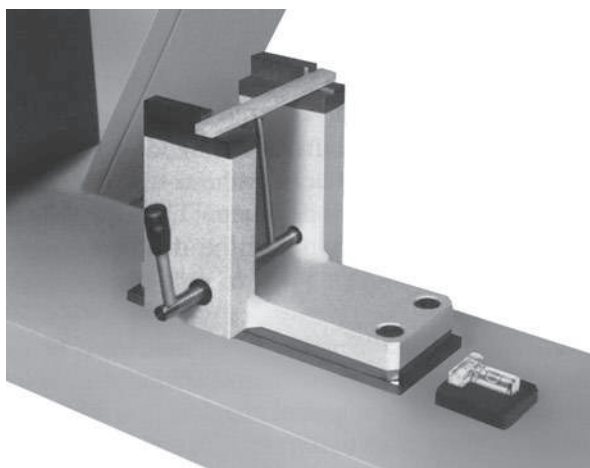


Рис. 2.41. Тестер для испытаний на удар по Шарпи (с разрешения CEAST USA, Inc.)

закрепляется в зажимах. Такая схема испытаний годится только для образцов, которые полностью разрушаются при ударе. Прочность на удар по Шарпи вычисляется путем деления показания индикатора прибора на толщину образца. Результаты для образцов с надрезом представляются в единицах (фут · фунт)/дюйм.

Роль различных факторов и ограничения метода

Надрез. Даже небольшие вариации радиуса и глубины надреза заметно влияют на результаты испытаний на ударную прочность. Значительную роль играют и другие факторы, такие как скорость движения молота, острота заточки ударника, тип полимера, качество режущего инструмента, используемого для нанесения надреза. Все эти факторы очень трудно проконтролировать, так что расхождения между результатами параллельных испытаний оказываются довольно обычным явлением. Для некоторых полимеров, особо чувствительных к изменениям температуры, важную роль играет скорость движения маятника, поскольку при высокой скорости становится возможной термодеструкция полимера. Наличие надреза создает область концентрации напряжений, что при испытаниях частично кристаллических полимеров приводит к нереально низким значениям ударной прочности. Рекомендации по методике испытаний включают в себя даже такие особенности проведения эксперимента, как временной интервал между нанесением надреза и моментом начала испытаний, который должен составлять, по крайней мере, 40 часов.

Толщина образцов. Хотя результаты испытаний на ударную прочность представляются для базовой толщины 1 дюйм, в действительности выбор толщины образцов влияет на получаемые результаты. В особенности это относится к поликарбонату.

Подготовка образцов. Обычно ударная прочность образцов, получаемых литьем под давлением выше, чем образцов, полученных компрессионным формованием. Этот эффект обусловлен молекулярной ориентацией, происходящей при литье. Существенную роль играет также расположение литников, в особенности это справедливо для материалов, армированных волокнами.

Температура. Ударная прочность возрастает с увеличением температуры. И наоборот.

Наполнители и иные добавки. Введение в полимер различных добавок и армирующих элементов в значительной степени сказывается на ударной прочности материала. Так, например, для неармированного поликарбоната ударная прочность по Изоду составляет 15 (фут · фунт)/дюйм, а введение в полимер 30% стекловолокна понижает эту величину до 3,7 (фут · фунт)/дюйм. В случае же полистирола наблюдается обратный эффект: введение в полимер 30% стекловолокна приводит к двукратному возрастанию ударной прочности. Введение наполнителей и красителей, как правило, способствует снижению ударной прочности.

Ограничения. Результаты, полученные при испытаниях образцов по Изоду или Шарпи, не могут непосредственно использоваться при конструировании изделий из пластмасс, поскольку в этих испытаниях не определяется истинная энергия разрушения. При испытаниях образцов с надрезом оценивается только сравнительная чувствительность различных материалов к надрезу, но не их пластичность.

Испытания на скол при ударной нагрузке (по ASTM D 4508)

Этот метод испытаний первоначально был предложен для оценки эффекта образования поверхностных микротрещин как следствие влияния атмосферных явлений на ударную прочность пластмасс. Измерения пластичности, согласно этому методу, в известной степени, противоположны методике определения ударной прочности образцов с надрезом по Изоду. Результаты таких испытаний позволяют определить ориентацию, дефекты, возникшие при течении расплава в форме, прочность по линиям сварки — то есть те характеристики, которые трудно оценить, используя традиционную технику ударных испытаний [31].

Прибор для испытаний на отслаивание в чем-то подобен обычному тестеру для измерений прочности на удар по Изоду. Для проведения таких испытаний также требуется маятниковый копер и зажимное устройство. Размеры образцов при таких испытаниях обычно составляют: по длине 1 дюйм, по ширине 0,5 дюйма и по толщине 0,065 дюйма. Образцы готовят либо литьем под давлением, либо компрессионным литьем, либо вырезая их из листов.

Образец устанавливают в прибор (рис. 2.42).

Как и при обычных испытаниях, маятнику предоставляется возможность падать и нанести удар по образцу, а затем пролететь дальше. За меру пластичности принимают затраченную энергию, которую оценивают по углу подъема маятника после нанесения удара.

Схема испытаний показана на рис. 2.43. Результаты испытаний выражают в (дюйм · фунт)/дюйм² или (фут · фунт)/дюйм².

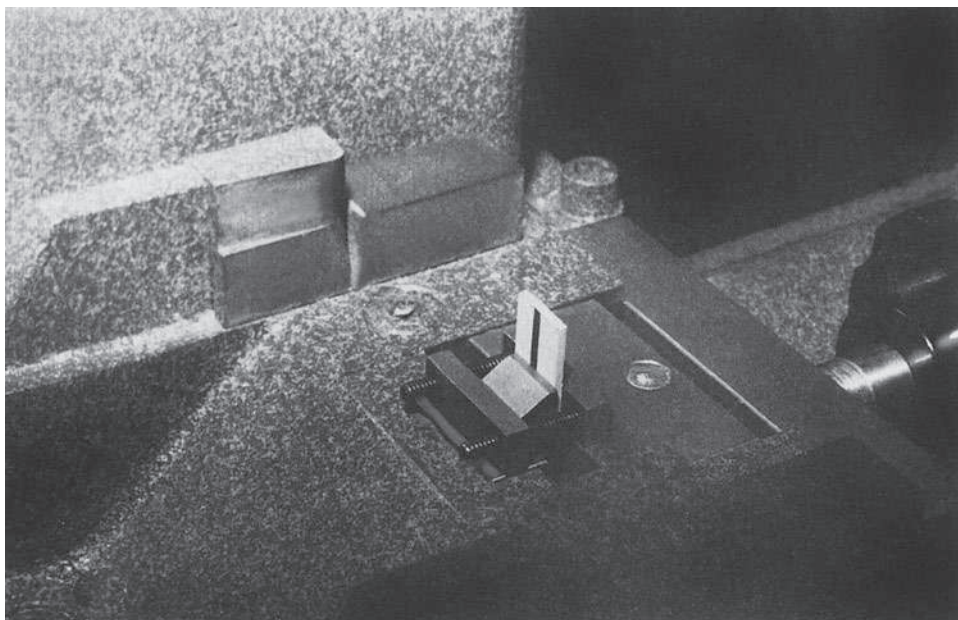


Рис. 2.42. Испытания образцов на скол при ударе

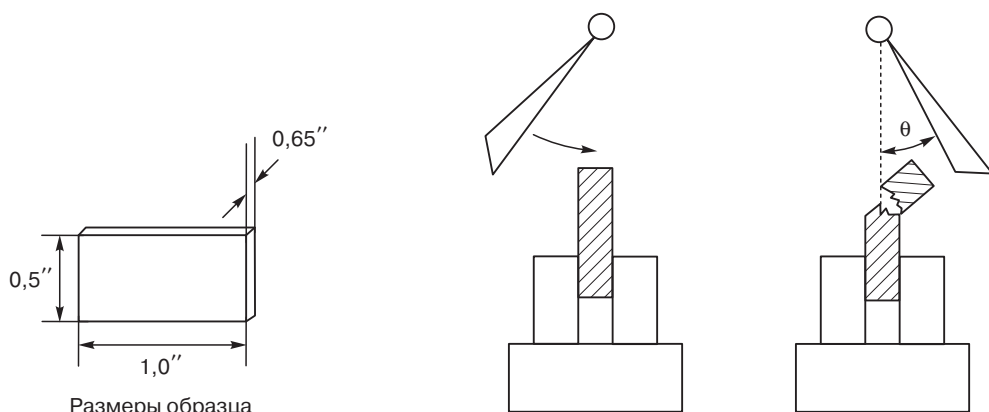


Рис. 2.43. Диаграмма, иллюстрирующая метод испытаний на скол при ударной нагрузке

Если этот метод используют исключительно для оценки погодных условий на ударную прочность материала, то удар должен наноситься по той стороне образца, которая была подвергнута внешнему воздействию.

Испытания на скол также полезны для оценки относительной пластичности крупных образцов или изделий, имеющих сложную конфигурацию, которые трудно испытывать традиционными стандартными методами. В этом случае от образца отделяется маленький кусочек, который затем подвергается испытаниям на скол.

Ударные испытания на растяжения (по ASTM D 1822)

Метод испытания на удар в условиях растяжения был разработан для того, чтобы преодолеть недостатки методов разрушения при изгибе (т. е. методов Изода и Шарпи). При этом удается исключить влияние таких факторов, как чувствительность результатов испытаний к надрезу, влияние энергии на отбрасывание оторванной части образца и его толщины. В отличие от методов Изода–Шарпи, в которых имеются ограничения по толщине образцов, при испытаниях на ударное растяжение можно испытывать очень тонкие и гибкие образцы. При этом можно оценивать роль различных структурных факторов, таких как анизотропия и ориентация материала.

На ранней стадии разработки метода испытаний на ударное растяжение было предложено использовать образцы базовых типов [32]. Однако затем этот подход был отвергнут Комитетом *D-20 ASTM* из-за того, что оставалась нерешенной проблема оценки энергии отбрасывания оторвавшейся части образца, а результаты испытаний получались плохо воспроизводимыми. В современном принятом варианте метода принято использовать образцы с головками (типа гантели). Такие образцы закрепляются в зажиме, и при их разрушении поглощается вся кинетическая энергия удара, что исключает необходимость учета энергии отбрасываемой части образца. Таким образом, за характеристику ударной прочности принимается полная энергия удара маятника, затрачиваемая на разрушение образца.

Схема установки состоит в том, что один конец образца закрепляется в зажиме маятника, а другой соединяется с подвижной траверсой. Оба конца образца

перемещаются совместно до момента нанесения удара. На маятник действует только растягивающее усилие, воспринимаемое образцом в точке удара маятника.

Если жесткость станины испытательной машины достаточна, чтобы в станине не возникли вибрации, то нетрудно определить величину отскока траверсы в направлении, противоположном удару.

Результаты, получаемые в условиях ударного разрушения при растяжении, имеют гораздо более ясный физический смысл, чем данные испытаний по Изоду и Шарпи, поскольку при растяжении можно оценить скорость деформации, важный механический параметр.

Во многих работах было показано, что данные, полученные при испытаниях на разрушение при ударном растяжении, гораздо лучше коррелируют с реальным поведением изделий и легче поддаются анализу, чем результаты испытаний по Изоду и Шарпи [33–35]. Тем не менее это все же испытания в условиях одноосного нагружения, в то время как реальные изделия подвергаются действию многоосных нагрузок.

Аппаратура и образцы

Оборудование для испытаний на ударное растяжение состоит из жесткой массивной станины и рамы. Конструкция маятника должна предусматривать установку образцов в виде гантели, причем на образец до начала испытаний не должны действовать никакие напряжения. На рис. 2.44 схематично представлена такая испытательная машина и устройства для крепления гантелеобразных образцов. На рис. 2.45 показана промышленно выпускаемая машина, предназначенная для испытаний такого рода. Образцы для эксперимента готовят методом литья под давлением, токарной обработки или вырезания из листов. Предлагается использовать образцы двух типоразмеров. Для образцов типа *S* (коротких) обычно характерны более низкие удлинения при разрыве, чем для образцов типа *L* (длинных). Образцы типа *S* более склонны к хрупкому разрушению, а результаты испытаний образцов типа *L* более

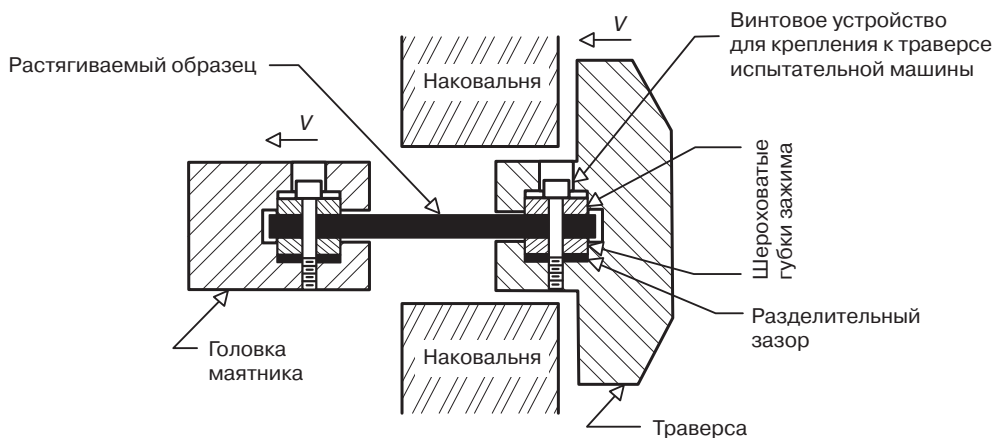


Рис. 2.44. Схематичное изображение экспериментальной установки для испытаний на ударное растяжение образцов типа гантели (воспроизведено с разрешения ASTM)

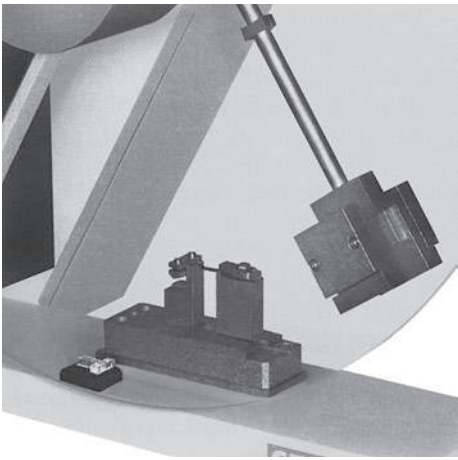


Рис. 2.45. Тестер для испытаний на ударное растяжение (с разрешения *CEAST USA, Inc.*)

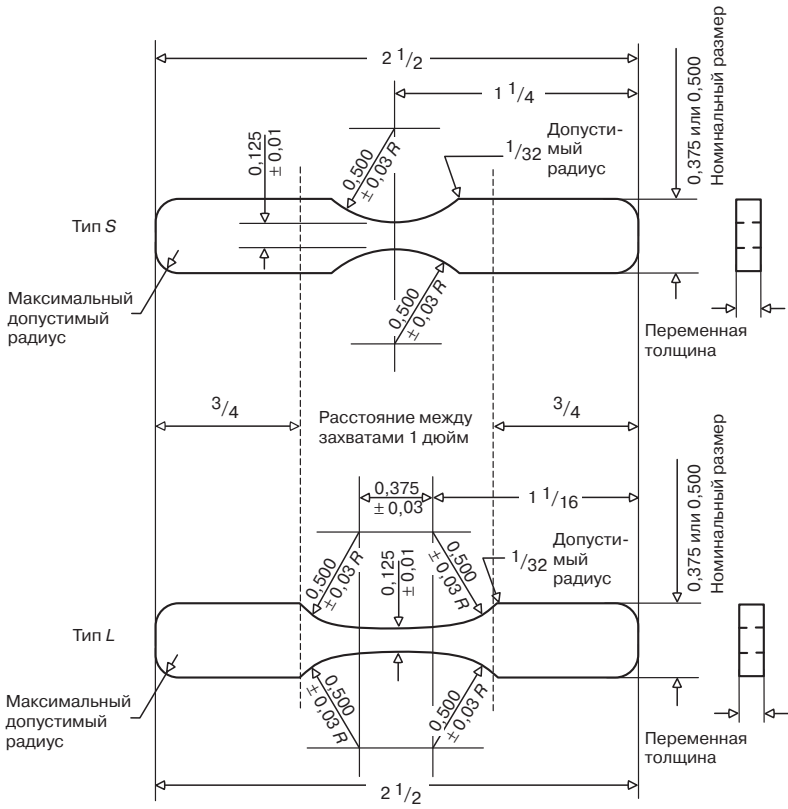


Рис. 2.46. Размеры образцов типа S и L, используемых для испытаний на ударное растяжение (воспроизведено с разрешения *ASTM*)

наглядно демонстрируют различие свойств сопоставляемых материалов. Размеры образцов обоих типов показаны на рис. 2.46.

Процедура испытаний

Толщину и ширину образцов измеряют с помощью стандартного измерительного инструмента с плоскими губками, но не рекомендуется использовать шариковый микрометр. Конец образца устанавливают в траверсе в тот момент, когда она выведена из маятникового тестера. Другой конец образца устанавливается в зажиме маятника. Затем маятник высвобождается и траверса перемещается до столкновения с наковальней. Энергия удара измеряется с помощью индикатора с нанесенной на него шкалой. Скорректированные значения энергии удара при разрушении определяются с помощью следующей формулы:

$$X = E - Y + e,$$

где X — скорректированное значение энергии разрушения (выраженное в фут · фунт); E — результаты измерений по шкале прибора (также выраженные в фут · фунт); Y — поправка на трение и сопротивление воздуха (в фут · фунт); e — поправка на отскок (в фут · фунт),

Б. Высокоскоростные испытания на растяжение

Метод высокоскоростного растяжения был предложен для того, чтобы преодолеть недостатки, свойственные ударным испытаниям, выполняемым с помощью падающего маятника. В ранних работах этот метод был реализован на универсальных испытательных машинах, которые позволяют проводить растяжение при скоростях до 20 дюймов/мин. Получаемые при этом результаты хорошо коррелировали с данными испытаний, выполнявшихся по методу падающего груза [36]. Площадь под кривой напряжение–деформация представляет собой энергию, затраченную для разрушения образца. Эта величина неплохо согласуется с величиной энергии разрушения в методе ударных испытаний, если они проводились с достаточно высокой скоростью. Соответствие между пределом прочности, разрывным удлинением и энергией разрушения при испытаниях на удар также подтверждается данными, полученными при высокоскоростном растяжении. Обычно наблюдается, что с ростом скорости растяжения предел прочности возрастает, а удлинение при разрыве уменьшается. Отсюда следует, что для того чтобы получать осмысленные результаты, испытания при высокоскоростном растяжении должны проводиться при скоростях, отвечающих свойствам конкретного полимера.

Для оценки свойств пластичных полимеров были разработаны ультра-высокоскоростные тестеры. Эти испытательные устройства, снабженные гидравлическим приводом, способны создавать скорости порядка 30 000 дюймов/мин [37]. Обычно испытания при высоких скоростях проводят, используя разнообразные образцы. Тем не менее, как при испытаниях на высокоскоростное растяжение, так и ударную прочность, наиболее часто применяют стандартные образцы. Иногда применяют образцы простой геометрической формы, которые моделируют части конкретных изделий для того, чтобы оценить поведение последних при высоких скоростях деформирования.

При высокоскоростных испытаниях можно определять различные параметры материала, такие как, например, предел текучести, энергию, отвечающую достижению точки текучести, начальный модуль упругости, предельную деформацию при разрушении образца [38]. Несмотря на то что при высокоскоростных испытаниях на растяжение можно достичь скоростей, соответствующих реальным условиям применения изделия, они не нашли широкого применения из-за того, что в испытаниях такого типа создается одноосное напряженное состояние, а на практике, как общее правило, при ударе возникают многоосные напряжения.

В. Испытания на удар с помощью падающего груза

Ударные испытания, осуществляемые с помощью падающего груза, часто используют в устройствах различного типа. Падающий груз может представлять собой чушку с коническим носиком, шарик или стрелку с шаровым наконечником. Энергия, которая затрачивается при ударе, определяется известным весом груза и известной высотой, с которой он падет на испытуемый образец. Интенсивность удара обычно выражают в фунтах · фут и рассчитывают как произведение веса на высоту падения груза.

Важнейшим преимуществом рассматриваемого метода падающего груза по сравнению с ударными испытаниями, осуществляемыми на маятнике или высокоскоростным растяжением, состоит в том, что при ударе груза по образцу возникает сложно-напряженное состояние, которое хотя бы частично воспроизводит реальные условия удара при эксплуатации изделий. Другим очевидным преимуществом является то, что испытания с помощью падающего груза можно проводить на образцах различных размеров и формы, включая реальные изделия. В отличие от испытаний по Изоду, с помощью которых оценивается чувствительность материала к надрезу, а вовсе не пластичность полимера, при испытаниях падающим грузом создается многоосное напряженное состояние и оценивается действительно пластичность испытуемого материала. Разброс результатов испытаний, обусловленный присутствием наполнителя или армирующих элементов, ориентацией макромолекул или условиями закрепления образцов в зажимах, полностью исключены при использовании метода падающего груза. Рассматриваемый метод также вполне пригоден для испытаний полимерных пленок и листов, а также ламинированных материалов.

Испытания на удар с помощью падающего груза регламентированы тремя основными стандартами *ASTM*, а именно:

1. *ASTM D 5420* Соппротивление ударным нагрузкам образцов из жестких пластмасс, определяемое по методу падающего груза.
2. *ASTM B 1709* Соппротивление ударным нагрузкам пленок, определяемое по методу падающего острого наконечника.
3. *ASTM B 2444* Соппротивление ударным нагрузкам труб и фитингов, определяемое по методу падающего груза.

Падающий груз. Этот метод первоначально был разработан для сравнительных испытаний и ранжирования жестких пластмасс по отношению энергии, затрачиваемой на разрушение образцов в различных условиях, причем удар наносился бойком, связанным с падающим грузом.

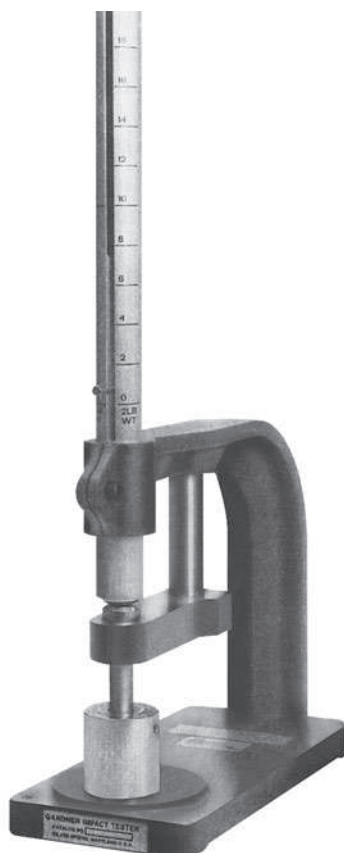


Рис. 2.47. Тестер для испытаний на удар с помощью падающего груза (с разрешения *Byk-Gardner USA*)

В настоящее время существует множество разновидностей этого метода. Однако все они основаны на одном и том же принципиальном подходе. На рис. 2.47 показан пример промышленно выпускаемого тестера для испытаний на ударную нагрузку с помощью падающего груза.

Прибор состоит из основания, изготовленного литьем из алюминиевого сплава, вертикальной направляющей трубы с прорезью, ударника со скругленным наконечником, держателя ударника, груза весом в 8 фунтов, головки и платформы для установки образца. Последняя используется для того, чтобы правильно устанавливать листовой образец заданной толщины. Головка может сниматься, что позволяет проводить испытания с образцами сложной геометрической формы.

Испытания состоят в том, что груз поднимается на заданную высоту вручную или автоматически с помощью специального механизма с механическим приводом, и затем ему предоставляется возможность свободно падать на образец. Удар осуществляется наконечником, который передает энергию падающего груза плоскому образцу, поме-

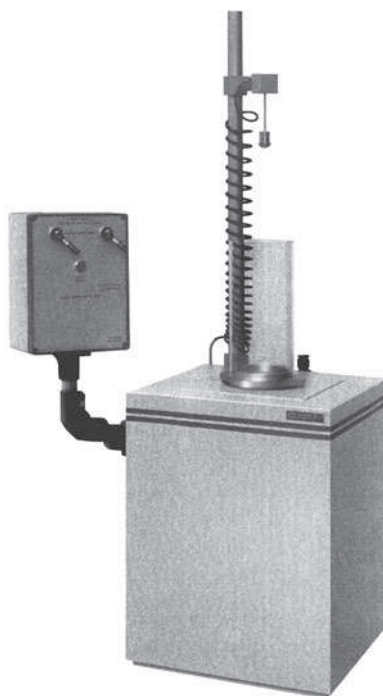


Рис. 2.48. Прибор для испытаний на удар с помощью падающей стрелки (с разрешения *CEAST USA, Inc*)

ценному на цилиндрической головке, или же детали, лежащей на платформе тестера. Кинетическая энергия в момент удара равна потенциальной энергии груза, поднятого на заданную высоту. Поскольку потенциальная энергия поднятого груза равна произведению его веса на высоту, трубка маркирована по длине, так что нанесенная на нее линейная шкала представляет значения энергии в дюймах · фунт. Таким образом, пластичность испытуемого образца или детали может быть непосредственно определена по шкале прибора и выражена в дюймах · фунт. При этом потери энергии на трение о трубку и на создание ускорения считаются пренебрежимо малыми.

В альтернативном методе испытаний для нанесения удара используют ударник в виде стрелки с острым наконечником, который также предварительно поднимается на определенную высоту. Наконечник ударника выполняется в форме полусферы с гладкой полированной поверхностью, изготавливаемой из алюминия или нержавеющей стали. Для управления положением ударника используют электромагнитный привод или же устройство иной конструкции, которое также позволяет отцентрировать положение ударника. В верхней части стрелки имеется ось, на которую устанавливаются сменяемые грузы. Образец закрепляется на платформе прибора между двумя кольцами.

Пример коммерческого тестера, используемого для таких испытаний, показан на рис. 2.48.

Для проведения испытаний на удар с помощью падающего груза предложен ряд методик. Так, согласно часто применяемому методу *Bruceton Staircase Method*, для уменьшения количества образцов, используемых в эксперименте, испытания проводят вблизи среднего значения ударной прочности. По альтернативной методике, известной под названием «пределный уровень неразрушения» (*ultimate nonfailure level, UNF*), для испытаний требуется использовать группу из 10 образцов. Для каждой такой группы образцов испытания проводят с одним весом, и затем груз равномерными ступенями повышается от группы к группе. Этот метод подробно описан в стандарте *ASTM* [39].

На рис. 2.49 показан тестер для испытаний на удар, специально предназначенный для пластмассовых труб и фитингов. В этом приборе используется гораздо более массивный груз, а ударник изготавливается с тремя различными радиусами скругления головки. Длина направляющей трубки достаточно велика, чтобы обеспечить энергию удара при падении, по крайней мере, с высоты 10 футов.

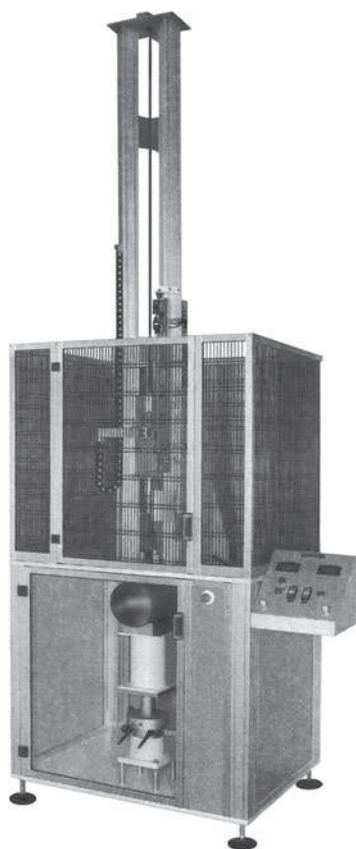


Рис. 2.49. Тестер, предназначенный для испытаний на удар пластмассовых труб и фитингов (с разрешения *CEAST USA, Inc.*)

Роль различных факторов и ограничения метода

Толщина образцов

Ударная прочность, хотя и не линейно, но возрастает с увеличением толщины образцов. По мере увеличения толщины возрастает энергия, требуемая для их разрушения [40]. Для хрупких полимеров, таких как полипропилен, этот эффект выражен слабее по сравнению с пластичными полимерами, например АБС-пластиком или ударопрочным полистиролом [41].

Проскальзывание образца

Если не были предприняты дополнительные меры по закреплению образца, то при ударе возникает проскальзывание, которое искажает получаемые результаты. Этот эффект в особенности заметен для пленок, которые склонны к проскальзыванию. Значения ударной прочности оказываются несколько завышенными для незакрепленных образцов.

Качество образцов

Качество поверхности образцов в сильной степени сказывается на результатах испытаний. Так, например, наличие надрезов на поверхности значительно изменяет получаемые значения ударной прочности [42].

Концентрация напряжений

Если испытанию подвергаются конечные изделия, то следует обращать внимание на то, чтобы удар приходился не на области концентрации напряжений, такие как резкие перегибы или колена фитинга, образующие 90-градусные углы. Если это условие не соблюдается, то получаются заведомо неверные результаты, поскольку в таком случае существенную роль начинают играть условия переработки полимера. Для получения более представительных результатов для испытаний следует выбирать области, свободные от концентрации напряжений.

Ограничения

До настоящего времени мы концентрировали внимание на многих достоинствах метода испытаний на удар падающим грузом по сравнению с традиционным методом ударных испытаний с помощью маятникового копра или высокоскоростного растяжения. Однако существуют и серьезные недостатки этого метода, о которых нельзя не сказать. Один из серьезнейших недостатков — необходимость использовать для испытаний большого количества образцов, чтобы надежно определить уровень поглощаемой энергии при разрушении материала. Поскольку заранее невозможно предсказать, сколько попыток понадобится для разрушения образца, следует обратиться к статистическому анализу. Другая проблема при таких испытаниях связана с оценкой скорости удара. Хотя груз весом в 2 фунта, падающий с высоты 6 футов, обладает той же энергией в 12 фунт · фут, что и груз весом в 6 фунтов, падающий с высоты 2 фута, получаемые результаты будут различными. Сопротивление разрушению при ударе непосредственно зависит и от силы удара. Поэтому образец, успешно выдерживающий удар при падении 6-фунтового груза с высоты 2 фута, может разрушиться, если удар 2-фунтового груза осуществляется с большей высоты. Многие промышленные тестеры не позволяют проводить испытания, варьируя скорость нанесения удара. Более того, скорости удара

при испытаниях в таких приборах зачастую оказываются много меньше, чем скорости удара в реальных условиях эксплуатации изделий [43]. Существующие приборы в основном не позволяют проводить испытания крупногабаритных изделий, таких как блоки и корпуса, изготовленные из пенопластов. Следует также иметь в виду, что результаты оценки момента разрушения при испытаниях на удар во многом весьма субъективны.

Г. Инструментальные методы контроля сопротивления удару

Один из наиболее существенных недостатков традиционных методов испытаний на удар состоит в том, что результатом таких испытаний является только одна характеристика материала — суммарная энергия разрушения — и больше ничего. Традиционные испытания не дают дополнительной информации о пластичности материала, в особенности при динамическом нагружении, пределе текучести и вообще о поведении материала в процессе разрушения.

Все это существенно ограничивает применение неинструментальных методов испытаний для контроля качества и соответствующего ранжирования материалов. Поэтому при исследовательских работах и разработке новых материалов следует использовать инструментальные методы контроля и оценки качества.

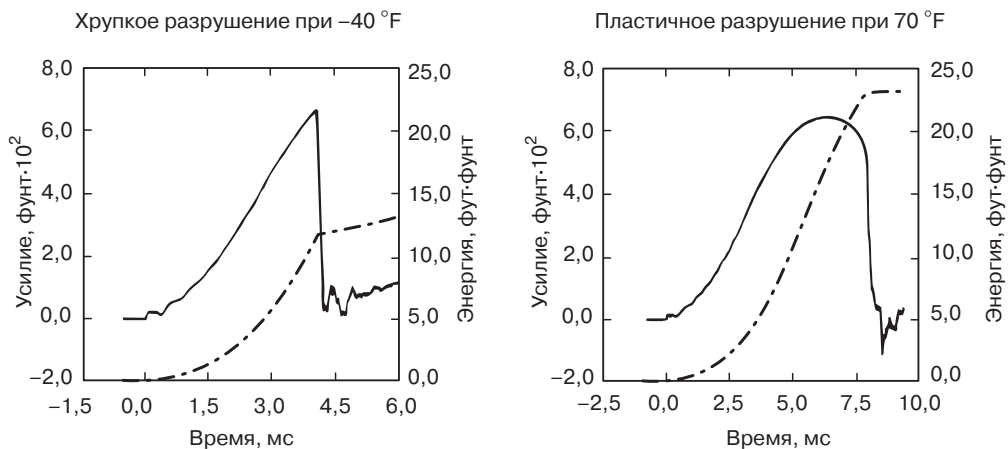
В основе инструментальных методов контроля лежит возможность непрерывного измерения усилия в ходе процесса разрушения. В результате таких испытаний появляется возможность, кроме оценки энергии разрушения, определять максимальное усилие, действующее в процессе разрушения образца. Это позволяет, в частности, определить такую важную характеристику процесса разрушения, как переход от хрупкого к пластическому механизму процесса при понижении температуры. Характер разрушения полимера весьма чувствителен к изменению температуры и особенно резко эти изменения происходят при или вблизи температуры стеклования.

Производители пластмасс, используемые в автомобильной промышленности, как правило, измеряют их свойства при низких температурах, в области от -20 до -40 °F для того, чтобы убедиться, что материал не становится хрупким в холодную погоду. Между тем измерения зависимости нагрузки от времени и нагрузки от деформации при ударных испытаниях позволяют дать более обоснованные предсказания относительно поведения материала в реальных условиях эксплуатации.

На рис. 2.50 представлен пример, иллюстрирующий температурную зависимость свойств полимера. Из формы кривой в левой части рисунка отчетливо виден переход к хрупкому разрушению при понижении температуры. Тот же самый материал при более высоких температурах разрушается по пластическому механизму [44].

В обоих случаях экспериментальные данные не усреднялись

Новые пьезоэлектрические датчики, устанавливаемые на ударниках, позволяют повысить чувствительность, что открывает возможности испытаний целых классов новых материалов. При таком способе испытаний появляются принципиальные возможности получения осмысленных результатов при испытаниях таких облегченных материалов, как пенопластовые контейнеры для хранения яиц и ультратонкие пленки, используемые в упаковочной отрасли промышленности.



Рису- нок	Темп, °F	Ско- рость, фут/с	Энергия, фут · фунт	Время при макс. нагрузке, мс	Время пол- ное, мс	Усилие макс., фунт	Энергия в макс./ полная фут · фунт
Слева	-40	10,41	44,51	4,07	4,66	672,5	11,477/12,085
Справа	70	9,14	34,26	6,39	8,48	648,3	17,135/23,309

Рис. 2.50. Зависимости усилия и энергии от времени, иллюстрирующие роль температуры

Все стандартные тестеры, используемые для ударных испытаний материалов, могут быть оборудованы инструментальными методами контроля, что позволяет исследовать процесс деформирования, получить полную характеристику развивающихся усилий и затрачиваемой энергии. Такие методы испытаний позволяют зафиксировать весь процесс разрушения, начиная с ускорения при начале движения ударника, затем момент касания образца при ударе, изгибание образца, инициирование разрушения и вплоть до завершения разрушения образца.

Инструментальное оснащение испытательного оборудования заключается в установке датчиков деформаций и усилия на ударник при применении маятника или непосредственно на биток в методе падающего груза. В процессе эксперимента с помощью волоконно-оптического устройства с передачей сигнала на осциллоскоп фиксируется ход процесса. Сигнал с датчика деформации также передается на осциллоскоп, что позволяет проследить за всем процессом развития деформации и изменения нагрузки при разрушении образца. В целом получается полная картина событий, происходящих при разрушении. Эффективная энергия, затрачиваемая в ходе процесса, рассчитывается как функция времени и также фиксируется с помощью записывающего устройства.



Рис. 2.51. Инструментальный тестер для ударных испытаний (с разрешения *Instron Corporation*)

Смещение в образце получается путем двойного дифференцирования зависимостей нагрузки и деформации от времени [45].

Развитие инструментальной техники позволяет некоторым производителям в настоящее время предложить полностью автоматизированные системы контроля, которые предоставляют результаты измерений в конечном виде, что исключает необходимость в ручной обработке получаемых экспериментальных данных. При этом получается и иная полезная информация, такая как скорость удара, усилие и смещение в точке достижения предела текучести и в момент разрушения образца, затраты энергии при достижении точки текучести и момента разрушения, значения модуля упругости.

Пример имеющегося на рынке тестера для ударных испытаний, оборудованного приспособлениями для инструментального контроля, показан на рис. 2.51.

Интерпретация данных, получаемых при испытаниях на удар

Современное испытательное оборудование, оснащенное необходимыми инструментами, позволяет в экспериментах, выполняемых при ударе, получить следующие зависимости:

- зависимость усилия от времени;
- зависимость перемещения ударника во времени (начиная с момента касания ударника с образцом);
- скорость движения ударника во времени;
- зависимость поглощаемой энергии от времени.

Графическое представление этих зависимостей (рис. 2.52) позволяет прояснить многие детали процесса разрушения при ударе.

Многие приборы также снабжены устройствами для анализа получаемых экспериментальных результатов и представления значений критических параметров в табулированной форме. Возможны различные подходы к интерпретации экспериментальных результатов в зависимости от типа исследуемого материала и принятых критериев разрушения.

Для гомогенных материалов принято оценивать четыре критических параметра:

- максимальную величину усилия;
- поглощенную энергию при максимальном усилии;
- общую поглощенную энергию разрушения при ударе;
- прогиб, отвечающий максимальному усилию.

Максимальная величина усилия (предел текучести) — это просто точка, отвечающая пику на графике усилие–время. Часто эта точка отвечает визуальному повреждению материала или его полному разрушению. Однако в некоторых случаях, например, при испытаниях материала, наполненного техническим углеродом, максимальное усилие может оказаться выше, чем пик на деформационной кривой. Однако это максимальное усилие не имеет технического значения для проектировщика, поскольку образец разрушается до его достижения.

Поглощенная энергия при максимальном усилии (в пределе текучести) — это энергия, поглощенная образцом в процессе деформирования до предела текучести. Если максимум усилия отвечает моменту разрушения образца, то эта величина энергии соответствует энергии разрушения материала.

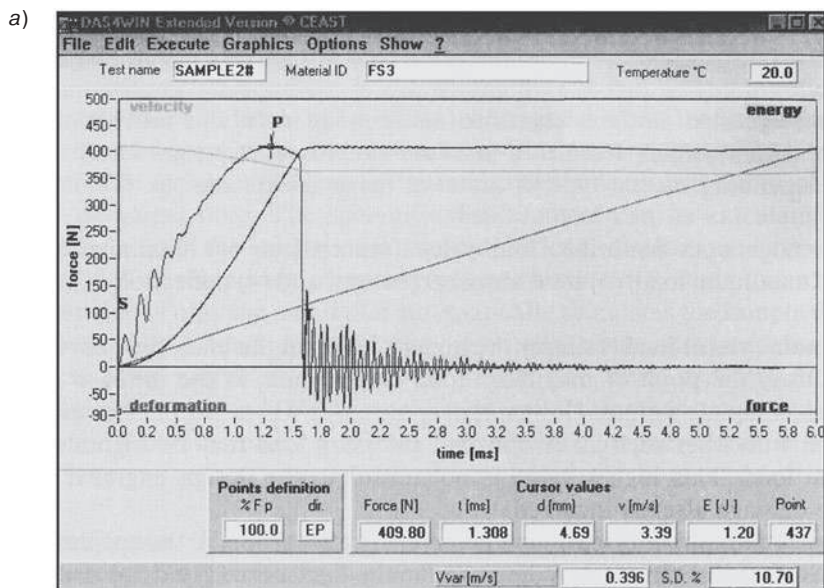
Общая поглощенная энергия разрушения при ударе — это полные затраты энергии в течение всего процесса деформирования и разрушения. Эта величина может совпадать с поглощенной энергией при максимальном усилии, если в пределе текучести происходит резко выраженное разрушение образца.

Прогиб, отвечающий максимальному усилию, — это величина пути, которое проходит ударник от момента касания до образца и до точки, отвечающей достижению предела текучести.

На рис. 2.52, б представлен пример соответствующих данных.

Д. Высокоскоростные испытания на удар (по ASTM D3763 и ИСО 6603-2)

Постоянно растущий интерес к использованию инженерных пластмасс и необходимость получения строго обоснованных и имеющих физический смысл характеристик материала, получаемых при испытаниях в условиях ударных нагрузок, побуждают промышленность к разработке новых методов высокоскоростных испытаний. Такие



б)

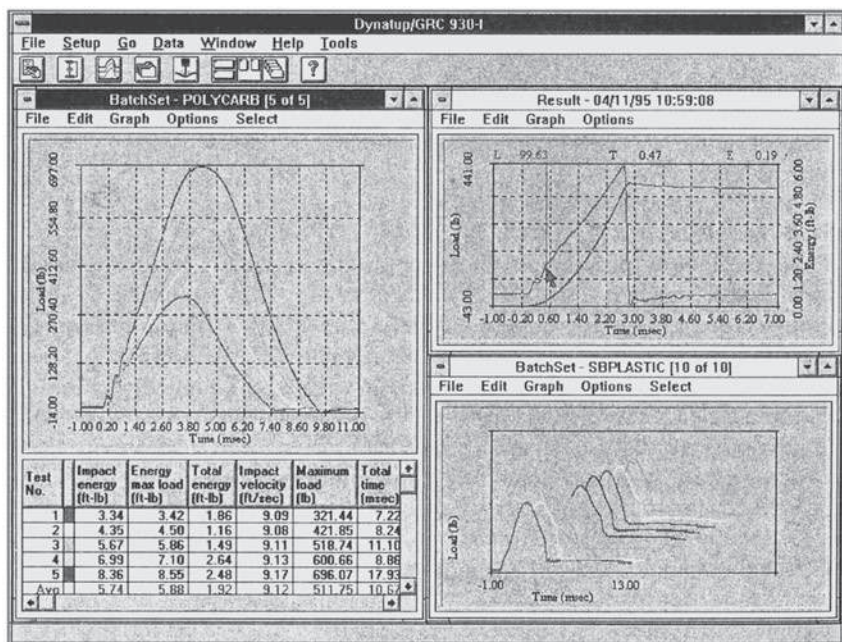


Рис. 2.52. а) Графики зависимостей усилие–энергия–время, отвечающие процессу удара; б) типичный пример представления экспериментальных данных, получаемых при инструментальном методе контроля разрушения при ударе (с разрешения *Instron Corporation*)

испытания не только обеспечивают исследователя базовой информацией, касающейся оценки пластичности полимерных материалов, но и позволяет получить деформационные кривые, а также определять энергию разрушения. При высокоскоростном деформировании существенно превышаются параметры и ограничения, присущие обычным традиционным методам испытаний, обсуждавшихся выше. Скорость деформирования в таких испытаниях может варьироваться в пределах от 30 до 57 000 дюймов/мин.

Высокоскоростные испытания приобрели особую популярность в последние годы, поскольку они позволяют моделировать реальные условия применения изделий при высокоскоростных нагрузках. Например, традиционные методы испытаний на удар бесполезны, если необходимо оценить поведение материалов, используемых в автомобильной промышленности, согласно новейшим стандартам, предусматривающим испытания в условиях краш-теста. Такие оценки должны даваться для скорости 28 миль/ч (30 000 дюймов/мин). Высокоскоростные испытания способны ответить на этот вызов промышленности.

Как обсуждалось выше, свойства большинства полимерных материалов весьма чувствительны к скорости деформации. Два материала, испытываемые по стандартным традиционным методикам, могут показывать одинаковые результаты. Но эти же два материала могут вести себя совершенно по-разному в условиях высокоскоростного нагружения.

Наиболее универсальные машины для высокоскоростных испытаний могут использоваться для испытаний всего чего угодно — от тонких пленок, для которых необходимо создание скорости порядка 30 дюймов/мин, до бамперов автомобилей, которые должны испытываться при скорости порядка 30 000 дюймов/мин.

Образцы или конечные изделия должны испытываться в условиях контролируемой окружающей среды при известных температуре и влажности.

Оборудование для высокоскоростных испытаний состоит в основном из ударника, соединенного с пружиной, сжимаемой механическим приводом, или ускорителя с пневматическим приводом; в обоих случаях используется автоматическая система для измерений деформаций. Усилие измеряется с помощью быстродействующего кварцевого датчика, устанавливаемого непосредственно на ускорителе. Как уже говорилось, скорость может изменяться от 30 до 30 000 дюймов/мин. Для крепления образцов используются зажимы различных типов. Испытательное оборудование может помещаться в климатическую камеру, если требуется выполнение каких-либо специализированных испытаний. Испытательное оборудование соединено с двухкоординатным самописцем, который в автоматическом режиме фиксирует зависимость нагрузки от перемещения. Встроенный микропроцессор также дает более полную и полезную информацию относительно значений модуля, предела текучести и энергии разрушения.

Как было показано, высокоскоростные испытания дают очень полезную информацию для характеристики полимерных материалов. При низких скоростях деформации многие полимеры разрушаются по пластическому механизму. При высоких скоростях те же полимеры разрушаются хрупко. При этом особый интерес представляет точка, в которой происходит переход от пластического к хрупкому разрушению.

Высокоскоростные испытания могут предоставить такую информацию в графической форме. Испытания также могут проводиться при различных температурах, что позволяет определить температурную зависимость точки перехода от пластического к хрупкому разрушению [46]. Другая полезная информация, получаемая при высокоскоростных испытаниях, позволяет осуществлять технологический контроль процесса, оценивать дизайн изделия и работоспособность конструкции.

Е. Остальные методы ударных испытаний

В зависимости от требований, предъявляемых к конечному изделию, был предложен ряд методик испытаний на удар, которые были призваны имитировать реальные условия эксплуатации материала. Так, в *Underwriters Laboratories* была создана специальная камера, в которой электронные изделия испытывались на удар шаром с энергией 5 футов · фунт по наиболее уязвимым местам аппаратуры, чтобы проверить, насколько такие удары влияют на работу электроники. Небольшие блоки должны были выдерживать удар о плиту с расстояния 3 фута, причем во время испытаний эти блоки были присоединены к электрической сети [47].

Методика испытания на падение контейнеров, изготовленных из термопластов методом выдувного формования, описана в стандарте *ASTM D2463*. Такие контейнеры наполняют водой и бросают на плоскую поверхность. Предлагаемая на рынке установка для испытания контейнеров путем их падения с определенной высоты показана на рис. 2.53.



Рис. 2.53. Установка для испытания контейнеров методом падения на твердую поверхность

Еще одна методика испытания на удар, называемая тестером с воздушной пушкой (метод *air cannon impact test, ACIT*), используется для оценки жесткости наружных деталей в строительных конструкциях. Испытательное оборудование состоит из воздушного ружья, которое выстреливает пластмассовыми шариками по испытуемому образцу. Сменный цилиндр позволяет варьировать размер и вес шариков, а скорость контролируется изменением давления воздуха. Обычно шарики изготавливают из полиэтилена и полипропилена, а изменение и размера и веса моделирует удары камешков различных размеров. Исходя из размера, веса и скорости движения таких шариков, можно оценить величину силы, с которой они ударяют по поверхности. Этот метод испытаний дает более реалистичные оценки поведения материала в условиях воздействия окружающей среды, нежели результаты традиционных испытаний, и дает важную информацию, позволяющую выбрать материал и оценить качество изделия [48].

Для того чтобы оценить стойкость различных панелей к ударным нагрузкам используется методика удара с ограниченной энергией, или метод отскока. Соответствующие методики используют такие фирмы, как *Boeing*, *NASA* и *McDonnell Douglas*. Для реализации этих методик создано специальное оборудование, с помощью которого можно бросать грузы заданного веса с определенной высоты на изделие. Падающий груз отскакивает от панели и попадает в специальный мешок. Наступление момента разрушения легко обнаруживается по тому, каким образом груз отбрасывается от панели. Испытания такого рода часто используют в сочетании с исследованиями поведения материала при сжатии или растяжении, проводимыми после удара. Этим самым определяется степень повреждения изделия в результате действия ударной нагрузки.

2.8. Прочность на сдвиг (по *ASTM D732*)

Прочность на сдвиг определяется как максимальная нагрузка, которую может выдержать полимерный материал при приложении сдвиговых усилий, до того момента, когда сдвигаемая часть образца полностью не сместится, образуя чистую поверхность. Испытания на прочность на сдвиг проводят, прилагая усилие к стандартному пуансону, перемещаемому с заданной скоростью. Они продолжаются до тех пор, пока две части образца полностью не отделяться друг от друга. Прочность на сдвиг определяют путем деления сдвигового усилия, приводящего к разрушению образца, на площадь, по которой происходит сдвиг. Она выражается в фунтах/дюйм².

2.8.1. Образцы и аппаратура

Образцы, подвергаемые испытаниям на сдвиг, должны быть получены либо литьем под давлением, либо вырезаны из листа. Они представляют собой диски диаметром 2 дюйма, либо пластины площадью 2 дюйма². Толщина образца может варьироваться от 0,050 до 0,500 дюйма. В центре образца высверливается отверстие диаметром 7/16 дюйма. Для проведения экспериментов используют универсальную испытательную

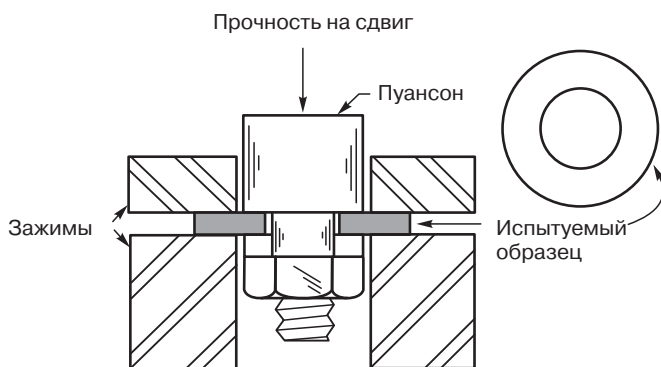


Рис. 2.54. Схема установки для испытаний на сдвиг (воспроизведено с разрешения *Van Nostrand Reinhold Company*)

машину с постоянной скоростью движения траверсы, такую же, которая применяется для испытаний на растяжение, сжатие или изгиб. Требования к испытательному оборудованию подробно описаны в разделе, посвященном испытаниям на растяжение. Для проведения испытаний на сдвиг применяют специально сконструированный пуансон. Схематичный пример оборудования с закрепленным образцом для испытаний на сдвиг показан на рис. 2.54.

2.8.2. Процедура испытаний

Испытания состоят в том, что правильно установленный образец фиксируется зажимами и начинается движение пуансона, которое продолжается до тех пор, пока не произойдет разрушение образца по поверхности, в которой действуют сдвиговые напряжения. Прочность при сдвиге рассчитывается по формуле

$$\text{Прочность при сдвиге} = \frac{\text{Усилие в момент разрушения образца}}{\text{Площадь, по которой происходит сдвиг}}.$$

(Площадь, по которой происходит сдвиг, определяется как произведение длины окружности пуансона на толщину образца.)

2.8.3. Значение испытаний и ограничения

Значения прочности на сдвиг имеют огромное значение для конструктора изделий из пленок и листов, которые в процессе эксплуатации подвергаются сдвиговым нагрузкам. В большинстве случаев массивные литые детали и изделия, получаемые экструзией, не подвергаются сдвиговым усилиям.

Данные по прочности на сдвиг, которые приводятся поставщиками полимерных материалов, следует использовать при конструировании изделий с исключительной осторожностью, поскольку приводимые справочные значения прочности на изгиб зачастую оказываются гораздо большими реальных значений. Стандартный метод

позволяет поставщикам проводить испытания с очень тонкими образцами, которые могут заметно растягиваться, что предотвращает разрушение действительно в условиях сдвига и дает завышенные значения прочности.

При конструировании изделий обычно принимают, что прочность на сдвиг равна одной второй прочности, измеренной при растяжении.

2.9. Износ

2.9.1. Введение

Соппротивление полимерных материалов износу представляет собой комплексное явление. Предлагалось большое количество различных теорий, в которых износ связывался с силами трения, нагрузкой, действительной поверхностью контакта. Увеличение каждого из этих трех факторов, как общее правило, способствует возрастанию износа. На характеристики износа оказывает большое влияние твердость полимера. Так, например, если поверхность материала твердая и шероховатая, то выступы на поверхности несомненно внедряются в поверхность более мягкого контртела, приводя к формированию канавок и царапин.

Дальнейшее усложнение теории износа связано с представлением о том, что в процессе трения имеет место окисление поверхности из-за того, что на ней развиваются локальные высокие температуры [49, 50]. Интенсивность износа также зависит от иных факторов, таких как природа полимерного материала, его податливость, наличие наполнителя или иных добавок.

Все это чрезвычайно затрудняет определение сопротивления износу как физической характеристики материала, равно как и адекватное измерение этой характеристики. Соппротивление износу — это свойство, которое проявляется при трении, процарапывании или эрозии, и состоит в том, насколько интенсивно часть материала удаляется с поверхности.

Соппротивление износу в сильной степени зависит от таких факторов, как условия испытаний, тип трущегося о поверхность тела, развитие тепловыделений при трении и теплоотвод. Для испытаний на износ предлагалось самое разнообразное оборудование. Тем не менее корреляция между результатами испытаний, выполняемых на различном оборудовании, равно как и соответствие экспериментальных результатов поведению материала при износе при реальных условиях эксплуатации изделия остаются очень плохими. Испытания позволяют установить лишь некий ряд материалов по их сопротивлению износу в строго определенных условиях эксперимента.

2.9.2. Испытания на износ

Соппротивление износу, как правило, характеризуют скоростью потери массы материала при воздействии на него абразивом. В промышленности принято использовать определенный набор абразивов, который называют абразивами Тейбора. При этом может использоваться ряд вращающихся кругов с нанесенными на них абразивами. Серия калиброванных устройств, называемых *CS-17*, при приложении нагрузки в 1000 г, пригодна для испытаний практически любых пластмасс. Для более мягких

материалов рекомендуется использовать менее жесткие абразивные круги и меньшие нагрузки.

Образец для испытаний на износ обычно представляет собой диск диаметром 4 дюйма или пластину размером 4 дюйма² с плоскопараллельными поверхностями. В центре образца высверливается отверстие диаметром 0,5 дюйма. Образцы перед испытаниями выдерживаются в стандартных условиях окружающей среды. Для проведения испытаний образец закрепляется на вращающемся столике. Далее используется подходящий абразивный круг и выбранная величина нагрузки. Столик начинает вращаться, и автоматический счетчик фиксирует число оборотов. Обычно испытания проводят при не менее 5000 оборотов. Затем образец взвешивается с точностью не меньшей 1 мг. За характеристику износа принимается величина потери массы в мг, отнесенная к 1000 оборотам. В качестве результатов испытаний на износ всегда представляют эту величину, указывая при этом тип абразивного круга и величину нагрузки.

Методы испытаний на износ описаны, например, в стандарте *ASTM D1044* («Сопротивления прозрачных пластмасс износу»), в котором износ также характеризуют изменением оптических характеристик прозрачных пластмасс. Процесс испытаний вполне аналогичен описанному выше, за исключением того, что обычно ограничиваются 500 оборотами и нагрузкой в 500 г. После эксперимента на износ для оценки оптических характеристик образца используют фотоэлектрический фотометр, измеряющий рассеяние света. В качестве результата испытаний используется доля (в процентах) света, проходящего через образец.



Рис. 2.55. Тестер для испытаний на износ (с разрешения *Taber Instruments*)

Метод испытания на износ также описан в стандарте ИСО 9352.

Еще один метод испытаний сопротивления износу основан на измерении объемной потери плоским образцом, который подвергается воздействию при трении по нему сетки или шкурки с абразивом или бумаги. Этот метод описан в стандарте *ASTM D1242*.

Имеющийся в продаже тестер для испытаний на износ показан на рис. 2.55.

2.10. Усталостные испытания

2.10.1. Введение

Поведение материала, подвергаемого циклическому воздействию изгиба, растяжения, сжатия или кручения обычно описывают термином «усталость». При таком циклическом нагружении обычно имеет место механическая повреждаемость и постепенная потеря прочности, которая, в конечном счете, приводит к разрушению образца. Продолжительность жизни при испытаниях на усталость обычно оценивают количеством циклов нагружения, которое может выдержать образец при выбранных характеристиках осциллирующей нагрузки [51].

Разрешение в таких испытаниях происходит при деформациях и напряжениях, заведомо много меньших, чем прочность, измеренная при статическом нагружении. Данные по усталостной прочности обычно приводят в виде количества циклов, при которых разрушается образец, относящихся к выбранному для конкретного эксперимента максимальному уровню напряжения. Кривая усталости представляется в виде зависимости этого максимального напряжения S от числа циклов до разрушения N . Она получается при испытаниях большого количества образцов при циклической нагрузке, причем каждая серия испытаний отвечает своему уровню напряжений. Чем выше напряжение, тем меньшее число циклов нагружения может выдержать образец. При низких уровнях напряжения материал может выдержать неограниченно большое число циклов деформирования, так что предельное значение числа циклов установить нельзя. Этот нижний предел по напряжению, при котором материал не разрушается при любом количестве циклов нагружения, называют пределом выносливости.

Как хорошо видно из рис. 2.56, зависимость S от N стремится к некоторому асимптотическому пределу — горизонтальной линии, отвечающей постоянному напряжению. Для большинства полимеров предел выносливости составляет от 25 до 30% от предела прочности, определяемого при статических испытаниях [52]. Данные по пределу выносливости имеют первостепенное значение при проектировании таких изделий из пластмасс, как зубчатые колеса, колена труб, шарниры, детали, подвергаемые вибрации, и сосуды, работающие в условиях переменных давлений.

На практике для испытаний на усталость используют три основных вида испытаний:

- на усталость при изгибе;
- на усталость при растяжении/сжатии;
- по методу вращающейся балки.

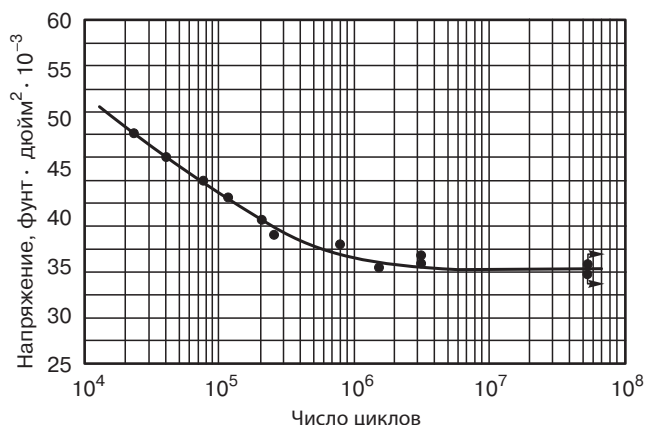


Рис. 2.56. Типичная диаграмма долговечности

2.10.2. Испытания на усталость при изгибе (по ASTM D671)

Способность материала сопротивляться повреждениям при циклическом нагружении в испытаниях этого типа оценивается с использованием образца консольного типа, который подвергается периодическому воздействию усилия с постоянной амплитудой. Основной особенностью конструкции испытательной машины является использование несбалансированного движения эксцентрика. Степень эксцентриситета может изменяться. Эксцентрик устанавливается на валу, который вращается с постоянной скоростью. Это несбалансированное движение эксцентрика создает переменную нагрузку на образец, который закрепляется на конце консольного вала. С другим концом образца связывается постоянно действующая локальная нагрузка,

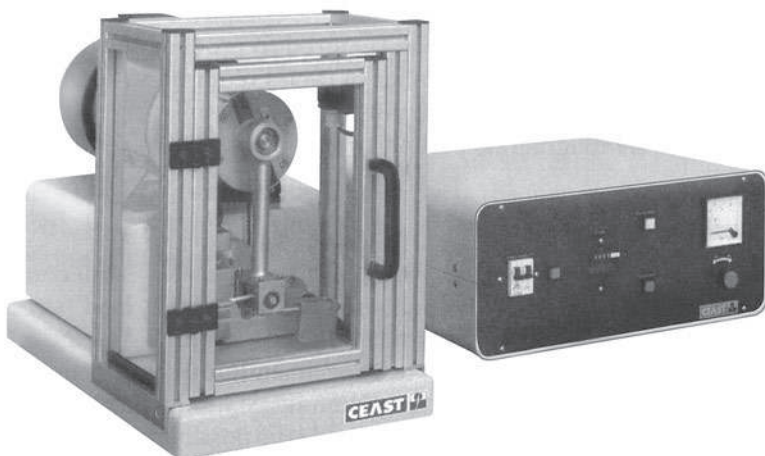
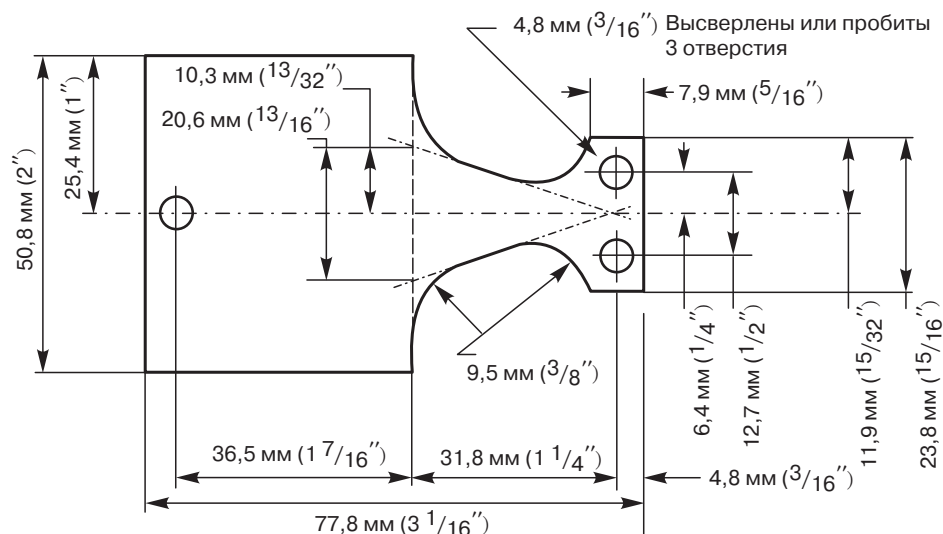


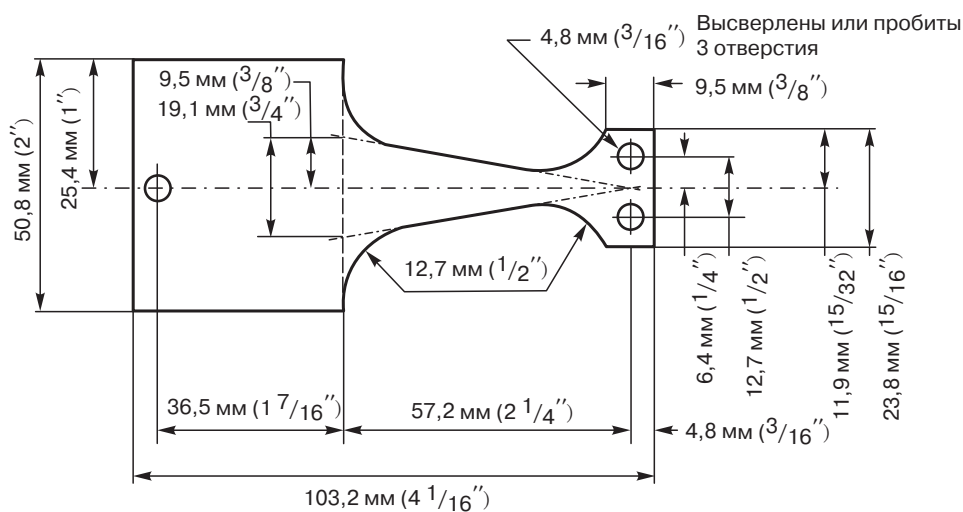
Рис. 2.57. Тестер для испытаний на усталость при изгибе (с разрешения CEAST USA, Inc.)

передаваемая через коромысло. Число оборотов измеряется автоматическим счетчиком циклов, который выключается в момент разрушения образца.

Типичный промышленно выпускаемый тестер для испытания на усталость показан на рис. 2.57. Для испытаний используют образцы двух различных размеров и геометрических форм (рис. 2.58). Если используются образцы, полученные машин-



Тип А



Тип Б

Рис. 2.58. Образцы, используемые для испытаний на усталость при изгибе при действии напряжения с постоянной амплитудой (воспроизведено с разрешения ASTM)

ной обработкой, то следует обращать внимание на отсутствие царапин и отметин. Образцы, полученные литьем под давлением, должны быть свободны от остаточных напряжений.

Перед началом испытаний следует определить величину дополнительного груза, навешиваемого на образец. Отсюда находится напряжение, которое действует в процессе испытаний. Эксперимент состоит в нахождении количества циклов деформирования, вызывающих разрушение образца. Как конечный результат испытаний строится зависимость количества циклов до разрушения от напряжения (S – N -диаграмма).

2.10.3. Испытания на усталость при растяжении

В отличие от испытаний на усталость при изгибе, в которых опыты проводятся в условиях постоянных прогибов (деформаций) при растяжении, измерения проводятся при действии постоянной силы (напряжения). Обычно используемая для этих целей испытательная машина показана на рис. 2.59. В этой машине циклическая нагрузка с постоянной амплитудой силы прикладывается к одному концу образца через

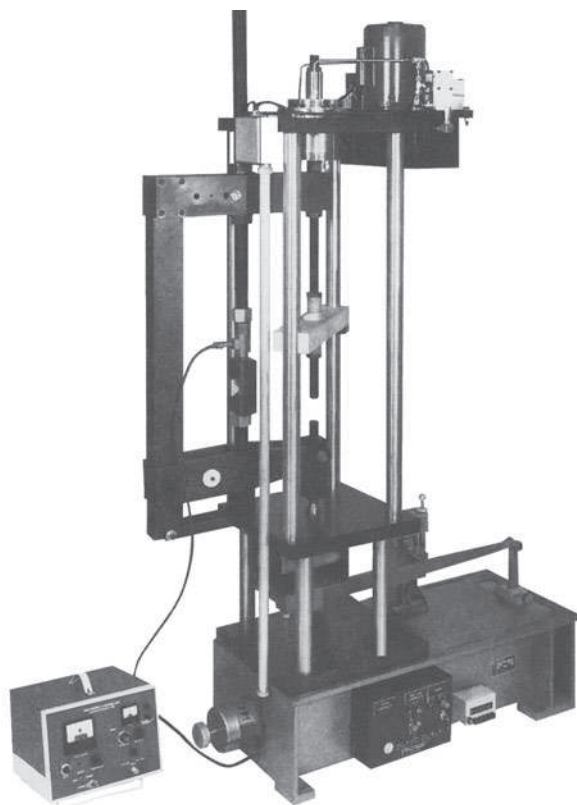


Рис. 2.59. Машина для испытаний на усталость при растяжении (с разрешения *Fatigue Dynamics, Inc.*)

калиброванный изгибаемый рычаг, приводимый в движение через регулируемый кривошипный механизм. Статическая и динамическая нагрузка прикладывается к другому концу образца, что делает возможным поддержание постоянной нагрузки вне зависимости от изменений нагрузки, обусловленных деформацией образца в процессе испытаний.

2.10.4. Испытания по методу вращающейся балки

Испытания по методу вращающейся балки, вообще говоря, не используют в промышленности пластмасс из-за явления гистерезиса. Если же такие испытания проводятся, то они выполняются при очень низкой скорости для того, чтобы избежать раннего разрушения, обусловленного разогревом образца.

Сущность испытаний состоит в том, что оба конца образца, имеющего форму гантели, устанавливают в испытательной машине. Образец вращается между двумя валами, что вызывает появление растягивающих и сжимающих напряжений. Испытания проводят до тех пор, пока образец не разрушится, причем количество циклов, которое выдерживает образец, зависит от уровня нагрузки.

2.10.5. Факторы, влияющие на результаты испытаний и ограничения метода

1. Данные, получаемые при испытаниях на усталостное разрушение, могут быть непосредственно использованы при конструировании изделий из пластмасс только тогда, когда все параметры (размер и форма изделия, методика приготовления образцов, способ нагружения, температура окружающей среды и самого образца, частота воздействия и уровень напряжений) при испытаниях поддерживаются такими же, как и при реальном использовании изделия. В действительности такое совпадение никогда не имеет места и поэтому важно проводить испытания конечных изделий в условиях, как можно ближе моделирующих практику применения изделия. Другая причина, затрудняющая непосредственное использование результатов усталостных испытаний, состоит в возможности наличия в серийных изделиях надрезов или царапин, пор, которые приводят к концентрации напряжений и, как следствие, к значительному снижению усталостной прочности.
2. Корреляция между результатами испытаний, выполненных по различным методикам, очень плохая. В значительной мере это связано с различиями приготовления образцов.
3. Толщина образцов очень сильно влияет на результаты усталостных испытаний.
4. Результаты испытаний на усталостное разрушения сильно зависят от температуры, частоты приложения нагрузки и интенсивности теплоотвода.
5. Время жизни при усталостных испытаниях снижается с повышением температуры [53], хотя это суждение не всегда справедливо для эластопластичных материалов.

6. Испытания в условиях постоянного прогиба (при постоянной деформации) имеют свои недостатки, поскольку при образовании и развитии большой трещины уровень напряжения еще до достижения предела усталости резко снижается, что затрудняет достоверную оценку момента разрушения. Однако испытания такого типа позволяют следить за развитием трещины, поскольку разрушение образца происходит сравнительно медленно. В опытах, в которых поддерживается постоянный уровень напряжений, при образовании и развитии трещины, напротив, амплитуда деформации возрастает и разрушение происходит очень быстро [54].

2.11. Испытания на твердость

2.11.1. Введение

Под твердостью понимают сопротивление материала деформированию, в особенности под действием индентора или при процарапывании поверхности. Твердость — это некая относительная характеристика, которую не следует смешивать с сопротивлением износу. Так, например, полистирол обладает высокой твердостью по Роквеллу, но плохо противостоит износу. Испытания на твердость позволяют дифференцировать материалы и устанавливать определенную градацию пластмасс. Тем не менее было бы некорректно сравнивать твердость различных материалов исходя только из результатов испытаний одного типа, поскольку одновременно с измерениями твердости имеют место упругие деформации. Кроме того, на результаты измерений твердости влияет ползучесть. Существует большое количество методов, предназначенных для испытаний на твердость. Поскольку полимерные материалы различаются по их твердости в широких пределах, один тип испытаний не перекрывает все возможные случаи. Наиболее широко распространены два метода испытаний — твердость по Роквеллу и твердость по Дюрометру.

Метод Роквелла используют для относительно твердых материалов, таких как полиацетали, нейлоны, полиакрилаты и полистирол. Для исследования более мягких материалов, таких как пластифицированный ПВХ, термопластичные эластомеры и полиэтилены измеряют твердость по Дюрометру.

Сравнительные значения твердости для ряда обычных пластмасс приведены в табл. 2.3. Сопоставление различных шкал для измерений твердости дается в Приложении I.

2.11.2. Твердость по Роквеллу (по ASTM D785)

Твердость по Роквеллу определяют по полной глубине отпечатка, оставленного индентором, после того как нагрузка возростала от минимального до максимального значения и затем возвращалась к минимальному уровню. Значения твердости обозначаются просто цифрами без какой-либо размерности. Значения твердости по Роквеллу всегда относятся к определенным шкалам, которые различаются по геометрическим размерам индентора и величине нагрузки. Обозначения шкал в порядке

Таблица 2.3. Типичные значения твердости для ряда традиционных полимерных материалов

Полимерный материал	Твердость		
	Роквелл		Дюрометр
	Шкала <i>M</i>	Шкала <i>R</i>	По Шору, шкала <i>D</i>
АБС-пластик		75–115	
Полиацетали	94	120	
Полиакрилаты	85–105		
Целлюлозы		30–125	
Полифениленоксид	80	120	
Найлон		108–120	
Поликарбонат	72	118	
ПЭ высокой плотности			60–70
ПЭ низкой плотности			40–50
Полипропилен			75–85
Полистирол	68–70		
Жесткий ПВХ		115	
Полисульфон	70	120	

возрастания твердости таковы: *R*, *L*, *M*, *E* и *K*. Чем больше показатель в выбранной шкале, тем выше твердость материала. Шкалы несколько перекрывают друг друга, так что вполне возможно получить два показателя твердости одного и того же материала в разных шкалах. Для данного конкретного типа материала возможно установление корреляции между показателями твердости в разных шкалах. Однако из-за различий в упругости, ползучести и сопротивления сдвигу установление общей корреляции между показателями твердости, полученными в разных шкалах, для различных материалов невозможно.

А. Аппаратура и образцы

Измерения твердости по Роквеллу проводят с помощью специальных тестеров, называемых приборами для измерения твердости по Роквеллу (рис. 2.60).

Толщина стандартных образцов для измерений твердости должна быть не менее 0,25 дюйма. Образец должен быть получен либо литьем под давлением, либо вырезан из листовой заготовки. На образце не должно быть никаких отметок, выступов или иных неровностей. Образец должен иметь плоскопараллельные поверхности.

Б. Процедура испытаний

Образец помещается на столик прибора, и к нему через стальной шарик прикладывается минимальная нагрузка. При этом шарик слегка внедряется в образец, что обеспечивает надежный контакт. При такой минимальной нагрузке показатель шкалы устанавливается на нуль, затем отпускается держатель, и в течение 10 с прикладывается максимальная нагрузка. Эта нагрузка действует в течение 15 с, после чего она снимается, и образцу предоставляется возможность упруго восстанавливать свои размеры в течение 15 с. В итоге показатель твердости считывается непосредственно со шкалы прибора в условиях действия минимальной нагрузки. На рис. 2.61 схематично показан принцип измерений твердости по Роквеллу.

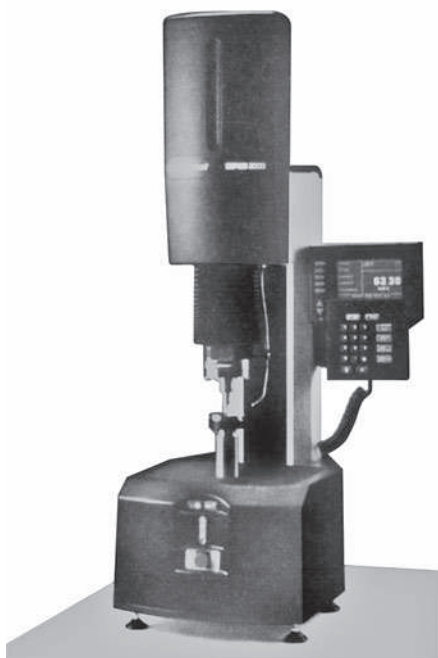


Рис. 2.60. Прибор для измерений твердости по Роквеллу (с разрешения *Instron Corporation*)

2.11.3. Твердость по дюрометру (по ASTM D2240 и ИСО 868)

Метод измерения твердости по Дюрометру используют для сравнительной оценки твердости сравнительно мягких материалов. Этот метод основан на внедрении в материал индентора определенных размеров в строго оговоренных условиях. Дюрометр состоит из нагрузочного столика, индентора и измерительной головки. Индентор приводится в действие взведенной пружины. Испытуемый образец должен иметь толщину, по крайней мере, не меньше 0,25 дюйма. Он может быть изготовлен литьем или вырезан из листовой заготовки. Для испытаний можно использовать несколько образцов, уложенных в стопку толщиной 0,25 дюйма, но единый образец все же предпочтительнее. Плохой контакт между тонкими образцами может привести к значительному разбросу получаемых результатов.

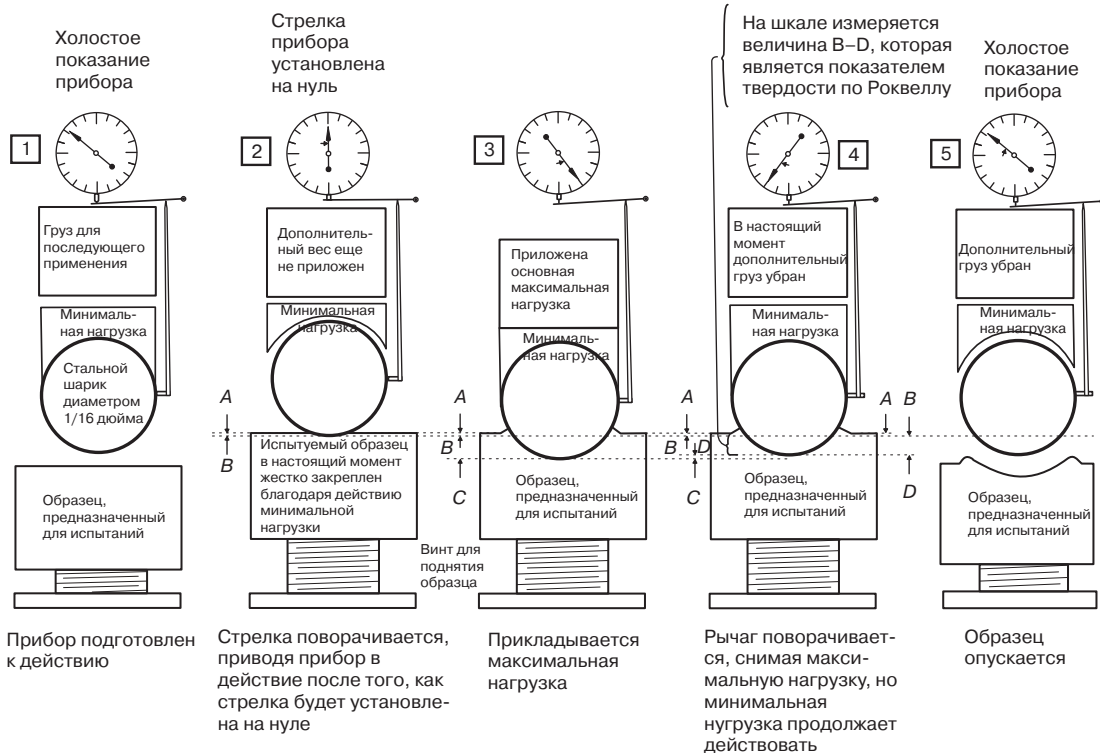
Испытания состоят в том, что образец помещают на гладкую твердую подложку. Затем основание нагрузочного устройства прижимается к образцу так, чтобы верхняя и нижняя поверхности образца были параллельны друг другу. Показания измерительной головки считываются через 1 с после приложения нагрузки.

Используют дюрометры двух типов — *A* и *D*. Основное различие между ними состоит в форме и размерах индентора. Значения твердости — это просто показания шкалы прибора без какой-либо размерности. Дюрометры типа *A* используют для оценки твердости относительно мягких материалов, а типа *D* — для более твердых

Имейте в виду тот важный фактор, что при измерениях глубины внедрения индентора поверхность образца не является нулевой точкой отсчета, что в значительной степени позволяет исключить качество поверхности как фактор, определяющий результаты измерений

Отсчет В–С на шкале прибора включает постоянную величину, обусловленную действием пружины при приложении максимальной нагрузки, но соответствующая величина устраняется при снятии максимальной нагрузки

Шкала прибора обратима, так что возможны как небольшие, так и большие показатели твердости. При этом большие цифры получают для твердых материалов



ПОЯСНЕНИЕ. Здесь показан полный цикл работы тестера для измерения показателя твердости по Роквеллу. Для того чтобы был более ясным принцип и последовательность действия прибора, размеры шарика (с реальным диаметром 1/16 дюйма) показаны не в правильном масштабе

AB – глубина внедрения под действием минимальной нагрузки
 AC – глубина внедрения под действием максимальной нагрузки
 DC – упругое восстановление металлической основы при снятии максимальной нагрузки; эта величина характеризует упругость металла в процессе испытаний, но не входит в расчет твердости испытуемого образца
 BD – разность между глубинами внедрения при приложении максимальной и минимальной нагрузки = показателю твердости по Роквеллу

Рис. 2.61. Принцип работы прибора для измерений твердости по Роквеллу (с разрешения *Instron Corporation*)



Рис. 2.62. Тестер для измерения твердости по Барколю (с разрешения *Instron Corporation*)



Рис. 2.63. Дюрометр для измерения твердости (с разрешения *Qualitest, USA*)

материалов. Пример промышленно выпускаемого дюрометра для измерения твердости показан на рис. 2.62.

2.11.4. Твердость по Барколю (по ASTM D 2583)

Метод измерения твердости по Барколю используют как для чистых, так и для армированных жестких пластмасс. Тестер представляет собой портативный прибор, который легко переносится и может применяться как в заводских условиях для оценки готовых изделий, так и для испытаний лабораторных образцов.

Прибор для измерения твердости по Барколю состоит из индентора, который снабжен заостренным коническим наконечником и индикатором со шкалой со 100 делениями. Каждому делению отвечает глубина проникновения в 0,0003 дюйма. Для испытаний берутся образцы с минимальной толщиной 0,0625 дюйма.

Испытания состоят в том, что к образцу подводится индентор и создается равномерная нагрузка. Нагрузка действует до тех пор, пока показания прибора не достигнут максимального значения. Глубина внедрения автоматически пересчитывается в показатели твердости по Барколю. При испытаниях армированных пластмасс следует учитывать различие в твердости связующего и наполнителя.

Как общее правило, для испытаний армированных пластиков рекомендуется использовать образцы больших размеров по сравнению с неармированными материалами. Промышленно выпускаемый тестер для испытаний на твердость по Барколю показан на рис. 2.63.

Г. Анизотропия

Измеряемая твердость пластмасс с анизотропными характеристиками может оказаться различной в зависимости от направления, в котором проводятся измерения.

Литература

1. Kinney G.F., *Engineering Properties and Application*, John Wiley & Sons, New York, 1957, p. 182–184.
2. *Ibid.*, 187 p.
3. Rodriguez F., *Principles of Polymer Systems*, McGraw-Hill, New York, 1970, Chapter 8.
4. Baer E., *Engineering Design for Plastics*, Reinhold, New York, 1964, Chapter 4.
5. Williams J.G., *Stress Analysis of Polymers*, Longman Group Limited, London, 1973, Chapter 3.
6. Rodriguez, Reference 3, p. 229–230.
7. Billmeyer F.W., *Textbook of Polymer Science*, Interscience, New York, 1962, p. 09–111.
8. Baer, Reference 4, 187 p.
9. Milby R., *Plastics Technology*, McGraw-Hill, New York, 1973, p. 490–491.
10. Billmeyer, Reference 7, 193 p.

11. Baer, Reference 4, 309 p.
12. Lubin G., *Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites*, Reinhold, New York, 1969, 171 p.
13. LNP Corporation, *Tech. Bulletin*, «Predict Shrinkage and Warpage of Reinforced and Filled Thermoplastics» Malvern, PA (1978).
14. Heap R.D. and Norman R.H., *Flexural Testing of Plastics*, The Plastics Institute, London, England, 1969, 13 p.
15. *Ibid.*, 13 p.
16. O'Toole J.L. «Creep Properties of Plastics» *Modern Plastics Encyclopedia*, McGraw-Hill, New York, 1968–1968, 48 p.
17. Kinney, Reference 1, 192 p.
18. Baer, Reference 4, 284 p.
19. Delatycki O. «Mechanical Performance and Design in Polymers» *Applied Polymer Symposia*, 17(134), Interscience, New York, 1971.
20. Kinney. Reference 1, 192 p.
21. O'Toole, Reference 16, 412 p.
22. Delatycki, Reference 19, p. 143–145.
23. «Design Guide» *Modern Plastics Encyclopedia*, McGraw-Hill, New York, 1979–1980, p. 480–481.
24. Deanin R.D. *Polymer Structure, Properties and Applications*, Cahnners Publishing Co., Boston, MA, 1972, 171 p.
25. Dubois J.H. and Levy S. *Plastics Product Design Engineering Handbook*, Reinhold, New York, 1977, p. 104–105.
26. Vincent P.I. *Impact Tests and Service Performance of Thermoplastics*, The Plastics Institute, London, England, 1971, 12 p.
27. Deanin. Reference 24, 171 p.
28. Vincent. Reference 26, 33 p.
29. *Ibid.*, 44 p.
30. Spath W. *Impact Testing of Materials*, Grodon and Breach Science Publishers, New York, 1961, 37 p.
31. Bergen R.L. «Tests for Selecting Plastics» *Metal Progress* (Nov. 1966), p. 107–108.
32. Westover R.F. and Warner W.C., «Tensile Impact Test for Plastic Materials» *Res. and Stand.*, 1(11) (1961), p. 867–871.
33. Bragaw C.G. «Tensile Impact» *Mod. Plast.*, 33(10) (1956), 199 p.
34. Westover R.F., «The Thirty Years of Plastics Impact Testing» *Plastics Technology*, 4 (1958), p. 223–228, 348–352.
35. Maxwell B. and Harrington J.P. «Effect of Velocity on Tensile Impact Properties of PMMA» *Trans. ASME*, 74 (1952), 579 p.
36. Nielsen L.E. *Mechanical Properties of Polymers*, Reinhold, New York, 1962, p. 124–125.
37. Baer. Reference 4, 799 p.
38. *Ibid.*, 803 p.

39. ASTM D 1709 (Part 36); ASTM D 3029 (part 35), Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, PA, 1978.
40. Tryson G.R. Takemori M.T., and Yee A.F., «Puncture Testing of Plastics: Effects of Test Geometry» *ANTEC*, 25 (1979), p. 638–641.
41. Abolins V. «Gardner Impact Versus Izod, Which Is Better for Plastics?» *Materials Eng.* (Nov. 1973), 52 p.
42. Goldman T.D. and Lutz J.T. «Developing Low Temperature Impact Resistance PVC: A New Testing Approach» *ANTEC*, 25 (1979), p. 354–357.
43. Starita J.M. «Impact Testing» *Plast. World* (April 1977), 58 p.
44. McMichael S. and Fischer S. «Understanding Materials with Instrumented Impact» *Materials Engineering*, April 1989, 47 p.
45. Tardif H.P. and Marquis H. «Impact Testing with an Instrumented Machine» *Metal Progress* (Feb. 1964), 58 p.
46. Starita, Reference 43, 59 p.
47. «The Perils of Izod—Part 1» *Plast. Design Forum* (May/June 1980), p. 13–20.
48. Tanzillo J.D. «Development of an Impact Test for Evaluation of Toughness of Rigid Plastic Building Components» *ANTEC*, 15 (1969), p. 346–349.
49. Nielsen, Reference 36, 228 p.
50. Marcucci M.A. *S.P.E.J.*, 14 (Feb. 1958), 30 p.
51. Nielsen. Reference 36, 230 p.
52. Lazan B.J. and Yorgiadis A. «Symposium on Plastics» *ASTM Spec. Tech. Pub.*, No. 59, (Feb. 1944), 66 p.
53. Nielsen, Reference 36, 230 p.
54. Nielsen, Reference 36, 230 p.

Рекомендуемые источники

- Dietz A.G. and Eirich F.R., *High Speed Testing*, Vol. I, Interscience, New York, 1960.
- Lysaght V.E., *Indentation Hardness Testing*, Reinhold, New York, 1949.
- Alfrey T., *Mechanical Behavior of High Polymers*, Interscience, New York, 1948.
- «Simulated Service Testing in the Plastics Industry» *ASTM Spec. Tech. Pub.* 375.
- Ritchie P.D., *Physics of Plastics*, Van Nostrand, Princeton, NJ, 1965.
- Ward I.M. and Pinnock P.R. «The Mechanical Properties of Solid Polymers» *Br. J. Appl. Phys.*, 17(3) (1966).
- Vincent P.I. «Mechanical Properties of High Polymers: Deformation» in *Physics of High Polymers*, Ritchie P.D. (Ed.), Iliffe, London, 1965, Chapter 2.
- Bueche F. *Physical Properties of High Polymers*, Wiley, New York, 1960.
- Tobolsky A.V., *Properties and Structure of Polymers*, Wiley, New York, 1960.
- Murphy A. *Properties of Engineering Materials*, 2nd ed., International Textbook Co., Scranton P.A., 1947, 402 p.
- Brown W.E. *Testing of Polymers*, Interscience, New York, 1969.
- Mark H.F., Gaylord N.G., and Bikales M. Eds., *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, Interscience, New York, 1964–1970.
- Schmitz J.V. Ed., *Testing of Polymers*, Interscience, New York, 1965.
- Kulow P. *Rubber and Plastics Testing*, Chapman and Hall, London, England, 1963.

Davis H.E., Troxell G.E., and Wiskocil C.T. *The Testing and Inspection of Engineering Materials*, McGraw-Hill, New York, 1955.

Liddicoat R.T. and Potts P. *Laboratory Manual of Material Testing*, Macmillan Co., New York, 1952.

Findley W.N. «Creep Characteristics of Plastics» *ASTM Symposium on Plastics*, Philadelphia, PA, 1944.

Turner S. «Creep Studies on Plastics» *J. Appl. Polym. Sci. Symp.*, 17 (1971).

Gotham K.V. «A Formalized Experimental Approach to the Fatigue of Thermoplastics» *Plastics and Polymers*, 37(130) (1969), 309 p.

Larson F.R. and Miller J. «A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses» *Trans. ASME* (July 1952), p. 765–775.

Constable I., Williams J.G., and Burns D.J. «Fatigue and Cyclic Thermal Softening of Thermoplastics» *J. Mech. Eng. Sci.*, 12(1) (1970).

Cessna L.C., Levens J.A., and Thomson J.B. «Flexural Fatigue of Glass-Reinforced Thermoplastics» *Polym. Eng. Sci.*, 9(5) (1969), p. 339–349.

Horsley R.A. and Morris A.C. «Impact Tests—A Guide to Thermoplastics Performance» *Plastics*, 31(3) (1966), p. 1551–1553.

Thomas J.R. and Hagan R.S. «Meaningful Testing of Plastic Materials for Major Appliances» *S.P.E.J.*, 22 (1966), p. 51–56.

Hertzberge R.W. and Manson J.A. *Fatigue of Engineering Plastics*, Academic, New York, 1980.

McMichael S. and Fischer S. «Understanding Materials with Instrumented Impact» *Mechanical Engineering*, April 1989, 47 p.

Mackin T.J. «A Comparison of Instrumented Impact Testing and Gardner Impact Testing» Instron Corp., Canton, MA.

3. Термические свойства

3.1. Введение

Термические характеристики полимерных материалов имеют не меньшее значение, чем их механические свойства. В отличие от металлов, полимеры чрезвычайно чувствительны к изменению температуры. Механические, электрические и химические свойства полимеров нельзя рассматривать в отрыве от температуры, при которой эти свойства измерялись. На многие термические свойства полимеров большое влияние оказывает кристаллизация. Наиболее важный эффект — это наличие четко выраженной точки плавления с соответствующим изменением термомеханических свойств. Для аморфных полимеров, напротив, характерно постепенное размягчение в широком диапазоне температур [1]. На термические свойства также влияет молекулярная ориентация. Одно из следствий ориентации — это уменьшение размерной стабильности при повышенных температурах [2].

Молекулярный вес полимера влияет на гибкость и хрупкость материала в низкотемпературной области. И многие другие факторы, такие как межмолекулярные взаимодействия, образование поперечных связей, сополимеризация — все они оказывают влияние на термические свойства материала. Таким образом, очевидно, что проявление термических свойств представляет собой комплексный эффект. Поэтому при проектировании изделий из полимерных материалов или выборе подходящего материала, рассматривая их термические свойства, необходимо тщательно учитывать как кратко-, так и долговременные влияния изменений температуры на свойства полимера.

3.2. Испытания для оценки роли температуры

Для конструктора при выборе полимерного материала всегда возникает необходимость оценки его поведения при повышенных температурах. Трудности здесь возникают в связи с тем, что имеется широкий набор типов и марок материалов, поведение которых весьма различно при повышенных температурах. При выборе материала для применения в области повышенных температур следует учитывать многие факторы. Так, материал должен выдерживать проектные уровни нагрузки в конкретных условиях применения без заметных следов ползучести или искажения формы. Материал не должен деструктировать или утрачивать введенные в него

добавки, которые предназначены для поддержания требуемого уровня механических свойств во все время жизни изделия.

Температура по-разному влияет на различные свойства полимерных материалов. Например, может случиться так, что электрические свойства не слишком заметно изменятся при повышении температуры, в то время как при этом наблюдается драматическое падение механических свойств. Поскольку изменения свойств полимеров с увеличением температуры происходит непредсказуемым образом, для получения разумных результатов необходимы аккуратные измерения температурных зависимостей свойств полимера. Из сказанного следует, что не может существовать какой-либо единой предельной температуры, до которой в полной мере сохраняются все важные для применения свойства полимерного материала.

При рассмотрении поведения полимера при повышенных температурах необходимо располагать температурными зависимостями таких ключевых свойств, как модуль упругости, предел прочности, химическая стабильность, стойкость к воздействию окружающей среды, причем эти параметры должны рассматриваться как функции времени. Поэтому данные кратковременных испытаний еще не дают адекватного описания поведения материала и оснований для его выбора, поскольку для этого требуются долговременные термические испытания.

Для удобства рассмотрения приведем в упрощенном виде следующую классификацию методов оценки термических свойств.

1. Кратковременные испытания:
 - а) деформационная теплостойкость;
 - б) температура размягчения по Вика;
 - в) испытания на торсионном маятнике.
2. Долговременные испытания:
 - а) долговременные испытания на сопротивление тепловому воздействию;
 - б) *UL*-температурный индекс;
 - в) измерения модуля ползучести/разрушения при ползучести

3.2.1. Кратковременные испытания

А. Деформационная теплостойкость, *heat deflection temperature, HDT* (по *ASTM D648*, ИСО 75-1 и 75-2)

Деформационная теплостойкость определяется как температура, при которой стандартный образец (размером 3×0,5×0,25 дюйма) прогибается на 0,010 дюйма под заданной нагрузкой, создающей напряжение либо 66, либо 264 фунт/дюйм². Деформационная теплостойкость, также определяемая как предельная температура теплостойкости под нагрузкой, часто используется как характерный параметр для качественного контроля, скрининга и ранжирования полимерных материалов при кратковременных испытаниях. Получаемые по этому методу данные не могут использоваться ни для предсказания поведения полимерных материалов при повышенных температурах, ни как исходные данные для проектирования изделий. Температура деформационной теплостойкости представляет собой лишь одноточечную оценку материала, которая не может использоваться для оценки долговременного поведения

полимера при повышенных температурах. Определение этой температуры, однако, позволяет устанавливать различия между материалами и делать первичный выбор между теми из них, которые теряют жесткость в некотором узком интервале температур, либо способны выдерживать нагрузку при повышенных температурах.

Аппаратура и образцы. Аппаратура для измерения деформационной теплостойкости состоит из замкнутой масляной бани с температурной камерой, снабженной системой автоматического контроля, которая следит за тем, чтобы подъем температуры в масляной бани происходил с постоянной скоростью. Кроме того, прибор снабжен системой для быстрого охлаждения нагревающей жидкости, что позволяет проводить повторные измерения. Образец устанавливается на двух стальных опорах, расстояние между которыми составляет 4 дюйма. Нагрузка прикладывается к образцу посередине между опорами. Радиус при вершине контактного угла на опорах и у вершины нагрузочного пуансона составляет 0,25 дюйма. Для измерения прогиба используется подходящий датчик, например, просто цифровая шкала. Для измерения температуры применяют ртутный термометр.

Нагрузка создается стационарным грузом, которой выбирается так, чтобы напряжение в наружных волокнах образца составляло 66 или 264 фунт/дюйм².

Промышленно выпускаемый прибор для определения деформационной теплостойкости с закрывающейся камерой для установки образцов показан на рис. 3.1.

Процедура испытания. Образцы устанавливаются в камеру прибора, которая вместе с датчиками температуры и прогиба помещается в масляную баню. Далее прикладывается заданная нагрузка (66 или 264 фунт/дюйм²). После 5-минутной выдержки под нагрузкой стрелка индикатора устанавливается на нуль, и температура начинает повышаться со скоростью $2 \pm 0,2$ °С/мин. Фиксируется температура масляной бани, при которой прогиб образца достигнет 0,010 дюйма. Эта температура принимается за предел деформационной теплостойкости материала.

Влияние различных факторов и ограничения метода

Остаточные напряжения. В образце могут сохраняться остаточные напряжения, накопленные при литье, или же ориентация, созданная при приготовлении образца,



Рис. 3.1. Тестер для определения теплостойкости (с разрешения CEAST USA Inc.)

начинает релаксировать при нагревании. Вследствие этого из-за действия дополнительных напряжений образец коробится, прогибаясь вниз. Такое коробление обусловлено размягчением образца, что позволяет проявиться остаточными напряжениями ориентации. В итоге получаются ошибочные значения деформационной теплостойкости. Однако если образец был подвергнут предварительному отжигу в контролируемых условиях до начала испытаний, то это позволяет устранить остаточные напряжения и коробление практически полностью. Температурный предел деформационной теплостойкости исходного образца обычно ниже по сравнению с измеряемым для отожженного образца.

Толщина образца. Для более толстых образцов существует тенденция получения более высоких значений деформационной теплостойкости. Это обусловлено низкой теплопроводностью полимерного материала, так что требуется большее время для полного прогрева образца. Поэтому значения температурного предела деформационной теплостойкости оказываются завышенными.

Напряжение. Чем выше напряжение в образце, тем ниже оказывается деформационная теплостойкость. Наблюдаемые различия обусловлены уровнем действующих напряжений, а их проявления зависят от типа испытываемого полимера.

Подготовка образца. Для образцов, полученных литьем под давлением, характерна более низкая теплостойкость по сравнению с образцами, изготовленными методом компрессионного литья. Это обусловлено меньшими остаточными напряжениями, возникающими в последнем случае.

Б. Температура размягчения по Вика (по ASTM D1525 или ИСО 306)

Под температурой размягчения по Вика понимают температуру, при которой игла с круглым сечением и плоским концом размером 1 мм^2 проникает в образец на глубину 1 мм под действием выбранной нагрузки при заданной скорости подъема температуры. Этот метод испытаний по существу подобен измерению деформационной теплостойкости. И для него область применения ограничена контролем качества, а также оценкой материалов в процессе их разработки. Результаты измерений также полезны для сравнения температур размягчения термопластов. Однако этот метод неприменим для пластифицированного ПВХ и других материалов, размягчающихся в широком интервале температур.

Аппаратура, используемая для определения деформационной теплостойкости, также с минимальными изменениями может быть использована и для измерения температуры размягчения по Вика.

Для испытаний используют образец, полученный литьем или вырезанный из листовой заготовки. Минимальная толщина и ширина образца должны составлять, 0,12 и 0,40 дюйма соответственно.

Испытания состоят в том, что образец устанавливается на подложке, и игла подводится к его поверхности. Температура бани равномерно повышается со скоростью 50 или 120°C в час. Фиксируется температура, при которой игла вдавливаются в образец на глубину 1 мм. Эта точка принимается за температуру размягчения по Вика.

На рис. 3.2 показан промышленно выпускаемый прибор для измерения температуры размягчения по Вика.

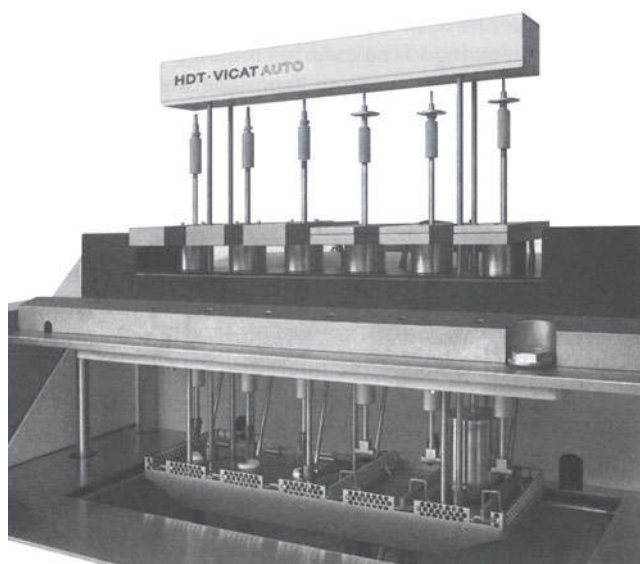


Рис. 3.2. Прибор для измерений температуры размягчения по Вика

В. Испытания на торсионном маятнике (по *ASTM D2236*)

Температурная область применения пластмасс в большинстве случаев ограничена описанной выше деформационной теплостойкостью и областью стеклования, а в случае частично кристаллических полимеров — областью плавления кристаллитов. Переход через температуру стеклования оказывается огромное негативное воздействие на все механические свойства пластмассы, кроме стойкости к удару, а также на термические свойства, такие как температурный коэффициент расширения. Поэтому знание температур переходов необходимо для установления границ применимости полимерного материала.

Наиболее надежная информация такого рода получается из результатов измерений полной температурной зависимости модуля упругости, и в особенности динамического модуля, поскольку свойства полимера при повышенных температурах слишком сложны, чтобы их можно было охарактеризовать одним значением температуры деформационной теплостойкости или размягчения по Вика [4].

В настоящее время существует самая разнообразная экспериментальная техника, которая позволяет измерить динамический модуль при повышенных температурах. Возможно, самый простой и ясный вариант измерений состоит в использовании торсионного маятника. С использованием приборов такого типа можно построить одноточечные значения модуля как функции температуры вплоть до начала плавления или разложения материала.

Прибор, позволяющий проводить измерения динамического модуля в широком диапазоне температур, довольно прост. Он состоит из жестко фиксированного зажима с одной стороны маятника и инерционного груза (обычно в форме диска или

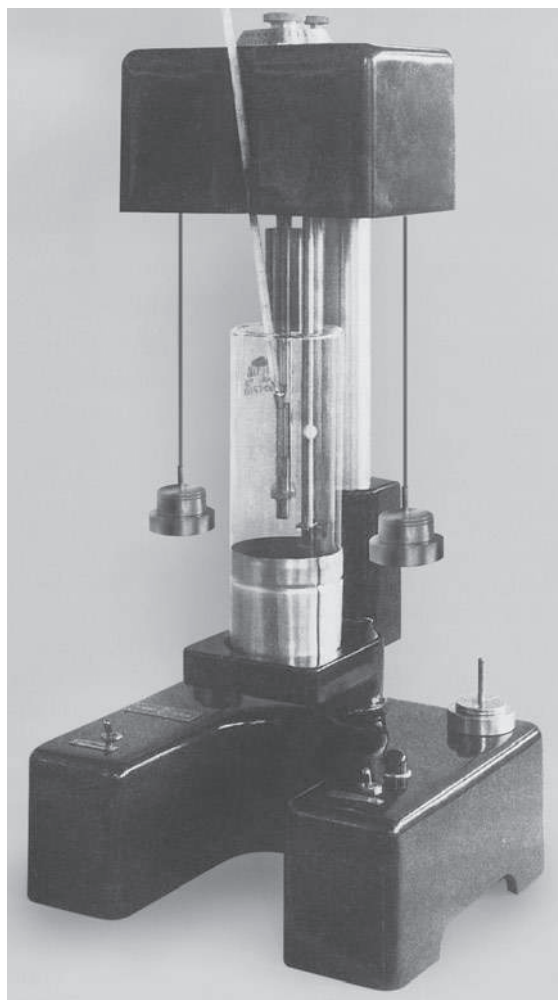


Рис. 3.3. Торсионный маятник (воспроизведено с разрешения *McGraw-Hill Company*)

цилиндра) с известным моментом инерции, закрепляемого на другом конце. Для слежения за колебаниями маятника используется дифференциальный трансформатор или самописец, представляющий результаты измерений в графической форме. Образец помещается в термокамеру, оборудованную системами охлаждения и нагревания, что позволяет проводить испытания в широком диапазоне температур.

На рис. 3.3 представлен образец торсионного маятника.

Испытания проводят на образцах в форме цилиндра или параллелепипеда различной длины и толщины. Однако, поскольку результаты испытаний зависят от толщины, обычно толщина образца строго оговаривается. До начала испытаний в камере устанавливается температурное равновесие. Затем возбуждаются колебания, и измеряется частота и скорость их затухания. Модуль упругости рассчитывают, исходя

из известных размеров образца, момента инерции и периода колебаний. Величина, называемая логарифмическим декрементом затухания, определяется по интенсивности уменьшения амплитуды колебаний. Детальное описание процедуры обработки экспериментальных данных можно найти в литературе [5].

Логарифмический декремент затухания в первом приближении представляет собой производную к температурной зависимости модуля. Поэтому он проходит через максимум в той области температур, в которой происходит резкий спад модуля с увеличением температуры [6]. Такое драматическое падение модуля отвечает температуре, при которой полимер становится неспособным выдерживать механическую нагрузку.

На рис. 3.4 представлены характерные примеры результатов измерений, получаемые с помощью торсионного маятника. На температурной зависимости модуля упругости отчетливо видна область стеклования. В области низких температур значения модуля очень высоки, и они постепенно снижаются по мере роста температуры. Вблизи температуры стеклования модуль снижается весьма резко в узкой температурной области. Потери, которые выражаются через логарифмический декремент затухания, определяются по интенсивности убывания амплитуды колебаний. На графике температурной зависимости логарифмического декремента затухания видны области перехода. Соответствующая температура трактуется как предельная температура работоспособности материала.

Даже с учетом того, что испытания, проводимые с помощью торсионного маятника, дают ценную информацию относительно динамических свойств полимерных

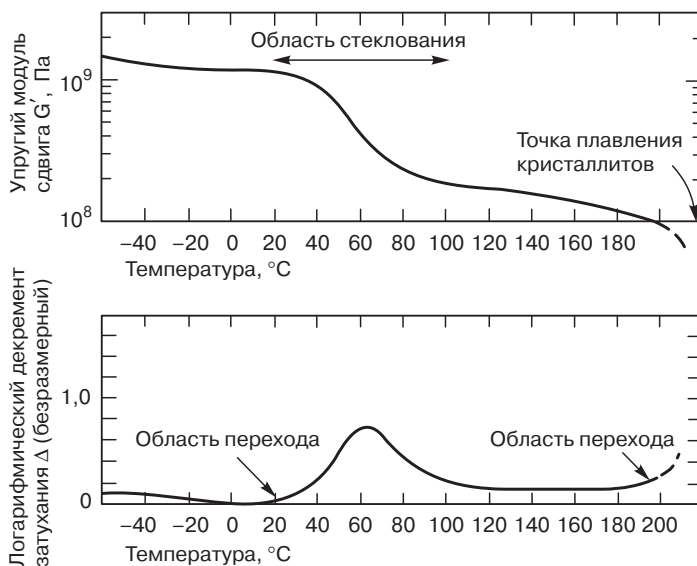


Рис. 3.4. Температурные зависимости динамических механических свойств, определенных с помощью торсионного маятника для типичного частично кристаллического полимера (Найлон G, высушенный). Видны области стеклования и плавления кристаллитов. Показан метод оценки температур переходов (воспроизведено с разрешения McGraw-Hill Company)

материалов в области повышенных температур, не следует забывать о том, что это, все же, кратковременные испытания. Необходимо иметь данные по модулю ползучести и условиям разрушения при длительном воздействии нагрузки при повышенных температурах, которые характеризуют долговременные свойства материала.

3.2.2 Долговременные испытания

Оценка свойств полимерных материалов при повышенных температурах исключительно важна, поскольку во многих реальных случаях применения изделий они длительное время находятся под влиянием высоких температур. При длительном пребывании в условиях повышенных температур в полимере происходят различные физические и химические превращения. Даже в тех случаях, когда при кратковременном воздействии высоких температур никаких заметных изменений с материалом не происходит, при длительном пребывании при повышенных температурах могут происходить драматические изменения физических свойств, в частности полная утрата жесткости и сильная химическая деструкция. При длительной экспозиции при повышенных температурах комбинация таких факторов, как воздействие озона, солнечных лучей и окружающей среды взаимно усиливают воздействие на полимер. При повышенных температурах во многих случаях наблюдается потеря таких важных добавок, как пластификаторы и стабилизаторы, что приводит к тому, что материал становится либо хрупким, либо чрезвычайно мягким.

В промышленности пластмасс приняты три основных метода оценки долговременного воздействия высоких температур. Если не предполагается, что изделие будет находиться под влиянием высокой температуры в течение длительного времени, то обычно бывает достаточно простых испытаний на стойкость к тепловому воздействию.

Если же условия применения требуют, чтобы изделие находилось под нагрузкой в течение длительного времени при повышенных температурах, то необходимо проводить испытания, в которых измерялся бы модуль ползучести и прочность при долговременном воздействии постоянного напряжения.

Другой популярный метод испытаний, предназначенный для определения максимальной допустимой температуры эксплуатации, был разработан в *Underwriters Laboratories* и известен под названием определения *UL*-индекса. *UL*-индекс был установлен для многих полимерных материалов, используемых в электротехнической промышленности. Под *UL*-индексом понимают максимальную температуру, при которой полимерный материал может применяться без опасности термической деструкции.

А. Долговременные испытания на стабильность при повышенных температурах (по *ASTM D794*)

Метод долговременных испытаний при повышенных температурах предлагается использовать путем измерения тех или иных характеристик материала после длительного воздействия повышенных температур.

Для выполнения этих испытаний могут использоваться образцы любого вида, в частности листы, ламинированные пластмассы, бруски или отливки. Могут также использоваться стандартные образцы, испытываемые в условиях одноосного растяжения

путем сравнения результатов, получаемых до и после воздействия высоких температур. Для проведения испытаний необходимо иметь температурную камеру и штатив подходящей конструкции для установки образцов, который позволил бы осуществлять свободную циркуляцию нагретого воздуха вокруг образцов. Испытания состоят в том, что образцы помещают в камеру, в которой их выдерживают при выбранной температуре в течение заданного времени. Задаваемая температура может изменяться ступенчато с шагом в 25°C в сторону повышения или понижения, пока не наступит разрушение образца. За температуру разрушения принимается такая температура, при которой наблюдаются видимые изменения внешнего вида, веса, размеров образца или же иных свойств материала, которые делают невозможным его дальнейшее применение в требуемых условиях.

Разрушение может проявляться в форме возникновения пузырей, растрескивания, потери пластификатора или иных летучих компонент, что в итоге вызывает охрупчивание, усадку или изменение требуемых для применения электрических или механических свойств материала.

На воспроизводимость получаемых результатов влияют многие факторы, в частности надежность контроля температуры в камере, особенности приготовления образцов, характер циркуляции воздуха вокруг образцов, длительность экспозиции, влажность воздуха в камере. Определенную роль играют также содержание и тип летучих в отливке или образце, подготовленном для испытаний.

Б. *UL*-индекс

Возросший объем использования полимерных материалов в электротехнике, в частности в портативных электрических устройствах и оборудовании, вновь способствовал интересу к способности пластмасс противостоять воздействию механических нагрузок при повышенных температурах. Если материал не выполняет возложенных на него функции, то могут случиться серьезные неприятности, удар электрическим током или возгорание [7]. В *Underwriters Laboratories*, которая представляет собой независимую неприбыльную организацию, ответственную за безопасность потребителей, была разработана специальная методика определения предельно допустимой температуры эксплуатации полимерных материалов. Получаемый показатель, *UL*-температурный индекс, позволяет оценить возможности применения тех или иных материалов при повышенных температурах. Значения *UL*-температурного индекса количественно коррелируют с ранжированием по температуре полимерных материалов (в $^{\circ}\text{C}$) по максимальной температуре, которую этот материал может выдержать без термодеструкции и тем самым может использоваться на практике [8].

Относительные температурные индексы. Относительный температурный индекс — это характеристика способности материала сохранять уровень выбранного показателя свойств (механических, электрических и других) при повышенных температурах в течение заданного длительного времени. Значения относительного температурного индекса могут быть установлены для каждого конкретного материала, причем этот показатель зависит от толщины образца [9].

Относительные индексы материала находятся сопоставлением характеристик, изменяемых при старении в условиях повышенных температур в определенных

условиях эксплуатации, со свойствами, измеряемыми для материала, не подвергавшегося температурным воздействиям. Для определения относительного температурного индекса могут использоваться самые различные свойства материала. При этом в программу испытаний должны закладываться именно те свойства, которые являются определяющими для применения конечных изделий. Если же эти свойства не относятся к числу включаемых в программу испытаний, то значения температурных индексов не могут рассматриваться как подходящие для сравнения материалов в конкретных условиях применения.

Относительные температурные индексы, основанные на накопленном опыте. UL-индексы также основываются на огромном накопленном опыте испытаний большого объема различных полимерных материалов. Такие температурные индексы известны для основных классов материалов. Результаты определения относительных температурных индексов, основанные на предшествующем опыте испытаний, для полимеров различного химического строения представлены в табл. 3.1.

Относительные температурные индексы, основанные на долговременном термическом старении. Такие значения относительных температурных индексов получают, проводя испытания полимерных материалов при тепловом воздействии в течение заданного времени и наблюдая за эффектом термической деструкции. Для выполнения этих испытаний используют термокамеру с электрическим обогревом и принудительной циркуляцией нагретого воздуха. В некоторых случаях, однако, могут использоваться и статические камеры без принудительной циркуляции. Конкретные свойства, измеряемые при выбранной программе испытаний, должны как можно более точно отражать те свойства, которые важны для применения изделий.

Таблица 3.1. Относительные термические индексы ряда полимеров с разной химической структурой, полученные на основе имеющегося опыта эксплуатации изделий^a

Материал	Общее значение термического индекса, °C
Поламиды (типа 6, 11, 66. 610) ^b	65
Поликарбонат ^b	80
Литьевые фенольные смолы ^{c, d}	150
Литьевые меламиновые смолы ^{c, d}	30 ^e
Литьевые меламинофенольные смолы ^{c, d}	130 ^e
Фторопласты:	
политетрафторэтилен	180
полихлортрифторэтилен	150
фторированный полиэтилен-пропилен	150
Силиконовый каучук (RTV)	105
Полиэтилентерефталат (пленка)	105
Мочевиноформальдегидная смола	100
Литьевая алкидная смола ^{c, d}	130
Литьевая эпоксидная смола ^{c, d}	130
Литьевая диаллилфталатная смола ^{c, d}	130
Литьевой полиэфир ^{c, d} (термореактивная смола)	130

^a Заимствовано из UL 747B. Воспроизведено с разрешения Underwriters Laboratories, Inc.

^b Включая стеклонаполненные композиции.

^c Данные относятся к компаундам, полученным литьем при одновременном воздействии высокой температуры и высокого давления при литье. Исключены материалы, которые получают методом заливки при низком давлении или в процессе низкотемпературного отверждения в открытых формах, а также при ручном нанесении, распылении, при использовании мешков, намоткой армирующих волокон, инкапсуляцией, ламинированием и т. п.

^d Включая материалы, содержащие наполнители в виде волокон (иных нежели органические волокна), но исключая армированные композиции, в которых смола используется в жидкой форме.

^e Компаунды с плотностью не менее $1,55 \text{ г/см}^3$, включая системы, армированные целлюлозными волокнами, которые используют при температурах не выше 150°C (302°F).

Наиболее часто из числа таких свойств для сравнения используют результаты измерений прочности при растяжении, прочности на изгиб и ударной прочности по Изоду. При сопоставлении электрических характеристик измеряют диэлектрическую прочность, поверхностное или объемное сопротивление, сопротивление дугообразованию и образованию трещин.

Для испытаний используют образцы, описанные в стандартах *ASTM*, причем выбор зависит от предполагаемого типа испытаний. В докладе «Полимерные материалы — оценка кратковременных свойств, *UL 746A*» приводится описание образцов, предназначенных для оценки механических и электрических свойств, и процедура испытаний.

Для того чтобы определить относительный температурный индекс, выбирается контрольный материал, который заведомо обладает хорошими термическими характеристиками при выбранной температуре. Предпочтительно в качестве контрольного использовать материал того же самого типа и образцы той же толщины, что и материал, предназначенный для испытаний. Необходимо проводить испытания, по крайней мере, при четырех различных температурах в термокамере. Выбор самой высокой температуры определяется тем, что предполагается, что при этой температуре срок службы изделия будет не большим, чем два месяца. При двух следующих более низких температурах предположительный срок эксплуатации изделия не должен превышать 3 и 6 месяцев. При самой низкой температуре испытаний ориентировочный срок службы изделия должен составлять 9–12 месяцев.

Срок службы изделия устанавливается исходя из предположения о коэффициенте запаса по механическим и электрическим свойствам не меньшем, чем 2:1. За срок службы изделия принимается время, за которое при выбранной температуре оцениваемое свойство уменьшится на 50% по сравнению с исходным уровнем. При этом не ожидается, что это 50 %-ное снижение рассматриваемого показателя свойств произойдет вследствие термической деструкции, которая привела бы к разрушению материала.

На рис. 3.5 представлен пример типичной температурной зависимости предельного времени сохранения работоспособности, полученной по данным различных испытаний. На вставке к рисунку представлены данные, полученные в результате испытаний на старение при четырех различных температурах. Показаны данные, полученные при испытаниях на ударную прочность, продольное растяжение и при измерениях диэлектрической прочности. При каждой температуре первое значение показателя относится к исходному образцу, испытанному до начала старения. И далее

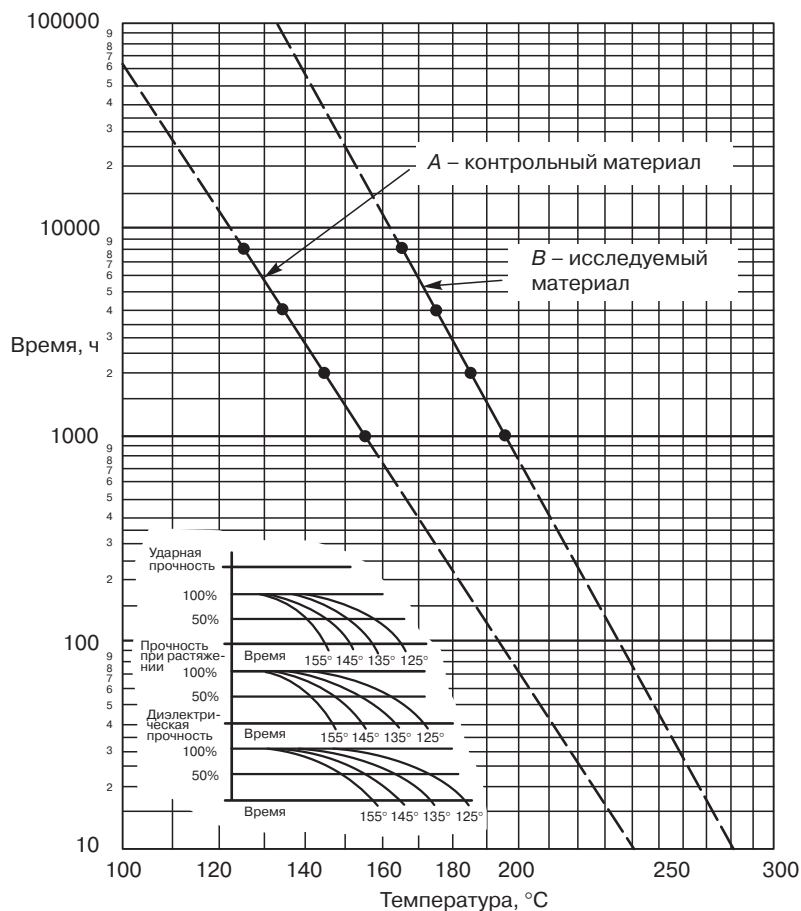


Рис. 3.5. Типичная зависимость предельного срока эксплуатации исследуемого материала от температуры (с разрешения *Underwriters Laboratories, Inc.*)

показан уровень падения измеряемой характеристики свойства на 50%, что отвечает условию разрушения образца. Температурная зависимость времени до разрушения представлена в виде графика B в аррениусовских координатах. Зависимость A отвечает контрольному материалу с относительным термическим индексом при 100 °C. Для этого контрольного материала в качестве базы выбрана продолжительность жизни в 60 000 часов. Зависимость времени до разрушения от температуры исследуемого материала пересекает базовую линию, отвечающей этой продолжительности жизни при 140 °C. Таким образом, можно ожидать, что исследуемый материал сохранит свою работоспособность при 140 °C в той же мере, что и контрольный материал при 100 °C.

Относительный температурный индекс при 140 °C, полученный в рассматриваемом примере, относится ко всем возможным областям применения, включая ситуации, в которых определяющее значение имеет ударная прочность. В случаях, когда

ударные характеристики не играют решающей роли, можно принимать более высокие значения относительного температурного индекса. Чтобы избежать недооценки материала, исходя из значений относительных температурных индексов, *Underwriters Laboratories* публикует рейтинги полимерных материалов по трем категориям, относящимся к различным областям применения, когда определяющую роль играют только электрические свойства, как электрические, так и механические свойства и электрические и механические свойства, но с исключением ударных нагрузок. *Underwriters Laboratories* представляет соответствующие данные полугодовых отчетов, называемых *Plastic Recognized Component Directory*.

На рис. 3.6 показан пример страницы из такого отчета.

Поскольку сопротивление долговременному термическому старению зависит от толщины образцов, то согласно требованиям *Underwriters Laboratories* температурный индекс должен определяться с использованием серии образцов различной толщины.

Наконец, следует учитывать, что при использовании программы определения относительного температурного индекса по методике *Underwriters Laboratories* верхний предел по температуре зависит от напряжения, создаваемого при эксплуатации изделия. Соответственно, температурный индекс, определяемый по методике *Underwriters Laboratories*, справедлив только тогда, когда это специально оговорено при проведении испытаний.

Underwriters Laboratories выпускает материалы *UL iQTM*, которые позволяют производить поиск по базе данных, охватывающей более чем 60 000 материалов, прошедших испытания по методикам *Underwriters Laboratories*, которые отражают специфические требования к условиям применения этих материалов. При поиске нужных сведений следует опираться на спецификацию материала, наименование компании, класс, к которому относится данный материал, марку материала и конкретное описание этого материала.

В. Испытания на модуль ползучести/предел прочности при ползучести

Методы испытаний, направленные на определение модуля при ползучести и предел прочности при долговременном нагружении (при ползучести) обсуждались в главе 2. Оба показателя (модель и предел прочности) заметно снижаются по мере повышения температуры. Выбирая материал для применения в области повышенных температур, необходимо тщательно проанализировать имеющиеся опубликованные данные по значениям модуля и предела прочности, полученные при испытаниях на ползучесть. Этот анализ опирается на изучение диаграмм, подобных тем, которые приводятся на рис. 3.7 и 3.8.

На одной из них (рис. 3.7) представлены данные по значениям модуля упругости различных термопластов при трех температурах. Аналогичные по смыслу данные для прочности, измеряемой при ползучести, показаны на рис. 3.8. Рассмотрение этих данных показывает, что большинство термопластов обладают достаточными жесткостью и прочностью лишь в области комнатных температур, и лишь очень немногие материалы сохраняют необходимый уровень этих свойств для того, чтобы воспринимать нагрузку при повышенных температурах [10].

E107854

Пятница 24 октября 2003 г.

Деталь QMFZ2 — пластмасса

Фирма TICONA

Адрес: Morton Business Line 86 Morris Ave Summit NJ 07901

Обозначение материала 1110(a)(b)

Цвет	Минимальная толщина, мм	Класс горючести	HWI	NAI	Относительный температурный индекс (ОТИ)		IES GWIT	IES GWFI
					электрич.	удар.		
бесцветный любой	0.38	V-0	—	—	130	130	—	—
	0.80	V-0	3	4	220	130	—	—
	1.5	V-0	2	4	220	130	—	—
	3.0	V-0	1	4	220	200	—	—
СТИ: 4	IES СТИ: —	HVTR: 3	D495: 5	предельная температура по шарiku, °C: —				
Электрическая прочность, Кв/мм: 20					Размерная стабильность, %: 0			
Прочность на растяжение по нсо, Мпа: —					Деформационная теплостойкость			
Прочность на удар по Изоду, по ИСО: —					по ИСО, °C: —			
					Ударная прочность по Шарпи, по			
					ИСО, кДж/м²: —			

a относится также к маркам A, B, D или L, указывающих на перерабатываемость

b может также добавляться одна значащая цифра, например 0,9, указывающая молекулярный вес

Примечание. Этот продукт также производится фирмой Ticona GmbH, Postfach 1561, 65444, Kelsterbach, Germany

Дата составления отчета 3 декабря 1996 г.

Underwriters Laboratories, Inc.®

Данные, полученные на небольшом количестве образцов, не могут использоваться для оценки применения материала в строительстве и иных родственных областях. Представляемые данные характеризуют только горючесть материала, используемого в небольших изделиях или деталях, где применимость материала должна быть подтверждена при его испытаниях в комбинации с другими материалами согласно методам Underwriters Laboratories, Inc.

Рис. 3.6. Типичный пример отчета по температурной зависимости свойств материала (с разрешения Underwriters Laboratories, Inc.)

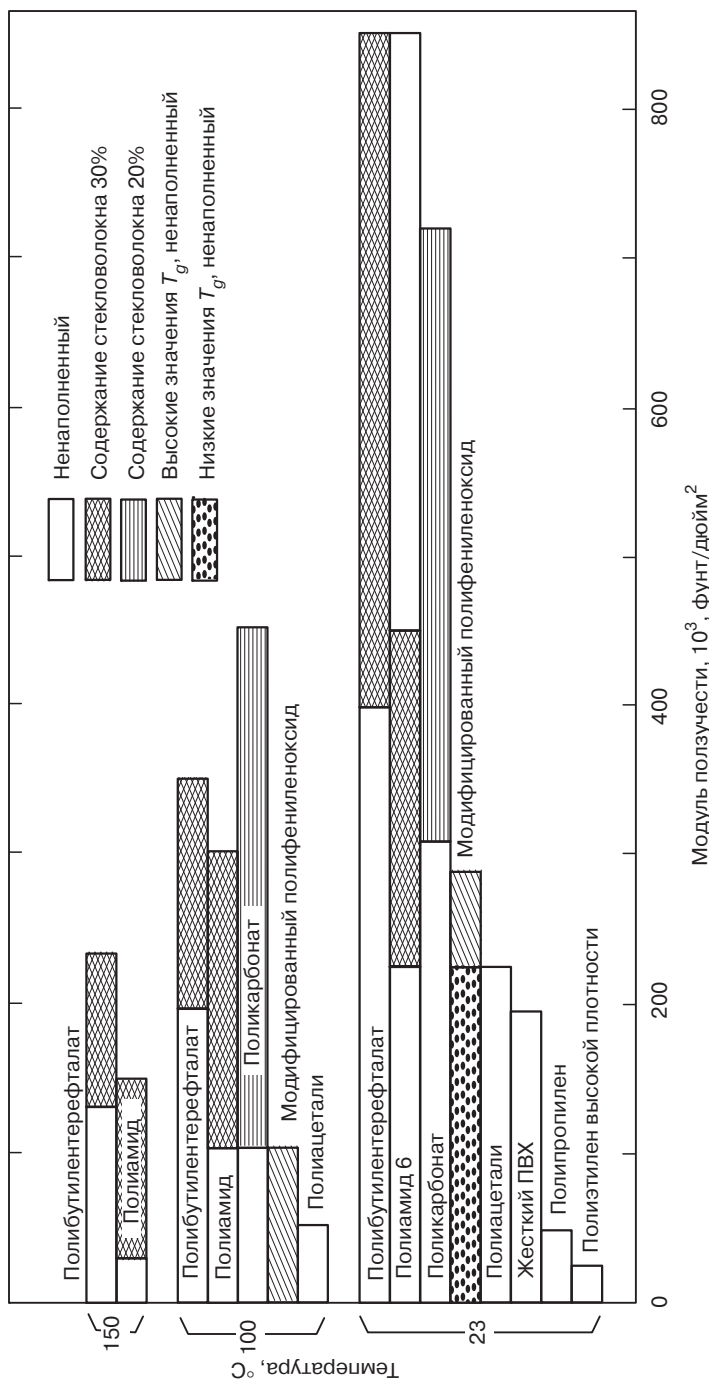


Рис. 3.7. Температурные зависимости модуля ползучести (воспроизведено с разрешения McGraw Hill Company)

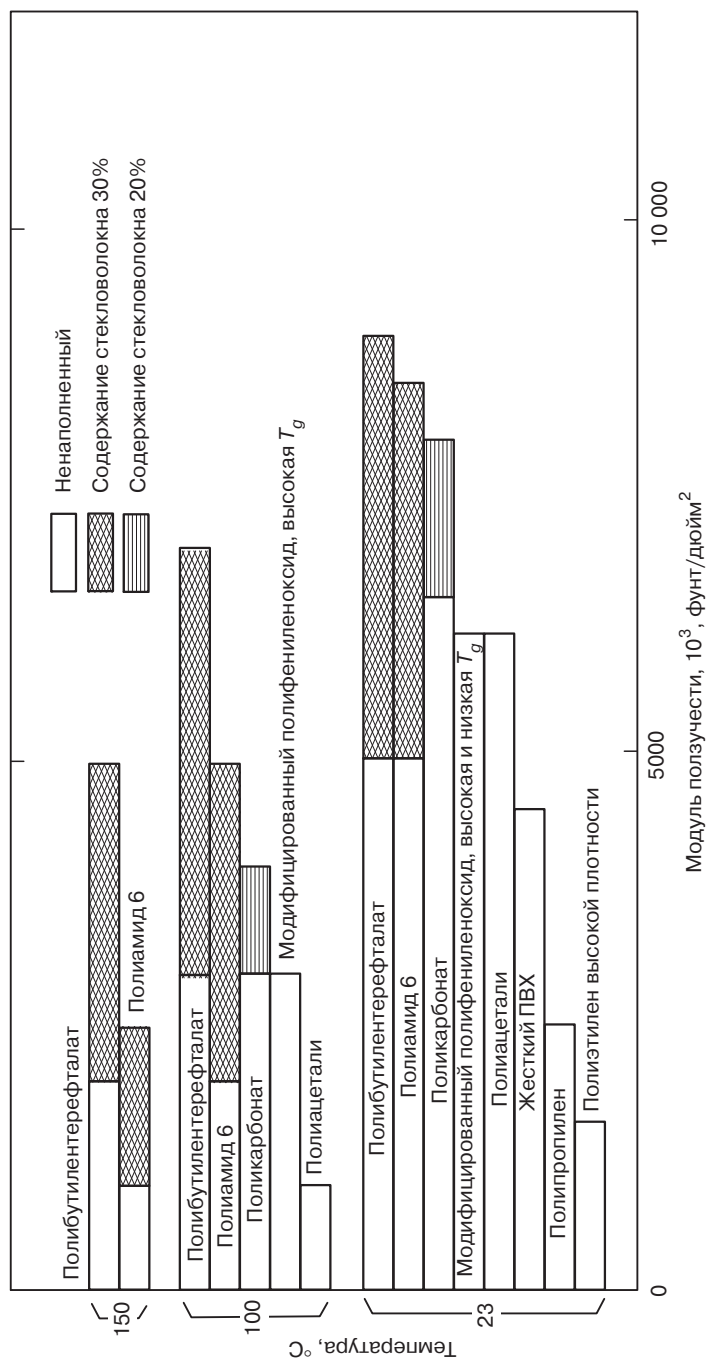


Рис. 3.8. Температурные зависимости предела прочности при ползучести (воспроизведено с разрешения McGraw Hill Company)

3.3. Теплопроводность (ASTM C107, ИСО 8302)

Под теплопроводностью понимается скорость передачи тепла по механизму кондуктивного переноса через единичное поперечное сечение в случае, если градиент температуры направлен перпендикулярно поверхности, через которую происходит перенос. Коэффициент теплопроводности, иногда называемый K -фактором, представляет собой количество тепла, переносимого через единичную поверхность за заданное время при градиенте температуры, равном 1°C .

Одной из особенностей свойств пластмасс, обеспечивших бурный рост их производства в последнее десятилетие, является их низкая теплопроводность. Пластмассы успешно выполняют свои функции и в оборудовании кухонь, и в качестве материала для изготовления рулевых колес в автомобилях. В последние годы пенопласты, которые обладают наименьшей теплопроводностью среди всех известных материалов, получили особенно широкое распространение в качестве теплоизолирующих материалов. Выдающиеся теплоизолирующие характеристики пенопластов обусловлены не свойствами полимера самого по себе, а наличием пустот, заполненных газом, так что полимерный материал служит лишь как емкость для хранения газообразного наполнителя.

Как и плотность пенопластов, их теплопроводность снижается до некоторого минимума и затем начинает возрастать из-за явления конвекции благодаря увеличивающейся доле открытых ячеек [11].

Количество переносимого тепла зависит от теплопроводности, а также от расстояния, на которое происходит перенос. Соответствующее выражение имеет вид [12, 13]:

$$Q \sim \frac{K}{X},$$

где Q — количество переносимого тепла; K — коэффициент теплопроводности; X — расстояние, на которое происходит перенос тепла.

Минимальная теплопроводность в пенопластах с закрытыми ячейками обусловлена пониженной конвекцией газа в этих ячейках.

Наиболее простой метод измерения теплопроводности теплоизоляционных материалов основан на использовании метода горячей пластинки с охранными кольцами. Тем не менее используемое для этой цели оборудование довольно сложное и дорогостоящее. Схематично принцип этого метода измерений показан на рис. 3.9. Для предотвращения потерь тепла в разных направлениях, за исключением аксиального направления, используют нагреваемые охранные кольца.

Эксперимент состоит в том, что образец помещают между нагретой пластинкой и холодной плитой, через которую тепло отводится («сток тепла»). Измеряется время, за которое стабилизируются значения входной и выходной температур. Коэффициент теплопроводности вычисляется по формуле

$$K = \frac{Qt}{A(T_1 - T_2)},$$

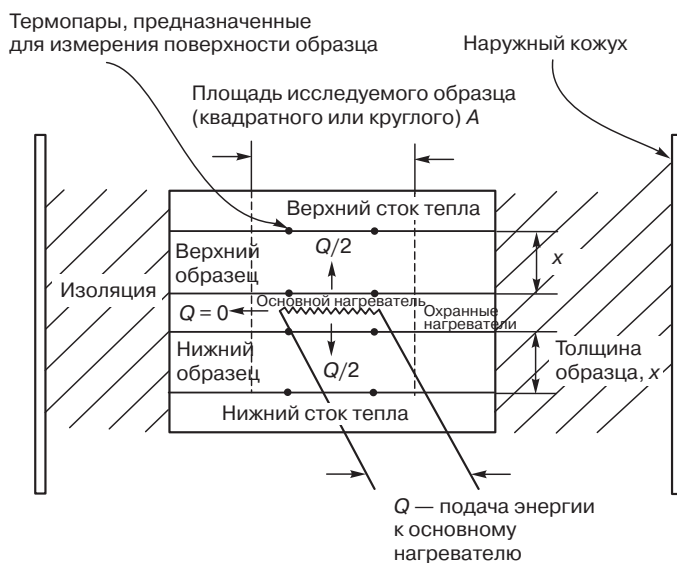


Рис. 3.9. Схема, иллюстрирующая принцип измерения теплопроводности по методу горячей пластинки с охранными кольцами (воспроизведено с разрешения *McGraw-Hill Company*)

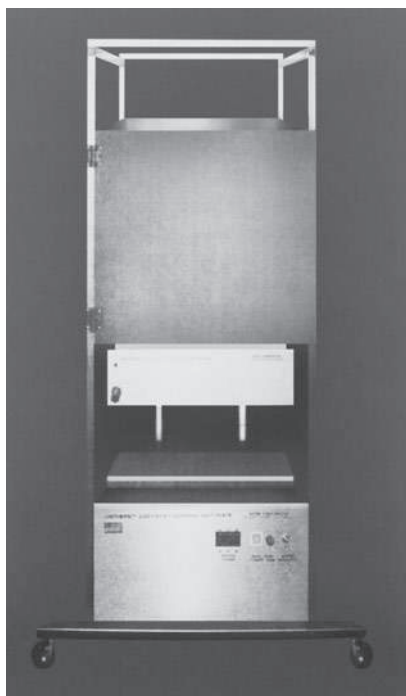


Рис. 3.10. Оборудование для измерения коэффициента теплопроводности по методу горячей пластинки с охранными кольцами (с разрешения *Anters Corporation*)

где K — коэффициент теплопроводности (в единицах $BTU^1/\text{дюйм}/\text{час}/\text{фут}^2/^\circ\text{F}$);

Q — интенсивность теплового потока (в $BTU/\text{ч}$);

t — толщина образца;

A — площадь, через которую происходит перенос тепла (дюйм²);

T_1 — температура нагретой поверхности пластинки, $^\circ\text{F}$;

T_2 — температура холодной поверхности пластинки, $^\circ\text{F}$.

На рис. 3.10 показан промышленно выпускаемый прибор для измерения коэффициента теплопроводности.

В табл. 3.2 собраны значения коэффициентов теплопроводности различных материалов, включая твердые пластмассы и пенопласты.

Таблица 3.2. Коэффициенты теплопроводности различных материалов, включая твердые пластмассы и пенопласты

Пластмасса	Значения коэффициента теплопроводности (в $BTU/\text{дюйм}/\text{час}/\text{фут}^2/^\circ\text{F}$)
<i>Твердые материалы</i>	
Полистирол (с обычной ударной прочностью)	0,29–0,87
Полистирол (ударопрочный)	0,29–0,87
Полистирол (теплостойкий)	0,29–0,87
Полиуретановые эластомеры	0,49
Полистиролы (с химическими добавками)	0,55–0,87
Полиалломеры	0,58–1,20
Сополимеры пропилена	0,58–1,20
Полистирол общего назначения	0,70–0,96
Полиакрилаты	0,7–1,7
Полипропилен (немодифицированный)	0,81
Сополимер стирола с акрилонитрилом	0,84
Поливинилиденфторид (VF2)	0,87
Полипропилен (модифицированный эластомерами)	0,87–1,20
Хлорированный полиэфир	0,90
Поливинилхлорид (пластикат ненаполненный)	0,99
Поливинилхлорид (пластикат наполненный)	0,99
Бутадиен-стирольный термопластичный эластомер	1,00
Поливинилхлорид (жесткий)	1,10
Полиамид 12 (стеклонаполненный)	1,10
Полифениленоксид (с 30% стекловолокна)	1,10
Этилцеллюлоза	1,10–2,00
Полиметилпентин	1,20
Фенольные смолы (с волокнистым или тканевым наполнителем)	1,20

¹ *BTU, British Thermal Unit* — принятая в США и Великобритании единица тепловой энергии, равная 0,253 ккал.

Продолжение табл. 3.2

Пластмасса	Значения коэффициента теплопроводности (в $BTU/дюйм/час/фут^2/°F$)
Фенольные смолы (наполненные отходами бутадиен-акрилонитрильного сополимера)	1,20
Полиакрилаты (ударопрочные)	1,20–1,50
Полиакрилаты (получаемые заливкой)	1,20–1,70
Эпоксидные смолы (низкой плотности)	1,20–1,70
Фенольные смолы (наполненные отходами бутадиен-акрилонитрильного сополимера и асбестом)	1,20–1,70
Меламиновые смолы (с фенольным наполнителем)	1,20–2,00
Ацетат целлюлозы	1,20–2,30
Пропионат целлюлозы	1,20–2,30
Ацетат-бутират целлюлозы	1,20–2,30
Фенолоформальдегидные смолы (наполненные опилками)	1,20–2,40
Фенолоформальдегидные смолы (наполненные хлопком)	1,20–2,40
Эпоксидные смолы с инкапсулированным стеклом	1,20–2,90
Эпоксидные смолы со стеклянным наполнителем	1,20–2,90
Эпоксидные смолы с инкапсулированным минеральным наполнителем	1,20–8,70
Полиарилсульфон	1,30
Поликарбонат (ненаполненный)	1,30
АБС-пластик (ударопрочный)	1,30–2,30
АБС-пластик (теплостойкий)	1,30–2,30
АБС-пластик (с обычной ударной прочностью)	1,30–2,30
АБС-пластик (самозатухающий)	1,30–2,30
Полифениленоксид	0,30
Поликарбонат (с 10% стеклонеполнителя)	1,40
Поликарбонат (содержащий до 40% стеклонеполнителя)	1,40–1,50
Полихлортрифторэтилен (<i>CTFE</i>)	1,40–1,50
Акриловые сополимеры	1,50
Полиамид 610	1,50
Полиамид 610 с 20–40% стеклонеполнителя	1,50
Полиамид 12	1,50
Полифениленоксид (модифицированный) <i>Noryl</i>	1,50
Фенольные смолы (наполненные отходами бутадиен-акрилонитрильного сополимера и очесами)	1,50–1,70
Диаллилфталат (с органическими волокнами)	1,50–1,70
Диаллилфталат (стеклонеполненный)	1,50–4,40
Полиацеталь (гомополимер)	1,60
Полиацетальные сополимеры	1,60
Нитрат целлюлозы	1,60
Полиамид 6 (стеклонеполненный)	1,60

Продолжение табл. 3.2

Пластмасса	Значения коэффициента теплопроводности (в $BTU/дюйм/час/фут^2/°F$)
Иономеры	1,70
Полиамид 66	1,70
Полиамид 6	1,70
Политерафторэтилен (<i>TFE</i>)	1,70
Полифторуглероды (<i>FEP</i>)	1,70
Сплав АБС-пластика и поликарбоната	1,70–2,60
Фенолоформальдегидная смола (наполненная асбестом)	1,70–6,40
Меламиновая смола (с целлюлозным наполнителем)	1,90–2,50
Полиамид 11	2,00
Полиарилаты	2,00
Полиэфиры (термопластичные)	2,00
Полиэфиры (с 18% стеклонаполнителя)	2,00
Полифениленсульфид (незаполненный)	2,00
Мочевинформальдегидные смолы	2,00–2,90
Меламиновые смолы (наполненные α -целлюлозой)	2,00–2,90
Диаллилфталат (с минеральным наполнителем)	2,00–7,30
Кремнийорганические смолы (со стеклонаполнителем)	2,20
Полиэтилен низкой плотности	2,30
Полиэтилен средней плотности	2,30–2,90
Фенольные смолы (со стеклонаполнителем)	2,40
Полиамид-11 (со стеклонаполнителем)	2,60
Фенольные смолы (наполненные слюдой)	2,90–4,00
Меламиновые смолы (с тканевым наполнителем, модифицированные фенольной смолой)	2,90
Полиэфиры (премиксы со стеклянной крошкой)	2,90–4,60
Меламиновые смолы (с тканевым наполнителем)	3,10
Полиэтилены высокой плотности	3,20–3,60
Кремнийорганические смолы (с минеральным наполнителем)	3,20–3,80
Полиэфиралкидные гранулированные смолы типа шпатлевки (с минеральным наполнителем)	3,50–7,30
Полиэфиралкидные гранулированные смолы типа шпатлевки (со стеклянным наполнителем)	4,40–7,30
<i>Пенопласты на основе</i>	
АБС-пластиков	0,58
Ацетата целлюлозы	0,31
Эпоксидных смол	0,13–0,36
Фенольных смол	0,20–0,28
Полиэтилена низкой плотности	0,26–0,40
Полиэтилена высокой плотности	0,80–0,92

Окончание табл. 3.2

Пластмасса	Значения коэффициента теплопроводности (в $BTU/дюйм/час/фут^2/°F$)
Полипропилена	0,27–0,43
Полистирола	0,17–0,26
Полиуретанов	0,11–0,52
Силиконов	0,36
Сополимера стирола с акрилонитрилом	0,29–0,32

Из *Handbook of Plastics and Elastomers*. Воспроизведено с разрешения *McGraw-Hill Book Company*.

3.4. Тепловое расширение

Коэффициент теплового (термического) расширения — это относительное измерение длины образца или объема материала, отнесенное к единице температурной шкалы. Значения коэффициента теплового расширения представляют значительный интерес для инженеров-проектировщиков изделий из пластмасс. Пластмассы расширяются или сжимаются в зависимости от температуры в 6–9 раз сильнее, чем металлы. Различие в коэффициентах расширения контактирующих материалов приводит к развитию внутренних напряжений и преждевременному разрушению изделий. Для того чтобы устранить этот эффект, часто используют специальные соединительные узлы в виде резиновых муфт.

Введение в полимер наполнителей, таких как, например, стеклянных волокон, приводит к значительному снижению коэффициентов термического расширения, сближая эти характеристики пластмасс с показателями аналогичных свойств металлов и керамики.

ASTM разработал два схожих метода для измерения коэффициентов термического расширения — коэффициентов линейного расширения (*ASTM D696*) и объемного расширения (*ASTM D864*) соответственно. В технических журналах и справочниках обычно приводятся значения линейного коэффициента термического расширения.

3.4.1. Коэффициент линейного теплового расширения

Для измерения изменений длины образцов рекомендуется использовать dilatометр, изготовленный из плавленого кварца, а отсчет длины проводят с помощью датчика с соответствующей шкалой или линейного дифференциального трансформатора. Для регулирования температуры применяют жидкостную баню. На рис. 3.11 показана схема линейного dilatометра с кварцевой трубкой.

Испытания состоят в том, что предварительно выдержанный в требуемых условиях образец, длина которого обычно составляет 2 или 5 дюймов, помещают в dilatометр. Затем dilatометр с датчиком длины погружают в жидкостную баню. Температура жидкости регулируется по заданной программе. Фиксируются изменения длины в

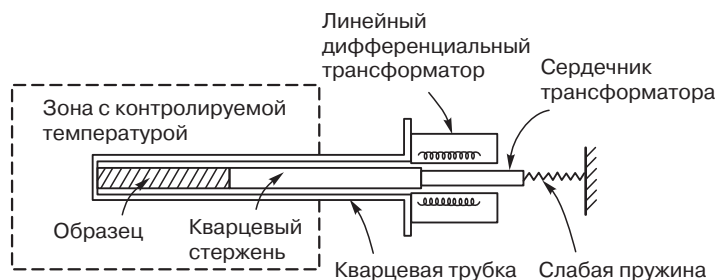


Рис. 3.11. Схематическое изображение дилатометра с кварцевой трубкой (воспроизведено с разрешения *McGraw-Hill Company*)

зависимости от температуры. Коэффициент линейного теплового расширения рассчитывают по формуле

$$X = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T},$$

где X — коэффициент линейного теплового расширения ($^{\circ}\text{C}$); ΔL — изменение длины образца при нагревании или охлаждении; L_0 — длина образца при комнатной температуре; ΔT — разность температур ($^{\circ}\text{C}$), для которой измеряется изменение длины образца.

В табл. 3.3 собраны значения коэффициентов теплового расширения некоторых пластмасс.

Таблица 3.3. Сопоставление коэффициентов теплового расширения для ряда пластмасс

Полимер	Коэффициент теплового расширения 10^{-5} , $\text{см}/\text{см}/^{\circ}\text{F}$
Полиэфир (с низкой усадкой)	0,366–0,605
Полиэфир (со стеклонаполнителем)	0,44–1,14
Фенольформальдегидная смола (наполненная асбестом)	0,44–2,22
Силикон (со стеклянным наполнителем)	0,443
Меламиновая смола (наполненная фенольной смолой)	0,555–2,22
Диаллилфталат (стеклонаполненный)	0,555–2,0
Фенольная смола (армированная тканью и кордом)	0,555–2,22
Диаллилфталат (с минеральным наполнителем)	0,555–2,33
Эпоксидная смола (стеклонаполненная)	0,610–1,94
Полиэфир (с ровингом)	0,66–2,78
Полиамид 610 (с 20–40% стеклонаполнителя)	0,666–1,78
Меламиновая смола (стеклонаполненная)	0,83–1,10
Полиамид 66 (с 30% стеклонаполнителя)	0,83–1,11
Полиэфиралкидные гранулированные смолы типа шпатлевки (со стеклонаполнителем)	0,83–1,39
Полиэфирные смолы, армированные тканью	0,83–1,66

Продолжение табл. 3.3

Полимер	Коэффициент теплового расширения 10^{-5} , см/см/°F
Фенольные смолы (наполненные отходами бутадиен-акрилонитрильного сополимера и очесами)	0,83–1,94
Фенольные смолы (наполненные слюдой)	1,00–1,44
Меламиновые смолы (с тканевым наполнителем, модифицированные фенольной смолой)	1,00–1,55
Сополимер стирола с акрилонитрилом	1,00–2,50
Полиэфир (литевая композиция для листов)	1,11
Полиэфир (премиксы со стеклянной крошкой)	1,11–1,83
Кремнийорганические смолы (с минеральным наполнителем)	1,11–2,22
Меламиновые смолы (с асбестом)	1,11–2,50
Полиэфиралкидные гранулированные смолы типа шпатлевки (с минеральным наполнителем)	1,11–2,78
Эпоксидные смолы (с минеральным наполнителем)	1,11–2,78
Фенольные смолы (наполненные отходами бутадиен-акрилонитрильного сополимера)	1,16
Полифениленоксид (модифицированный, с 20–30% стеклонаполнителя)	1,22
Мочевинформальдегидные смолы	1,22–2,00
Полиэфир (с 18% стекловолокна)	1,39
Меламиновые смолы (армированные тканью)	1,39–1,55
Сополимер стирола с акрилонитрилом (стеклонаполненный)	1,50–2,11
Полипропилен (с инертным наполнителем)	1,61
АБС-пластик (с 20–40% стеклонаполнителя)	1,61–2,00
Полипропилен (стеклонаполненный)	1,66–2,88
Фенолоформальдегидная смола (наполненная опилками)	1,66–2,50
Эпоксидные смолы с инкапсулированным стеклом	1,66–2,78
Эпоксидные смолы с инкапсулированным минеральным наполнителем	1,66–3,33
Полиэфиралкидные гранулированные смолы типа шпатлевки (с синтетическими волокнами)	1,67–3,06
Полиамид 6 (стеклонаполненный)	1,83
Полиамид 11 (стеклонаполненный)	1,78
Полистиролы (обычные и ударопрочные)	1,88–11,70
Поликарбонат (с 10% стекловолокна)	1,90
Сополимер стирола с акрилонитрилом	2,00–2,11
Полиацеталь (с 20% стеклонаполнителя)	2,00–4,50
Полифенилен (с 40% стеклонаполнителя)	2,22
Фенольные смолы (наполненные отходами	2,22

Продолжение табл. 3.3

Полимер	Коэффициент теплового расширения 10^{-5} , см/см/°F
бутадиен-акрилонитрильного сополимера и асбестом)	
Ароматические полиамиды	2,22–2,78
Полихлортрифторэтилен (<i>CTFE</i>)	2,50–3,90
Меламиновые смолы (наполненные α -целлюлозой)	2,22
Меламиновые смолы (наполненные целлюлозой)	2,50
Полиарилсульфон	2,62
Жесткий поливинилхлорид	2,77–10,30
Полиакрилаты	2,78–5,00
Полифениленоксид (модифицированный, ненаполненный)	2,89
Полисульфон	2,89–3,11
Полифенилен (с 25% асбеста)	2,94
Феноксисмолы	3,00–3,20
Диаллилфталат(наполненный синтетическими волокнами)	3,00–3,33
Полифениленсульфид (ненаполненный)	3,05
Полипропилен (немодифицированный)	3,22–5,66
Полистирол (химически модифицированный, теплостойкий)	3,33
Полиэфир (термопластичный)	3,33
АБС-пластик (теплостойкий)	3,33–5,00
Полистирол (общего назначения)	3,33–4,44
Полиакрилаты (ударопрочные)	3,33–4,44
Полипропилен (ударопрочный, модифицированный каучуком)	3,33–4,73
Полиакриловые сополимеры	3,33–5,00
Сплав АБС-пластика и поликарбоната	3,44–4,72
Полиарилат	3,61
Поликарбонат (ненаполненный)	3,64
ПВХ-пластикат (ненаполненный)	3,86–13,90
Полиамид 12 (стеклонаполненный)	4,16
Полиамид 66	4,44
Хлорированный полиэфир	4,44
Полиацеталь (гомополимер)	4,50
АБС-пластик (с обычной ударной прочностью)	4,45–5,55
Нитрат целлюлозы	4,44–6,66
Полиацетали (сополимеры)	4,72
Сополимеры пропилена	4,44–5,27
Полиалломер	4,60–5,55

Окончание табл. 3.3

Полимер	Коэффициент теплового расширения 10^{-5} , см/см/°F
Полиамид 6	4,60
Политерафторэтилен (TFE)	4,60–5,80
Ацетат целлюлозы	4,44–10,00
Полиамид 610	5,00
АБС-пластик (ударопрочный)	5,27–7,22
Полиэтилены (сшитые)	5,55–11,94
Этилцеллюлоза	5,55–11,10
Полиэтилен низкой плотности	5,55–11,10
Полиуретановые эластомеры	5,55–11,10
Полифторуглероды (FEP)	5,60
Полиамид 12	5,78
Полиэтилены высокой плотности	6,10–7,22
Пропионат целлюлозы	6,11–9,44
Ацетат-бутират целлюлозы	6,11–9,44
Полиметилпентен	6,50
Иономеры	6,66
Поливинилиденфторид (VF2)	6,70
Бутадиен-стирольный термопластичный эластомер	7,22–7,60
Полиэтилен средней плотности	7,77–8,89
Полибутилен	8,32
Полиамид 11	8,33
Сополимер этилена с винилацетатом	8,88–11,10
Сополимер этилена с этилакрилатом	8,88–13,80
Полиэтилентерефталат	4,90–13,00

Из *Handbook of Plastics and Elastomers*. Воспроизведено с разрешения *McGraw Book Company*.

3.5. Температура хрупкости (ASTM D746 и ISO 974)

При понижении температуры все пластмассы становятся жесткими и хрупкими. Основная причина этого явления заключается в том, что при низких температурах молекулярная подвижность резко понижена. В случае аморфных полимеров хрупкое разрушение наблюдается в области температур, лежащей много ниже области стеклования. Однако возрастание жесткости происходит уже при приближении к температуре стеклования. В случае же частично кристаллических полимеров жесткость определяется, в основном, степенью кристалличности полимера, поскольку кристаллизация подавляет молекулярную подвижность и лишь незначительно влияет на ударную прочность. Определенную роль в сопротивлении ударным нагрузкам играют размеры кристаллических образований. Чем больше их размеры, тем ниже ударная прочность. Чем в большей мере проявляется пластичность при разрушении,

тем выше наблюдаемые пластические деформации, измеряемые при растяжении полимерных образцов.

Под температурой хрупкости понимается такая температура, при которой пластмассы и эластомеры разрушаются хрупко под действием ударной нагрузки. Другой способ определения этого понятия состоит в том, что температурой хрупкости называют температуру, при которой в выбранных условиях ударного нагружения хрупко разрушаются 50% от общего числа испытанных образцов.

3.5.1. Измерительная аппаратура и методика

Испытательная аппаратура состоит из устройства для установки образцов и приспособления для нанесения по ним удара. Образцы жестко закрепляются в зажимах, образуя консоли. Типичный пример устройства для крепления образцов показан на рис. 3.12. Наиболее часто для определения температуры хрупкости используют приборы с механическим приводом, как это показано на рис. 3.13. Такой прибор снабжен ударником, который вращается с постоянной скоростью $6,5 \pm 0,5$ фут/с. Для создания требуемой температуры используют термоизолированную емкость со встроенной мешалкой, что позволяет поддерживать равномерную температуру. Для поддержания заданной температуры может использоваться любая среда, которая остается жидкой в исследуемом интервале температур.

Образцы обычно штампуют из листовой заготовки. Типичные размеры образцов таковы: длина 1 дюйм, ширина 0,25 дюйма, толщина 0,075 дюйма. Перед испытаниями образцы кондиционируют в соответствии с обычными требованиями подготовки образцов.

Испытания состоят в том, что образцы надежно устанавливают в зажимах. Затем вся установка в сборе помещается в охлаждающую среду. После выдержки в этой среде в течение заданного времени при выбранной температуре испытаний ударник приводится во вращение и наносится единичный удар по образцу. Далее тщательно анализируется характер разрушения каждого образца. Под разрушением понимается разделение образца на две или более отдельных частей или же образование трещины, отчетливо видимой невооруженным глазом.

В процессе испытаний температуру ступенчато повышают на 2 или 5 °C для каждого эксперимента и затем испытания повторяют. Испытания в таком порядке продолжаются, пока не будет четко определена температура, разграничивающая характер разрушения на хрупкий и нехрупкий.

Определяется доля от общего количества испытанных образцов, разрушенных хрупко при каждой температуре. Температура хрупкости рассчитывается по формуле

$$T_b = T_h + \Delta T \left(\frac{S}{100} - \frac{1}{2} \right),$$

где T_b — температура хрупкости, °C; T_h — максимальная температура, при которой хрупко разрушаются все образцы, °C; ΔT — инкремент температуры, °C; S — доля образцов (в процентах), разрушаемая при данной температуре испытаний.

Температура хрупкости играет весьма незначительную роль при выборе материала, поскольку ее значения, получаемые при использованном методе испытаний, отражают действительное поведение материала только в условиях, аналогичных тем, при которых проводились испытания. Тем не менее определение температуры хрупкости по согласованной методике может применяться при спецификации материала, контроле качества, а также при исследовательских работах.

Литература

1. Deanin R.D. *Polymer Structure Properties and Applications*, Cahnners, Boston, MA, 1972, 238 p.
2. *Ibid.*, 273 p.
3. *Symp. on Plastics Testing—Present and Future*. ASTM Publication No. 132, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., 1953, 16 p.
4. «Design Guide» *Modern Plastics Encyclopedia*, McGraw-Hill, New York, 1980–81, 49 p.
5. Nielson L.E. *Mechanical Properties of Polymers*, Reinhold, New York, 1962, p. 138–196.
6. Baer E. *Engineering Design for Plastics*, Reinhold, New York, 1964, 185 p.
7. Miller R.W. «Considerations in the Evaluation of Plastics in Electrical Equipment» *Plast. Design and Processing* (July 1980), p. 25–30.
8. Reymers H. «A New Temperature Index, Who Needs It, What does it Tell» *Modern Plastics* (March 1970), 79 p.
9. *Underwriters Laboratories Publication*, «Polymeric Materials—Long Term Property Evaluations» UL746B.
10. *Modern Plastics Encyclopedia*, Reference 4, 492 p.
11. Ives G.C., Mead J.A., and Riley M.M. *Handbook of Plastics Test Methods*, Iliffe Books, London, England, 1971, 335 p.
12. Deanin, Reference 1, 379 p.
13. Baer, Reference 6, 1025 p.

Рекомендуемые источники

Carslaw H.S. and Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, Oxford, England, 1959.

Jakob M. *Heat Transfer*. Vols. I and II. Wiley, New York, 1949, 1957.

McAdams W.H. *Heat Transmission*, McGraw-Hill, New York, 1954.

4. Электрические свойства

4.1. Введение

Почти невероятное сочетание таких характеристик, как технологичность, низкая стоимость, легкость и отличные изоляционные свойства делают пластмассы одним из наиболее желанных материалов для применения в электротехнике. Хотя в большинстве случаев применение полимерных материалов в этой области обусловлено их электроизоляционными свойствами, тем не менее эти материалы могут быть модифицированы с тем, чтобы придать им проводимость. Последнее достигается введением в материал некоторых добавок, например, технического углерода.

До последнего времени пластмассы рассматривались как «слабые» материалы, не способные нести нагрузку при повышенных температурах. Поэтому использование пластмасс в электротехнике ограничивалось такими применениями общего назначения, при которых на изделие не оказывалась механическая нагрузка. Создание новых современных инженерных пластиков изменило картину в целом. В настоящее время пластмассы могут применяться в таких ситуациях, когда изделия подвергаются воздействию высоких температур, химических агентов, влажности и механических напряжений.

Первичной функцией пластмасс в электротехнике остается их использование как изоляционных материалов, которые разделяют два проводника, через которые переносятся электрические заряды. Функцию изолятора также могут выполнять воздушные прослойки или вакуум. Однако ни воздух, ни вакуум не могут служить механической опорой проводникам. Именно по этой причине так важны механические свойства изоляционных материалов [1].

Типичные области применения полимерных материалов в электротехнике — это кабельная изоляция, терминалы, соединительные элементы, промышленные и бытовые розетки, выключатели и основания для печатных плат.

Типичные требования, предъявляемые к изоляционным материалам таковы.

1. Изолятор должен обладать достаточно высокой диэлектрической прочностью, чтобы противостоять электрическому полю между проводниками.
2. Изолятор должен обладать высокой стойкостью к образованию дуговых разрядов, чтобы они не могли разрушить изоляцию.
3. Изолятор должен противостоять воздействию различных факторов окружающей среды, таких как влажность, температура, радиация.

4. Изолирующие материалы должны обладать достаточной прочностью, чтобы выдерживать вибрацию, удары и воздействие механических нагрузок.
5. Изолятор должен обладать высоким сопротивлением электрическому току с тем, чтобы исключить возможность утечек.

Основные электрические свойства, представляющие практический интерес, — это диэлектрическая прочность, диэлектрическая постоянная, фактор диэлектрических потерь, объемное и поверхностное сопротивление и сопротивление образованию дуговых разрядов.

4.2. Диэлектрическая прочность (ASTM D149, IEC 243-1)

Под диэлектрической прочностью понимают максимальное электрическое напряжение, которое может выдержать изоляция без наступления пробоя. Диэлектрическая прочность выражается в единицах напряжения, отнесенного к толщине изолирующего слоя, например в V/L^1 . Для всех изоляторов характерны очень малые точки утечки через них или вокруг них. Лишь идеальные изоляторы, если таковые вообще существуют в природе, вообще не пропускают токов утечки. Даже небольшие токи вызывают нагрев, что, в свою очередь, приводит к возрастанию токов утечки. Этот процесс медленно усиливается во времени до тех пор, пока приложенное напряжение не достигнет предела диэлектрической прочности, что приводит к явлению, называемому пробоем. Очевидно, что диэлектрическая прочность, которая определяет работоспособность материала как изолятора, является его важнейшей характеристикой. Чем выше диэлектрическая прочность, тем более высокого качества данный материал как изолятор.

В табл. 4.1 приведены типичные значения диэлектрической прочности ряда обычных полимерных материалов.

Для определения диэлектрической прочности изоляции используют в основном три метода. На рис. 4.1 показан общий вид установки, используемой для измерения диэлектрической прочности.

Основой установки является трансформатор переменного напряжения и пара электродов. Для испытаний готовится образец требуемой толщины из исследуемого материала. Как правило, толщина образца составляет 1/16 дюйма.

Первая методика испытаний представляет собой кратковременные испытания. Согласно этой методике, напряжение непрерывно возрастает от нуля до величины, при которой наступает пробой. Скорость возрастания напряжения обычно составляет 100, 500, 1000 или 3000 В/с. Момент пробоя легко устанавливается либо по видимому разрушению, либо по разложению образца. В некоторых случаях образец включается в замкнутую цепь, и разрушение фиксируется по сигналу датчика. В действительности, по этому методу не определяется истинная диэлектрическая прочность материала, поскольку на получаемые результаты влияют различные дополнительные факторы,

¹ Английская мера длины «линия», равная 1/32 дюйма. В табл. 4.1 будет использоваться также величина *mil* (мил), равная 1/1000 дюйма. — *Примеч. науч. ред.*

Таблица 4.1. Диэлектрическая прочность различных полимеров

Материал	Диэлектрическая прочность, В/мил
Фторполимер (PFA)	2000
Хлорированный поливинилхлорид	1200–1500
Жесткий поливинилхлорид	800–1400
Иономер	1000
Термопластичный полиэфир	600–750
Полипропилен	650
Ударопрочный полистирол	650
Фторполимер (FEP)	600
Полиамиды	350–560
Полистирол общего назначения	500
Полиацетали	500
Политетрафторэтилен	500
Полифениленоксид	500
Полифениленсульфид	490
Полиэтилен	480
Поликарбонат	450
АБС-пластик	415
Фенольные смолы	240–340
Фторполимер (PVF ₂)	260

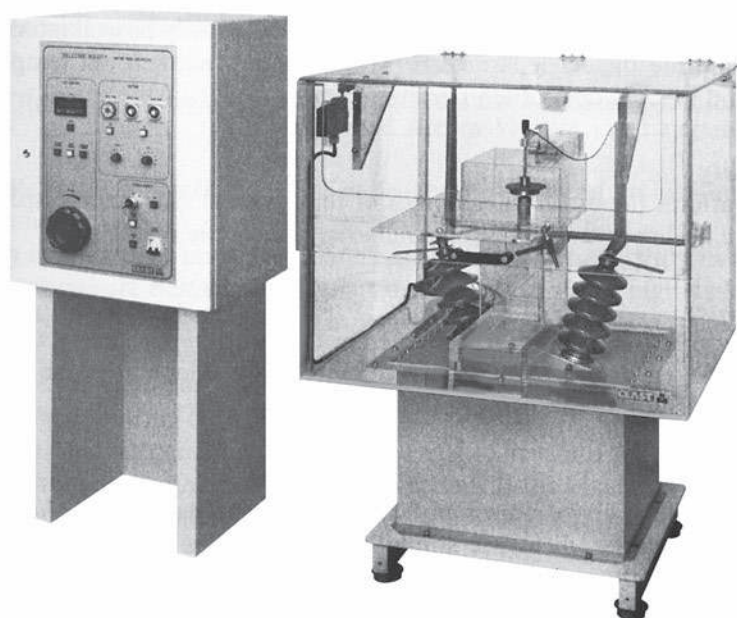


Рис. 4.1. Общий вид установки, используемой для измерений диэлектрической прочности (с разрешения CEAST USA, Inc.)

такие как случайные вспышки, утечки, ток коронного разряда или же намагничивание испытательного оборудования.

Согласно второй методике, нарастание напряжения происходит медленно. В качестве начального напряжения используется уровень, отвечающий приблизительно 50% от пробивного напряжения, которое было определено по методу кратковременных испытаний или указано в спецификации на материал. Далее напряжение возрастает до тех пор, пока не наступит пробой.

По третьей методике (метод ступенчатого подъема напряжения) в качестве начального напряжения также принимается уровень, отвечающий 50% от пробивного напряжения, найденного при кратковременных испытаниях. Затем напряжение увеличивается ступенями, причем при каждом новом повышенном напряжении оно выдерживается постоянным в течение заданного времени. Как общее правило, значения диэлектрической прочности, полученные при использовании этого метода, в большей степени соответствуют реальным свойствам материала, проявляемым при эксплуатации изготовленных из него изделий. Однако в действительности гарантированный уровень безопасности лежит ниже пробивного напряжения, определенного этим методом, поскольку важную роль играет временной фактор [2].

Диэлектрическая прочность материала определяется по формуле:

$$\text{Диэлектрическая прочность (В/мил)} = \frac{\text{Пробивное напряжение, В}}{\text{Толщина образца, мил}}.$$

4.2.1. Факторы, влияющие на результаты испытаний

А. Толщина образца

Диэлектрическая прочность материалов обратно пропорциональна толщине образца в некоторой степени, обычно порядка 0,4 [3]. Чем толще образец, тем большее напряжение необходимо создать для достижения того же градиента напряжения. При повышении напряжения происходит ослабление межмолекулярных связей, обусловленное тепловым расширением из-за нагревания материала. В более толстых образцах также содержатся внутренние пустоты, трещины, следы влаги, неоднородности, что в итоге приводит к возрастанию токов утечки и более раннему разрушению образца [4]. Во многих случаях, когда имеются пространственные ограничения, могут успешно применяться тонкие пленки, обладающие высокой диэлектрической прочностью. Зависимости диэлектрической прочности от толщины образца часто предоставляются производителями полимерных материалов.

Б. Температура

Диэлектрическая прочность понижается с повышением температуры. Если по условиям применения изделие должно эксплуатироваться при различных температурах, то необходимо тщательно изучить зависимость диэлектрической прочности от температуры. Интересно также отметить, что диэлектрическая прочность многих материалов при температуре, ниже комнатной, сохраняется постоянной [5].

В. Влажность

Влажность заметно влияет на диэлектрическую прочность. На результаты испытаний влияет как влажность окружающей среды, так и влага, адсорбированная испытуемым материалом.

Г. Электроды

Результаты измерений диэлектрической прочности зависят от геометрической формы и размеров электродов, используемых при испытаниях, а также от материала, из которого они изготовлены. Как общее правило, пробивное напряжение уменьшается с увеличением площади электродов.

Д. Время

Длительность действия напряжения в значительной степени влияет на получаемые результаты. Как отмечалось в настоящей главе, значения диэлектрической прочности, получаемые при ступенчатом изменении напряжении, всегда оказываются ниже, чем при непрерывном подъеме напряжения при кратковременных испытаниях.

Е. Механические напряжения

Общая закономерность состоит в том, что приложение механических напряжений способствует понижению диэлектрической прочности.

Ж. Условия переработки

Дефекты различного рода, такие как некачественные линии сварки, пустоты, пузыри, различимые линии потоков, обусловленные неудовлетворительным выбором технологического режима, всегда приводят к понижению диэлектрической прочности, иногда на 30–60% в зависимости от степени дефектности образца.

4.2.2. Ограничения метода и интерпретации результатов

При конструировании деталей для применения в электротехническом оборудовании необходимо очень тщательно изучить данные по диэлектрической прочности материала. Если при этом используются литературные данные и не обращается особого внимания на такие факторы, как толщина изделия, влажность в условиях применения, температура, возможность механических напряжений и иных реальных условий эксплуатации детали, то это может привести к катастрофическим последствиям.

Реальные условия применения изделия могут разительно отличаться от условий, в которых проводились испытания материала. Поэтому при выборе материала всегда следует учитывать то, в каких условиях он будет действительно использоваться.

4.3. Диэлектрическая постоянная и фактор потерь (ASTM D150, IEC 250)

4.3.1. Диэлектрическая постоянная (проницаемость)

Диэлектрическая постоянная определяется как отношение заряда, сохраняемого в диэлектрике, который помещен между двумя металлическими пластинками, к заряду, который бы сохранялся в том же объеме, но занятом не испытуемым образцом, а

воздухом (или вакуумом). Альтернативное определение состоит в определении диэлектрической постоянной как отношения емкости объема между двумя металлическими пластинками, заполненного испытуемым материалом, к емкости того же объема, в котором поддерживается вакуум:

$$\text{Диэлектрическая постоянная} = \frac{\text{Емкость диэлектрика}}{\text{Емкость воздуха (или вакуума)}}.$$

Проще говоря, диэлектрическая постоянная характеризует способность материала сохранять электрическую энергию.

Во многих практических приложениях изоляционные материалы используют для создания емкостных устройств. Для этой цели наиболее пригодны полимерные материалы с высокими значениями диэлектрической постоянной. При этом удастся также существенно уменьшить объем устройства. Более того, чем тоньше слой изолятора, тем большей емкостью он обладает. Вследствие этой причины для создания устройств с высокой емкостью широко используют пластмассовую фольгу.

Одна из главных функций изолятора состоит в том, что они должны надежно разделять токонесущие проводники друг от друга и их от земли. Если изолятор используется строго только для этой цели, то диэлектрическая постоянная соответствующего материала должна быть по возможности минимальной. Поэтому для такого применения следует выбирать соответствующий материал с низкой проницаемостью.

В табл. 4.2 приведены значения диэлектрических постоянных ряда различных полимерных материалов. При этом диэлектрическая постоянная воздуха (и вакуума) при всех частотах принимается равной 1.

Таблица 4.2. Диэлектрические постоянные различных пластмасс

Материал	Диэлектрическая постоянная
Меламиновые смолы	5,2–7,9
Поливинилиденфторид (PVF_2)	7,5
Ацетат целлюлозы	3,0–7,0
Фенольные смолы	4,0–7,0
Полиамиды (с 30% стеклонаполнителя)	3,5–5,4
Эпоксидные смолы	4,3–5,1
Полиэфир (термореактивный)	4,7
Ударопрочный полистирол	2,0–4,0
Ацетальные сополимеры (с 25% стеклонаполнителя)	3,9
Полиамиды	3,5–3,8
Полиацетали	3,7
Поликарбонат (с 30% стеклонаполнителя)	3,48
Полисulfон (с 30% стеклонаполнителя)	3,4
Полиэфир (термопластичный)	3,2
АБС-пластик	3,2
Сополимер стирола с акрилонитрилом	3,0
Полистирол общего назначения	2,7
Фторполимеры (PFA , FEP)	2,1

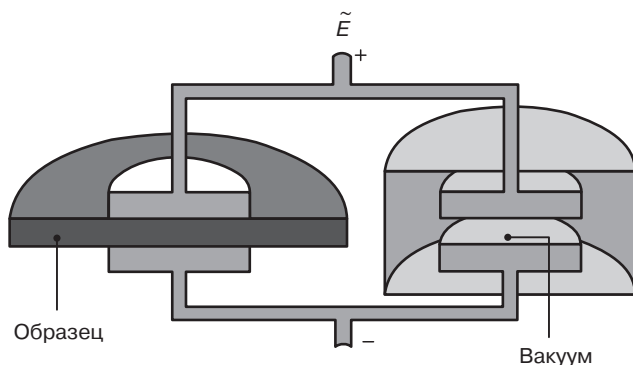


Рис. 4.2. Схематическое изображение метода измерения диэлектрической постоянной (с разрешения Bayer Corporation)

Значения диэлектрической постоянной различных материалов лежат в диапазоне от 2 до 20.

Измерения диэлектрической постоянной выполняются исключительно просто. Испытуемый образец помещается между двумя электродами (рис. 4.2) и измеряется его емкость. Затем образец удаляется, и объем между электродами заполняется воздухом. Вновь измеряется емкость. Диэлектрическая постоянная выражается как отношение результатов этих двух измерений.

На значения диэлектрической постоянной влияют такие факторы, как частота, напряженность электрического поля, температура и влажность материала.

4.3.2. Фактор потерь

Во всех случаях при применении пластмасс в электротехнике желательно до минимума снизить диэлектрические потери. Электрические потери свидетельствуют о неэффективности применения материала как изолятора. Фактор потерь является количественной мерой такой неэффективности изоляционных материалов. Фактор потерь показывает, какое количество энергии рассеивается в изоляторе при создании напряжения в сети [6].

Фактор диссипации представляет собой отношение проводимости объема материала, в котором использован изолирующий материал, к его восприимчивости, или же отношение параллельно соединенных реактивности и сопротивления.

Для большинства пластмасс характерны низкие значения фактора потерь при комнатной температуре. Однако с повышением температуры фактор потерь растет, что свидетельствует о неэффективности работы электрической цепи в целом. Часто также используется термин коэффициент потерь, который представляет собой произведение фактора потерь и диэлектрической постоянной. Эта величина характеризует суммарные потери мощности в изоляционных материалах.

4.4. Измерения электрического сопротивления

Как уже упоминалось, основной задачей изолятора является разделение токонесущих элементов друг от друга и от земли, а также осуществление механической поддержки проводников. Естественно, что наиболее желательной характеристикой изолятора является его возможность противостоять токам утечки в электрических сетях. Чем выше электрическое сопротивление изолятора, тем он лучше. Если не учитывать этого обстоятельства, то при использовании материала при изготовлении силовых деталей электрического оборудования возможны такие неприятности, как возгорание, электрические удары и нанесение ущерба обслуживающему персоналу.

Сопротивление изоляции подразделяется на два показателя:

- объемное сопротивление;
- поверхностное сопротивление.

Объемное сопротивление представляет собой отношение постоянного напряжения, приложенного к двум электродам, которые находятся в контакте с испытуемым образцом, к току, который проходит через объем этого образца. Проще говоря, объемное сопротивление — это сопротивление току утечек через объем материала [7]. Объемное сопротивление зависит от природы материала. Термин, который наиболее часто используют инженеры-проектировщики, — объемная сопротивляемость. Эта величина определяется как отношение градиента потенциала, направленного параллельно току, к плотности тока, проходящего через материал. Таким образом, объемная сопротивляемость — это электрическое сопротивление между противоположными сторонами единичного кубика данного материала при некоторой температуре [8]:

$$\text{Объемная сопротивляемость } (\rho), \text{ Ом}\cdot\text{см} = \frac{A}{t} (R_v),$$

где A — площадь образца; t — толщина образца; R_v — объемное сопротивление (в Ом).

Высокая объемная сопротивляемость материала желательна, если этот материал должен обеспечивать превосходные изоляционные свойства изделия.

В табл. 4.3 приведены типичные значения объемной сопротивляемости ряда традиционных пластмасс.

Поверхностное сопротивление определяется как отношение постоянного напряжения, приложенного к электродам, которые располагаются так, чтобы ток распространялся по тонкому влажному слою или иным полупроводящим слоям на поверхности материала. Проще говоря, поверхностное сопротивление определяет сопротивление токам утечек вдоль поверхности изолятора.

Поверхностное сопротивление зависит от качества и чистоты поверхности изделия. Если на поверхности имеются следы масла или загрязнений, то поверхностное сопротивление снижается.

Методика определения поверхностного сопротивления довольно сложна. Она подробно описана в стандарте *ASTM D257* (или рекомендациях *IEC 93*), где также устанавливаются требования к электродам и применяемой аппаратуре.

Таблица 4.3. Объемная сопротивляемость различных пластмасс

Материал	Объемная сопротивляемость, Ом·см*
Меламиновые смолы (наполненные асбестом)	$1,2 \cdot 10^{12}$
Мочевиноформальдегидные смолы	$10^{12} - 10^{13}$
Фенольные смолы (наполненные асбестом)	$10^9 - 10^{13}$
Ацетальные сополимеры	10^{14}
Полиакрилаты	10^{14}
Эпоксидные смолы	10^{14}
Полистирол	10^{16}
Сополимер стирола с акрилонитрилом	10^{16}
АБС-пластик	$5 - 10^{16}$
Поликарбонат	$2 - 10^{16}$
Пластифицированный поливинилхлорид	$10^{11} - 10^{15}$
Полиамид 66	$10^{14} - 10^{15}$
Полиацеталь (гомополимер)	10^{15}
Жесткий поливинилхлорид	10^{15}
Полиэтилен	10^{16}
Полипропилен	10^{16}
Термопластичный полиэфир	$3 \cdot 10^{16}$
Полисульфон	$5 \cdot 10^{16}$
Полифениленоксид	10^{17}
Политетрафторэтилен	10^{18}
Фторполимер (FEP)	$2 \cdot 10^{18}$

* При 50% относительной влажности и 73 °F.

Как температура, так и влажность заметно влияют на поверхностное сопротивление. Принять за общее правило, чем выше температура и влажность, тем ниже оказывается поверхностное сопротивление.

4.5. Сопротивление дугообразованию (ASTM D495)

Под сопротивлением дугообразованию имеют в виду способность материала противостоять действию высокого напряжения, приводящему к образованию электрической дуги. Эту способность выражают как время до момента формирования проводящего канала. Разрушение вследствие образования дуги характеризуется карбонизацией поверхности, формированием треков, нагреванием вплоть до образования раскаленной области или возгоранием. Во всех случаях при сближении проводников возникновение дугового разряда между ними представляется неизбежным. Типичными примерами электрических устройств, в которых образование дуги ведет к разрушению изделия, являются выключатели, прерыватели, автоматические распределительные коробки. Другой случай более мягкого проявления эффекта дугообразования это формирование поверхностных треков.

Под образованием треков понимается явление, при котором под действием высокого напряжения на поверхности изолятора появляются утечки или ложные пути переноса заряда. Все это медленно, но неизменно приводит к карбонизации

поверхности, проявляющейся в виде тонких проводящих путей, соединяющих электроды. Образование треков ускоряется в присутствии поверхностных загрязнений, таких как следы масла, а также при увлажнении поверхности.

Сопротивление дугообразованию или формированию треков зависит от природы полимерного материала. Так, например, фенольные смолы легко карбонизируются, и тем самым слабо противостоят дугообразованию. Такие пластмассы, как алкидные и меламиновые смолы, фторсодержащие полимеры, напротив, прекрасно сопротивляются образованию дуги и треков.

Разрушение, происходящее при дугообразовании и формировании треков, вовсе не обязательно связано с карбонизацией. Многие полимеры, такие, как например, полиакрилаты, вообще не карбонизируются. Однако при их разложении образуются горючие газы, которые приводят к разрушению изделия за короткое время.

Сопротивление пластмасс дугообразованию может быть значительно повышено путем введения различных добавок, например, стекла, минералов, асбеста и иных неорганических веществ.

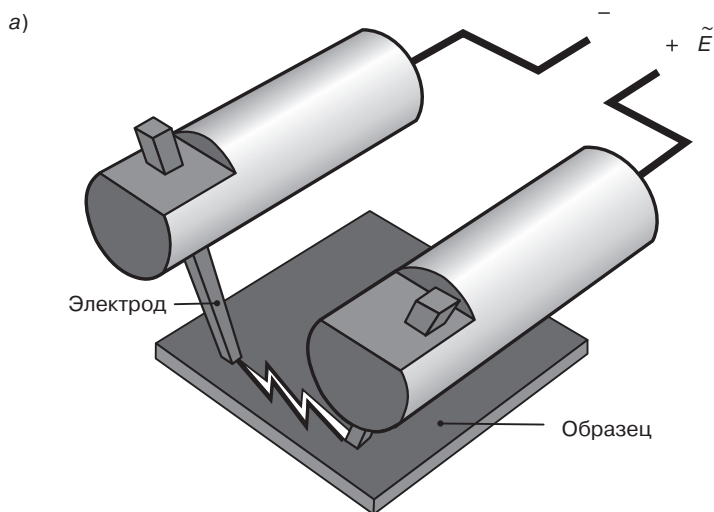
В табл. 4.4 приводятся характеристики сопротивления дугообразованию ряда обычных полимерных материалов.

Определение сопротивления дугообразованию стандартным методом всегда представлялось довольно затруднительным, поскольку многочисленные авторы использовали различные методики. *ASTM* предложил четыре базовые метода для решения этой проблемы.

Согласно наиболее часто используемому методу *ASTM D425* определяется сопротивление образованию дуги при высоком напряжении и низком токе на сухих твердых образцах. Эти испытания, однако, имеют смысл только для первичного отбора полимерных материалов, оценки влияния изменения состава композиции и контроля качества. Поскольку такие испытания проводятся на чистых образцах в

Таблица 4.4. Сопротивление дугообразованию ряда пластмасс

Материал	Сопротивление дугообразованию, с
Поликарбонат (с 20–40% стеклонаполнителя)	5–170
Поликарбонат	10–120
Ударопрочный полистирол	20–100
АБС-пластик	50–85
Полистирол общего назначения	60–80
Жесткий поливинилхлорид	60–80
Полисulfон	75–290
Мочевинформальдегидная смола	80–150
Иономер	90–140
Сополимер стирола с бутадиеном	100–150
Эпоксидные смолы	120–150
Полиацеталь (гомополимер)	130
Полиэтилен низкой плотности	136–160
Полипропилен	135–180
Политетрафторэтилен	> 200
Полиакрилаты	Треки не образуются



Электроды, между которыми действует высокое напряжение, периодически прижимаются к образцу до тех пор, пока не образуется проводящая дорожка на поверхности материала.

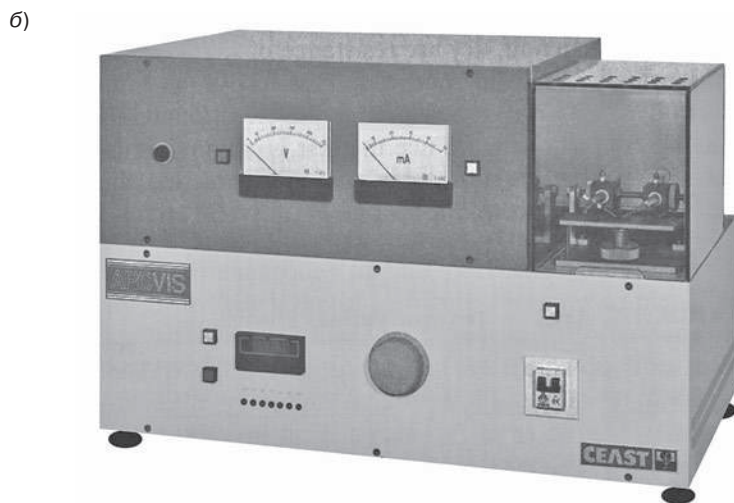


Рис. 4.3. Типичная схема измерения сопротивления дугообразованию (с разрешения *Bayer Corporation*) (а) и промышленный прибор, используемый для этой цели (с разрешения *CHEAST USA, Inc.*) (б)

лабораторных условиях, их результаты вряд ли пригодны для прямого применения на практике, так что их непосредственное применение невозможно.

На рис. 4.3, *а* и *б* показаны примеры типичных испытательных устройств для определения сопротивления дугообразованию. Напряжение в этих установках подается прерывистыми порциями и увеличивается ступенями до тех пор, пока не будет достигнута предельная ситуация. Сопротивление дугообразованию оценивается по времени от начала приложения напряжения и до образования дуги и выражается в секундах.

Метод *ASTM D2132* определяет процедуру оценки влияния пыли и тумана на условиях образования треков на поверхности образца. Методика испытания предусматривает проведение измерений в туманной камере при нанесении контролируемых количеств пыли на поверхность материала. Предельные условия определяются либо по эрозии поверхности, либо по образованию треков. Метод также позволяет оценить влияние контролируемой влажности на условия образования треков на поверхности электрической изоляции. Согласно предлагаемой методике, образец в виде наклоненной пластинки первоначально погружается в водный раствор хлорида аммония, содержащий также смачивающий агент. Предельные условия определяются по образованию треков.

Метод, описанный в стандарте *ASTM D2303*, также предлагает проводить испытания с образцом, представляющим собой наклонно установленную пластинку, на которую нанесена вода. Определяются условия наступления эрозии или появления треков на поверхности. Согласно предлагаемой методике, угол наклона образца составляет 45 град, а заряд с электродов разряжается на поверхности периодически при контролируемой скорости ступенчатого возрастания напряжения. Эрозия или образование треков оцениваются визуально.

4.6. Требования *UL*

Никакие обсуждения и рекомендации по электрическим свойствам и методам испытаний полимерных материалов не могут рассматриваться как достаточно полные без соблюдения требований организации *Underwriters Laboratories (UL)*, выраженных в их кодах, стандартах и спецификациях [9].

Как уже говорилось, *UL* — это независимая некоммерческая организация, созданная для испытаний полимерных материалов с основной целью обеспечения безопасности их применения и разработки соответствующих стандартов, обеспечивающих безопасное применение этих материалов. Более подробное обсуждение возможностей этой организации дается в главе 19.

В настоящее время наблюдается увеличение количества конструкторов, занимающихся вопросами применения пластмасс в различных областях. В зависимости от конкретных задач, полимерные материалы могут использоваться как изоляция, как несущая конструкция и просто как коробка, в которую помещаются неизолированные детали электрических схем. В этом отношении полимер должен удовлетворять самым различным требованиям, в результате которых должна обеспечиваться пожаростойкость, должна быть исключена возможность удара электрическим током

и в целом гарантирована безопасность обслуживающего персонала. Очевидно, что пластмассовые детали, используемые в электротехнике, должны иметь адекватные свойства, обеспечивающие требования техники безопасности. Сотрудники *Underwriters Laboratories* разработали ряд рекомендаций, направленных на решение этих проблем. Выполнение этих рекомендаций является весьма желательным при использовании полимерных материалов.

4.6.1. Свойства материала

Свойства материалов, которые оцениваются *UL* применительно к использованию полимеров в электротехнике, делятся на две большие группы, определяющие кратковременное и долговременное поведение материала.

А. Кратковременные испытания — *UL 746 А*

Рекомендации *UL 746 А* описывают условия кратковременных испытаний полимерных образцов. Соответствующие испытания касаются механических свойств, возгораемости, термических характеристик рассматриваемых материалов, которые представляют необходимые данные для производителей полимеров, специалистов, занимающихся их переработкой, фирм, выпускающих конечные изделия, а также инженеров по технике безопасности.

Испытания, относящиеся к определению механических свойств, включают в себя измерения прочности при растяжении, ударной прочности по Изоду, свойств, определяемых методом изгиба, прочности при сдвиге, характеристик прочности контактов для адгезивов и твердости по дюрометру.

Электрические свойства, подлежащие определению, это диэлектрическая прочность, сопротивление или проводимость изолятора на постоянном токе, сопротивление дугообразованию при приложении высокого напряжения и низкого тока на сухих образцах, а также индекс сопротивления твердых изоляторов образованию дуги или треков при приложении высокого напряжения.

К числу термических свойств, определяемых согласно указанным рекомендациям, относятся измерения деформационной теплостойкости, температуры размягчения по Вика и температуры размягчения, определенной по методу «шарик-в-кольце». К числу кратковременных испытаний также относится оценка стойкости к возгораемости. В рекомендациях, кроме того, кратко описаны такие методы, как возгораемость при контакте с раскаленной проволокой, возгораемость при образовании дуги с большим проходящим через нее током, сопротивляемость возгоранию при образовании высоковольтной дуги, а также возгораемость под действием горячего газа.

Упомянуты также еще три методики кратковременных испытаний — сохранение размерной стабильности, сопротивление действию химических агентов, а также тест на идентификацию полимерного материала.

Большинство из рекомендуемых методов основываются на стандартах *ASTM*.

Б. Долговременные испытания — *UL 746 В*

Рекомендации *UL 746 В* охватывают методики испытаний на определение долговременного поведения полимерных материалов. Здесь рассматриваются механические,

электрические, термические свойства и горючесть полимеров, предоставляя соответствующие данные для производителей материалов, специалистов по их переработке и инженеров по технике безопасности.

Исследования поведения полимерных материалов в условиях долговременных испытаний представляет основной интерес для специалистов *UL*. В соответствующих рекомендациях подробно описана методика определения относительных термических индексов. Этот параметр показывает способность материала сохранять то или иное конкретное свойство при воздействии повышенной температуры в течение достаточно длительного периода времени. Относительный термический индекс характеризует термическую устойчивость материала.

К числу других долговременных свойств материала, подлежащих определению в соответствии с рассматриваемыми рекомендациями, относятся изменения свойств при выдержке в условиях окружающей среды, ползучесть и длительная химическая стойкость.

4.6.2. Оценка свойств полимерных материалов, используемых в электротехническом оборудовании (*UL 746 C*)

Рекомендации *UL 746 C* предоставляют данные, которые являются основанием для выбора материала применительно к конкретным условиям его применения. Наилучшим образом использование этих рекомендаций может быть понято из приводимого ниже примера.

Представим себе, что нам нужно выбрать материал для изготовления корпуса, в который должно быть установлено стационарное оборудование, состоящее из неизолированных электрических цепей. Выбор материала производится в следующей последовательности.

Во-первых, в материалах *UL 746 C* необходимо найти соответствующую таблицу, которая содержит наши требования. В рассматриваемом случае стационарного оборудования этому отвечает выбор табл. 4.5 (которая заимствована из рекомендаций *UL 746 C* и рис. 6.1). Эта таблица содержит требования к материалам, используемым для изготовления стационарного оборудования. Прежде всего, необходимо рассмотреть требования к возгораемости. Для обсуждаемого случая материал должен обладать минимальной возгораемостью, чему отвечает Класс 5V. Ни один образец, относящийся к материалам этого класса, не должен загораться и/или гореть ярким пламенем в течение более чем 60 с после того, как к нему подносится открытый огонь в пятый раз. И, кроме того, при испытаниях на поджигание вертикально расположенного образцов ни от одного из них при возгорании не должны отделяться капли.

Оценка результатов, включенных в табл. 4.5, основывается на опытах, проводившихся со стандартными образцами или конечными изделиями, которые испытывались в условиях, максимально приближенных к реальным условиям применения, включая условия неправильной эксплуатации. Необходимо тщательно изучить все особенности применения материала, если они выходят за рамки условий выполненных испытаний. Во многих случаях бывает достаточно сопоставить предполагаемые условия применения с имеющимися литературными данными. Если материал

Таблица 4.5. Требования, предъявляемые к материалам, предназначенным для изготовления стационарного оборудования
Часть 1 – Условия применения

Начало		
<div>Материалы, предназначенные для изготовления корпусов для размещения неизолированных деталей электрического оборудования или изолированных деталей, если толщина изоляции не превышает 0,71 мм (0,028 дюйма)^{a,b,c}</div> <div>Материалы, предназначенные для изготовления корпусов для размещения изолированных деталей электрического оборудования, если толщина изоляции составляет не менее 0,71 мм (0,028 дюйма)^{a,b,c}</div>		
Часть 2 — Требования при применении		
Минимальный рейтинг по возгораемости	5V ⁱ	5V ⁱ
Электрические/механические свойства в соответствии с табл. 8.1	Да	Да
Диэлектрическая прочность по п. 12.1	Да	Нет
Возгораемость массивных частей по разделу 2.1	Да	Да
Сопротивление разрушению по п. 23.1	Да	Нет
Сопротивление удару по разделу 24	Да	Да
Сопротивление ультрафиолету по п. 26.1	Да ^f	Да ^f
Выдержка в воде и водопоглощение		
А. Свойства по п. 27.1	Да ^f	Да ^f
Б. Размеры по п. 27.2	Да	Нет
Необычные условия применения по п. 28.1	Да	Да
Особо жесткие условия по п. 29.1	Да	Да ^g
Напряжение в отливках — деформации при релаксации по п. 62.1	Да	Да ^d
Остаточное влияние напряжений в отливках — деформации при релаксации — по п. 31.1	Да	Да ^g
Соединение с изолированными трубками	Да ^h	Да ^h
Восстановление деформаций по п. 32.1	Да ^e	Да ^e
Термическая долговечность по разделам 33–39	Да	Да
Объемное сопротивление по разделу 16	Да	Нет

^a Толщина изоляции элементов в рассматриваемом оборудовании должна быть эквивалентна 0,71 мм (0,028 дюйма) и отвечать требованиям, предъявляемым к этим элементам.

^b Как общее правило, требуется, чтобы толщина изоляции внутренних элементов оборудования составляла 0,71 мм (0,028 дюйма). Если же толщина изоляции или изоляции на проводах меньше, чем 0,71 мм (0,028 дюйма) — при облегченных условиях применения — то такие элементы могут использоваться только в рамках, каналах или иных внутренних деталях конструкции, где мало вероятен контакт с пользователем оборудования; в противном случае необходимо, чтобы эквивалентная толщина изоляции была не меньше 0,71 мм (0,028 дюйма).

^c Эмалированная проволока в магнитах должна рассматриваться как неизолированный элемент оборудования.

^d Эти испытания необходимы только в том случае, если разрушение материала приводит к возникновению напряжения узлах соединения на клеммах оборудования. Если испытания на деформацию были успешно проведены с конструкцией в целом или отдельно для деталей конструкции в рамках регулярных испытаний этих деталей, то принимается, что соответствующие напряжения не приведут к возникновению недопустимых напряжений на клеммах оборудования.

^e Испытания этого типа следует применять только в том случае, когда соответствующая деталь монтируется на корпусе оборудования или представляет собой часть корпуса.

^f Эти испытания проводят только в том случае, если оборудование предназначено для использования вне помещений и подвергается воздействию климатических условий.

^g Эти испытания проводят в том случае, когда оборудование эксплуатируется без регулярного обслуживания.

^h Эти испытания проводят, если оборудование периодически подсоединяется к электрической сети. Под этим подразумевается осуществление константа металла с металлом. Если корпус оборудования включается в систему, состоящую из нескольких соединенных между собой элементов при любом месте включения в эту систему, то места контактов должны быть оценены в соответствии с требованиями «Стандарта на корпус для электрическое оборудование», согласно UL 50. Если пластмассовый корпус предназначен для установки в жестко собранную конструкцию, то необходимо проведение испытаний, в которых оборудование подвергается действию крутящих и изгибающих моментов в соответствии с требованиями «Стандарта на контроль промышленного оборудования», согласно UL 508.

ⁱ 5V = 5VA означает, что материал отвечает требованиям испытаниям на горючесть 5-дюймовых образцов, описанных в стандарте «Горючесть — 127 мм (5 дюймов). Горение. Раздел 19».

удовлетворяет минимальному уровню требований, то не требуется проводить никаких дополнительных испытаний. Если же это не так, то следует провести соответствующие испытания конечного продукта.

Аналогичные таблицы, отражающие последовательность принятия решений и требования к результатам испытаний, разработаны также в *Underwriters Laboratories* для корпусов переносного электротехнического оборудования. Во всех случаях процедура определения пригодности данного полимерного материала, используемого для изготовления оборудования одна и та же. Если же деталь, изготавливаемая из полимера, предназначена для тех или иных специальных целей, она должна пройти через специализированную процедуру испытаний. Это касается таких случаев, как изготовлен плат, адгезивов, пламегасителей, изделий, покрываемых металлом.

4.6.3. Полимерные материалы — Изделия (UL 746 D)

Этот стандарт охватывает требования, предъявляемые к отливкам или деталям, полученным механической обработкой. Он предусматривает контроль на идентичность материала изделия, которые подвергаются различным операциям транспортировки, литья или механической обработки. В стандарте также приведены сведения относительно возможного влияния простейших операций смешения и компаундирования на опасность возгорания, электрического удара или нанесения увечий обслуживающему персоналу.

4.7. Экранирование (защита) от электромагнитных/радиопомех (EMI/RFI) [10]

4.7.1. Введение

Взрывной рост производства компьютеров, телекоммуникационных и электронных систем привел к острой необходимости понимания и разработки соответствующих методов испытаний для разработки стандартов для оценки экранирующих свойств полимерных материалов согласно требованиям EMI/RFI. Требуется, чтобы все электронные устройства были совместимы между собой с точки зрения возбуждаемых ими электромагнитных полей. *EMI* — это акроним термина «*electromagnetic interference*» — электромагнитные помехи. Это явление связано с неограниченным рассеянием электрической и магнитной энергии, которую излучает любое электронное устройство и которая попадает на другое устройство. Термин *EMI* относится к ситуации, когда сбои в работе принимающего устройства связаны с этим эффектом. Любой электрический сигнал, частота которого лежит в диапазоне от постоянного тока до области гамма-излучения, то есть весь диапазон электромагнитных колебаний, может быть источником *EMI*.

В большинстве случаев, представляющих практический интерес, проблемы, связанные с *EMI*, относятся к диапазону частот от 1 кГц до 10 ГГц. Эта область спектра отвечает так называемому диапазону радиочастотных помех — «*radio frequency interference*» (*RFI*), который покрывает область радио- и звуковых частот. *EMI* — это то, с чем каждый из нас сталкивается ежедневно. Основные источники *EMI* — освещение, статическое электричество, теле- и радиоприемники, электродвигатели, различные измерительные электронные приборы, пейджинговые системы, излучение радаров. Наиболее частые приемники *EMI* — микропроцессоры, компьютеры Hi-Fi-устройства, радио- и телевизионные аппараты, системы дистанционного контроля, системы авианавигации, люди и животные.

Тот факт, что различные электронные устройства являются одновременно и источниками и приемниками *EMI* порождает двойственную проблему. Поскольку электромагнитное излучение, попадающее в устройство, может вызвать сбои в его работе, производители заинтересованы к защите этих устройств в целом. Одновременно такая защита должна отвечать требованиям снижения электромагнитного излучения, эмитируемого в атмосферу.

Переход от металла к пластмассам для изготовления коробов электронного оборудования ставит задачу защиты от *EMI*. Пластмассы являются изоляторами, и поэтому электромагнитное излучение свободно проходит через эти материалы без заметного импеданса или сопротивления. Металлы, будучи проводниками, отражают или поглощают электромагнитную энергию, так что нежелательное поступление энергии легко отводится в землю. Экранирование — это термин, используемый для оценки эффективности «блокирования» *EMI*. Экранирование (или защита) осуществляется с помощью проводящих барьеров, которые отражают поступающую электромагнитную энергию или отводят ее в землю.

Защита от *EMI/RFI* осуществляется различными способами. Два из них наиболее широко распространены на практике. Они состоят в покрытии пластмассового

корпуса слоем проводящего материала, или же в придании пластмассе, из которой изготавливается корпус устройства, проводящих свойств. Создание проводящих полимерных материалов — это сравнительно новый способ защиты, и в настоящее время он находится в основном на стадии разработок, так что его коммерческие возможности крайне ограничены. Метод покрытия корпуса проводящим слоем — это довольно традиционный прием, который используется в различных вариантах. Принцип здесь состоит в том, что уже готовый корпус покрывается проводящим слоем с тем, чтобы создать клетку Фарадея (т. е. предполагается, что электромагнитное поле внутри этой клетки равно нулю), что и создает защиту от *EMI*. В качестве альтернативного метода создания защиты популярность приобретает электролитическое платинирование.

4.7.2. Требования и стандарты

В США требования к стандартам в рассматриваемой области устанавливает Федеральная комиссия по коммуникациям — *Federal Communications Commission (FCC)*. Требования *FCC* относятся как к количеству *EMI/RFI*, выбрасываемому в атмосферу, и к энергии, поглощаемой электромагнитными устройствами. Обе эти величины, согласно требованиям *EMI/RFI*, фиксируются датчиками в числовой форме. Задача защиты электронных устройств возлагается как на их производителя, так и на конечного потребителя. *FCC* не контролирует ни способа защиты, ни дает рекомендаций по их применению: важно только, чтобы защита отвечала предъявляемым требованиям.

Требования к контрольной аппаратуре разделяют их на два класса. Класс *A* относится исключительно к устройствам, продаваемым на коммерческой основе. Класс *B* предназначен для индивидуальных потребителей. Для каждого из этих классов *FCC* устанавливает максимально допустимый уровень энергии, выделяемой электромагнитным устройством.

Европейские и японские стандарты несколько отличаются от требований, установленных *FCC*. В настоящее время не существует универсальных стандартов на методы соответствующих испытаний, предоставляя производителям использовать свои собственные правила контроля.

4.7.3. Измерения эффективности защиты

Эффективность защиты от электромагнитного излучения наиболее удобно измерять по степени затухания. Под затуханием имеется в виду относительное уменьшение интенсивности электромагнитного сигнала, ослабленного при прохождении защиты. Затухание измеряется в децибелах (дБ) и представляет собой отношение мощности сигналов до и после защиты. Эффективность защиты определяется в логарифмической шкале, и это означает, что величина затухания в 50 дБ в 10 раз больше, чем величина затухания в 40 дБ, т. е.:

$$\text{Общая эффективность защиты} = 10 \lg(P_i/P_t) \text{ дБ},$$

где P_i — мощность поступающего потока, Вт/м²; P_t — мощность прошедшего сигнала, Вт/м².

Таблица 4.6. Уровни поглощения, обеспечивающие различные степени защиты

Уровни поглощения при защите	
0–10 дБ	Очень слабая защита
10–30 дБ	Минимальный уровень защиты
30–60 дБ	Средний уровень защиты
60–90 дБ	Хорошая защита
90–120 дБ	Прекрасная защита
Более 120 дБ	Предел существующих возможностей

В табл. 4.6 приведены характерные значения уровней поглощения, которые обеспечивают различную степень защиты.

В настоящее время используются четыре методики определения эффективности защиты от электромагнитного излучения:

- испытания с открытым полем;
- защищенный короб;
- коаксиальная передающая линия;
- защищенное помещение.

А. Техника испытаний с открытым полем

Эта методика испытаний в наибольшей степени напоминает реальные условия работы изделия. Однако эти испытания проводят с использованием металлизированной пластины, которая не вполне соответствует реальному электромагнитному устройству. Поэтому надежные предсказания в соответствии с требованиями стандарта могут быть получены только при натурных испытаниях реального оборудования.

На рис. 4.4 показана схема обсуждаемого метода измерения. Испытания с открытым полем позволяют проводить измерения в открытом пространстве с тем, чтобы учесть как излучаемую, так и кондуктивную эмиссию. Обе составляющие измеряются прибором, который позволяет оценить эмиссию на уровне шума. Итогом измерений является количественная оценка эффективности защиты.

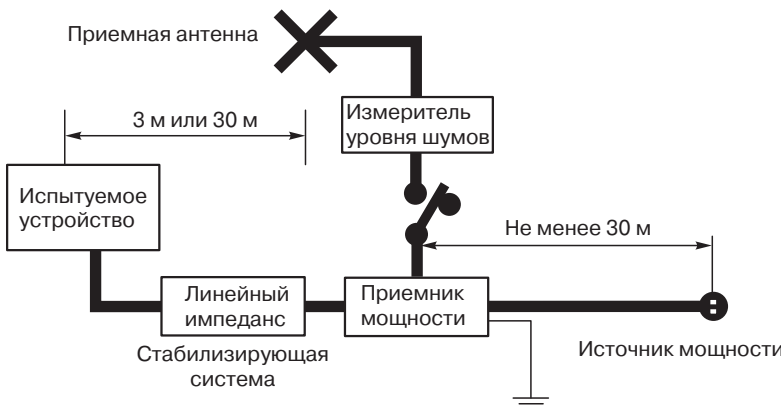


Рис. 4.4. Схема установки для измерений защиты по методу открытого поля (из «EMI/RFI Shielding Guide» — Справочника по защите от помех; воспроизведено с разрешения GE Plastics)

Б. Техника защищенного короба, коаксиальной передающей линии и защищенного помещения

Испытания, проводимые по указанным методикам, предназначены прежде всего для быстрого сопоставления характеристик двух и более потенциальных вариантов защиты. Испытания обычно проводят на образцах, а не на электромагнитных устройствах. Более того, результаты этих испытаний не могут использоваться для предсказания технических характеристик изделий.

Метод защищенного короба основан на проведении испытаний в замкнутой емкости, как схематично показано на рис. 4.5. Сущность метода состоит в том, что непосредственно измеряется сигнал *EMI*, выходящий за пределы короба, и этот сигнал сравнивается с сигналом, создаваемым внутри короба. Эффективность защиты оценивается как отношение этих сигналов. Пластина, покрытая защитным слоем, помещается над отверстием, и измеряются эмитированный и прошедшие сигналы. В качестве эталона сравнения используют пластины, изготовленные из чистой меди или алюминия. Этот метод пригоден для измерений на частотах, не превышающих 500 МГц.

Метод коаксиальной передающей линии (по *ASTM D4935*) представляет собой способ оценки эффективности защиты от электромагнитного излучения плоского слоя материала от плоской волны, распространяющейся от отдаленного источника излучения. Испытания состоят в том, что эталонный образец закрепляется на специально изготовленном штативе. Поглощаемая мощность (или напряжение) измеряется при различных частотах. Затем эталонный образец заменяется на образец, свойства которого подлежат измерению, и процедура испытаний повторяется. Эффективность защиты определяется по отношению мощности, поглощенной при наличии и при отсутствии испытуемого образца при одной и той же мощности излучения. Результаты испытаний выражаются в децибелах.

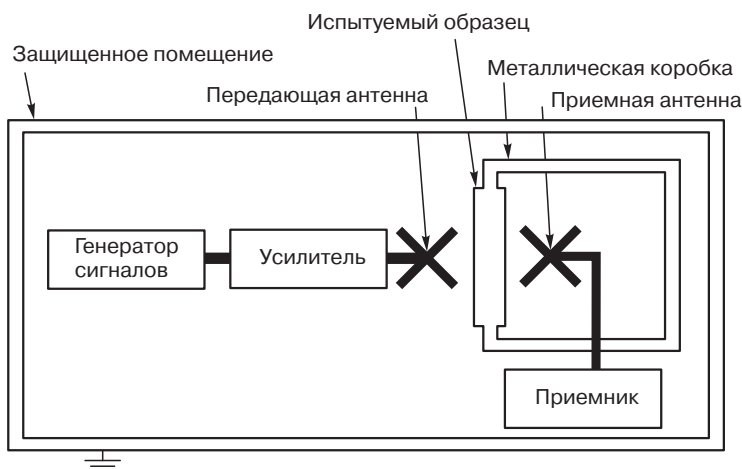


Рис. 4.5. Метод защищенного короба (из «*EMI/RFI Shielding Guide*» — Справочника по защите от помех; воспроизведено с разрешения *GE Plastics*)

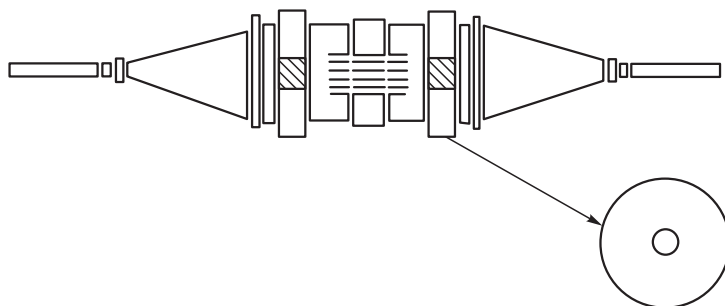


Рис. 4.6. Общая схема экспериментальной установки для определения эффективности защиты по методу коаксиальной передающей линии (из «*EMI/RFI Shielding Guide*» — Справочника по защите от помех; воспроизведено с разрешения *GE Plastics*)

На рис. 4.6 представлена общая схема экспериментальной установки с испытуемым образцом.

Применение метода защищенного помещения требует довольно сложного технического оформления, включающего использование по крайней мере четырех клеток Фарадея (см. рис. 4.7). Схема метода и основная процедура измерений довольно просты: они аналогичны используемым при применении методики защищенного короба. Однако размеры образца в этом случае гораздо больше.

Рассматриваемый метод обладает двумя очевидными преимуществами по сравнению с методом защищенного короба: одно состоит в возможности проведения измерений в гораздо более широком частотном диапазоне с требуемой точностью; другое — поскольку передающее и регистрирующее оборудование находится вне измерительной камеры, это исключает взаимное влияние используемых устройств.

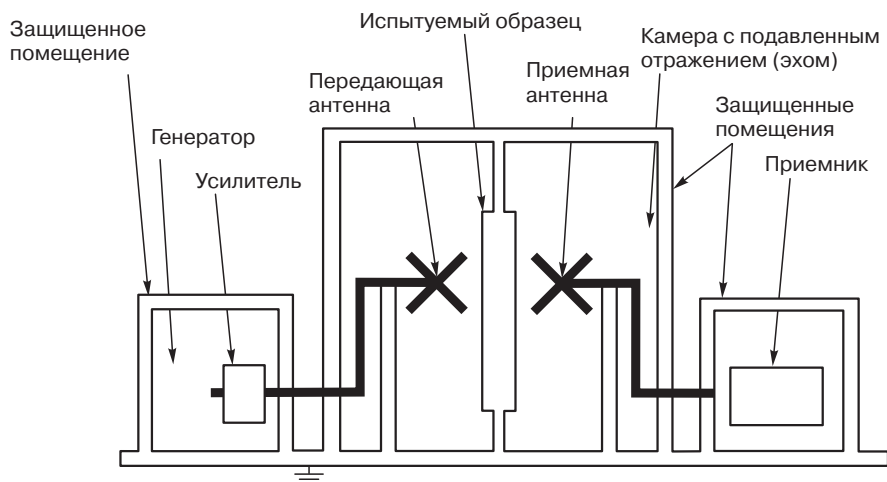


Рис. 4.7. Метод защищенного помещения (из «*EMI/RFI Shielding Guide*» — Справочника по защите от помех; воспроизведено с разрешения *GE Plastics*)

4.7.4. Измерения проводимости

При производстве изделий из полимеров измерение их электропроводности, равно как и проводимости деталей, собранных в схемы, является эффективным способом контроля качества [11]. Измерения таких параметров, как объемная сопротивляемость, проводимость покрытий и электрического сопротивления пластмассы относятся к числу обычных используемых на практике быстрых методов контроля.

А. Поверхностное сопротивление

Поверхностное сопротивление характеризует сопротивление материала перемещению электрических зарядов по его поверхности. Чем ниже поверхностное сопротивление, тем легче электрические заряды распределяются по всей поверхности изделия. Определение поверхностного сопротивления описано в разделе 4.4, которое соответствует стандарту *ASTM D257*.

Широко используемые на практике датчики поверхностного сопротивления позволяют непосредственно получать результаты в единицах Ом/площадь. Один из используемых приборов основан на использовании сочетания внутреннего и наружного колец. Заряд создается на внутреннем кольце, далее он перемещается по поверхности и фиксируется на наружном кольце.

Кроме этого, производители предлагают числовой Омметр, который измеряет сопротивление между двумя пробниками, приводимыми в контакт с металлическим покрытием. В методике, используемой в этом способе измерений, пробники прижимаются к поверхности пружинами и устанавливаются на исследуемой поверхности на определенном расстоянии друг от друга, или же в двух определенных областях детали. Далее измеряется сопротивление между двумя точками [12]. Прибор, в котором реализован этот метод, показан на рис. 4.8.

Б. Объемное сопротивление

Объемная сопротивляемость характеризует сопротивление перемещению электрического заряда через объем материала. Чем ниже сопротивление, тем больше проводимость материала. Методика измерений объемного сопротивления детально описана в стандарте *ASTM D257*.

В. Сопротивление площади поверхности

Измерение сопротивления, выраженного в Ом/ед. площади, проводится путем помещения пробников на поверхность образца. Пробник состоит из двух наружных блоков одинаковой геометрической формы и с эквивалентным расстоянием между блоками. Пробник помещается непосредственно на поверхность образца, и затем измеряется сопротивление. Эта методика чрезвычайно полезна для быстрой оценки качества покрытия поверхности, поскольку она позволяет проверить минимальную толщину проводящей пленки. Однако этот метод не слишком эффективен, если необходимо оценить суммарную проводимость покрытия, нанесенного на реальную деталь.

4.7.5. Испытания адгезии

Обеспечение надежной адгезии между слоем защитного покрытия и субстратом очень важно для правильного выбора способа защиты. Если по каким-либо причинам

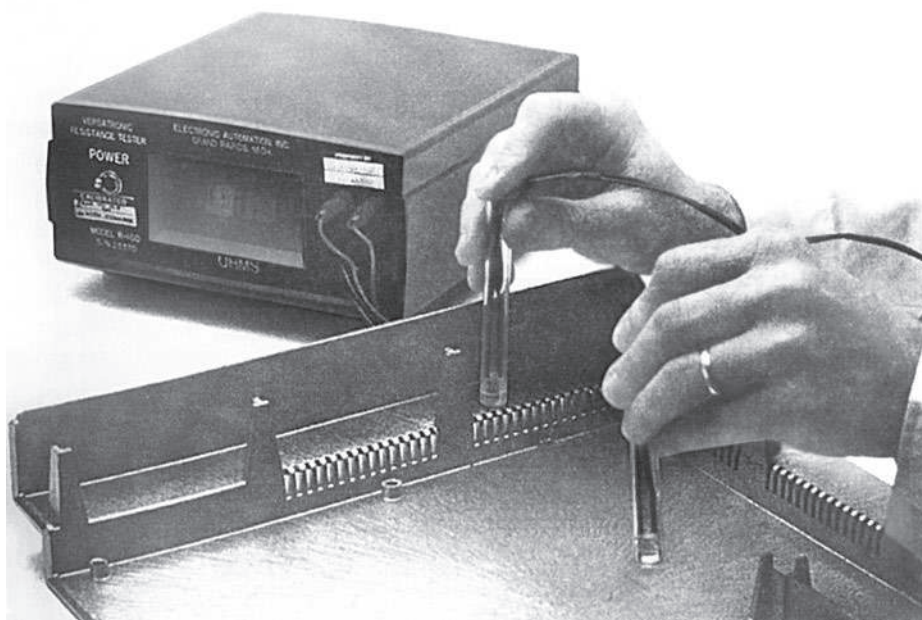


Рис. 4.8. Прибор для измерения сопротивления между двумя точками (с разрешения *Enthone-EMI Corporation*)

произойдет отделение покрытия от субстрата, то частички проводящего покрытия могут попасть на компоненты электронной схемы, что вызывает нежелательные последствия. Некачественная адгезия может также привести к утечкам и появлению электромагнитных помех.

Для проверки качества адгезии в промышленности широко используют стандарт *ASTM D3359*, Метод *B*. Этот метод также описан в рекомендациях *Underwriters Laboratories*, согласно *UL Standard 746 C*. Рассматриваемый метод основан на том, что на поверхность покрытия прорезается сеткой надрезов вплоть до субстрата. Для этой цели используют специальную изоляционную ленту (типа *Thernacel* № 99). Лента прижимается к сетке и растирается карандашным ластиком. Далее лента быстро, но не резко отделяется от поверхности. Затем сетка рассматривается с подсветкой через увеличительное стекло. На рис. 4.9 представлены возможные результаты таких наблюдений и их классификация. Объяснение рейтинга каждого класса дается в табл. 4.7.

Метод измерения адгезии по ИСО 2409 вполне подобен описанному выше, за исключением того, что надрезы делают специальным ножом, а классификация качества адгезии основывается на оценке доли элементов покрытия, отделяемых от поверхности после нанесения надрезов.

Классификация качества адгезионных контактов по *ASTM D3359*

Классификация	5	4	3	2	1	0
Внешний вид поверхности						Более чем 65%

Этот стандарт подлежит пересмотру уполномоченным техническим комитетом и должен рассматриваться каждые пять лет; если пересмотр не был проведен, то стандарт должен быть либо вновь подтвержден, либо отозван.

Рис. 4.9. Испытания адгезии (из «*EMI/RFI Shielding Guide*» — Справочника по защите от помех; воспроизведено с разрешения *GE Plastics*)

Таблица 4.7. Пояснения к классификации рейтинга качества адгезии

Классификация качества адгезии по <i>ASTM D3359</i> , Метод В		
Соответствие <i>UL 746 C</i>	Класс адгезии	Описание
Да	5B	Края надрезов гладкие; ни один квадратик не отделяется от поверхности
Да	4B	Небольшие отслоения видны на пересечении надрезов; дефектность не превышает 5% площади поверхности
Нет	3B	Небольшие отслоения видны на пересечении линий и вдоль надрезов; дефектность составляет 5–15% площади поверхности
Нет	2B	На покрытии образуются отслоения вдоль надрезов и частично внутри самих квадратиков; дефектность составляет 15–35% площади поверхности
Нет	1B	На покрытие образуются отслоения по краям, квадратики целиком частично отходят от подложки; дефектность составляет 35–65% площади поверхности
Нет	0B	Образование чешуек и отслоений выражено сильнее, чем в классе 1B; дефектность превышает 65% площади поверхности

Литература

1. Levy S. and Dubois H. *Plastics Product Design Engineering Handbook*, Reinhold, New York, 1977, p. 276.
2. Kinney G. F. *Engineering Properties and Applications of Plastics*, John Wiley & Sons, New York, 1957, p. 222.
3. *Ibid.*, p. 223.
4. Milby R. *Plastics Technology*, McGraw-Hill, New York, 1973, p. 498.
5. Kinney, Reference 2, p. 223.

6. Harper C.A. «Short Course in Electrical Properties» *Plast. World* (April 1979), p. 73.
7. Kinney, Reference 2, p. 224.
8. Harper, Reference 6, p. 72.
9. *Underwriters Laboratories Standards for Safety*, UL 746 A-B-C-D, Underwriters Laboratories Inc., Melville, NY, 1997.
10. GE Plastics, «EMI/RFI Shielding Guide» Pittsfield, MA.
11. EMI Shielding, Design Guide, «Performance of Alternative Conductive Coatings» Enthone-OMI Inc., New Haven, CT.
12. *Ibid.*, p. 1.

Рекомендуемые источники

1. Harris F.K., *Electrical Measurements*, Wiley, New York, 1952.
2. Birks J.B., *Modern Dielectric Materials*, Heywood & Company, London, 1960.
3. Anderson J.C. *Dielectrics*, Chapman and Hall, London, England, 1964.
4. Reddish W. «Chemical Structure and Dielectric Properties of Polymers» *Pure and Appl. Chem.*, 5(4) (1962).
5. Von Hippie A. *Dielectric Materials and Applications*, Wiley, New York, 1954.
6. Whitehead S. *Dielectric Breakdown of Solids*, Oxford University Press, Oxford, England, 1951.
7. Martin T. and Hauter J. «Arcing Tests on Plastics» *J. S.P.E.*, 10(2) (Feb. 1954), p. 13.

5. Климатические испытания

5.1. Введение

Рост применения пластмассовых изделий вне помещений вынудил производителей обращать большее внимание на влияние окружающей среды на свойства полимерных материалов. Факторы окружающей среды оказывают огромное негативное воздействие на внешний вид и свойства изделий из пластмасс. Интенсивность разрушения материала на открытом воздухе определяется такими обстоятельствами: климат, географическое положение, тип полимерного материала и продолжительность воздействия. Результаты воздействия могут быть различными — от незначительного изменения окраски и появления легких трещин до образования крупных трещин и полного разрушения структуры полимера. Любые попытки конструирования изделий из пластмасс без учета того, какими могут быть деструктивные механизмы, связанные с воздействием окружающей среды, могут привести к преждевременному разрушению изделия.

К числу основных факторов, которые играют роль при воздействии окружающей среды, относятся:

1. солнечная радиация (ультрафиолетовая радиация, видимый свет и рентгеновские лучи);
2. микроорганизмы — бактерии, грибки, плесень;
3. высокая влажность;
4. озон и кислород;
5. пары вода, влага в жидком и твердом виде;
6. тепловая энергия;
7. промышленные загрязнения, химические выбросы.

Комбинированное воздействие перечисленных факторов может оказывать гораздо более сильное воздействие, нежели каждый из них сам по себе, многократно ускоряя процесс деградации. Многие результаты испытаний не учитывают этот синергический эффект, который практически всегда присутствует в реальной жизни.

5.1.1. Ультрафиолетовая радиация

Все компоненты солнечного излучения в той или иной мере оказывают вредное воздействие на пластмассы. В наиболее сильной степени деструкция происходит под действием ультрафиолетовой части спектра. Энергия ультрафиолетовой радиации

достаточна для того, чтобы разрушить межатомные связи. Это воздействие на макромолекулы способствует термической окислительной деструкции, что приводит к охрупчиванию, выгоранию цвета и понижению всех механических и электрических свойств материала. Для моделирования радиации в той же области спектра используют ксеноновые лампы, флюоросцентное излучение, солнечные лампы и другие искусственные источники облучения, которые также эмитируют воздействия, вредные для полимеров. Другие факторы воздействия окружающей среды, например, тепло, влажность, кислород, усиливают деструктивные процессы, вызванные ультрафиолетовой радиацией.

Один из наиболее эффективных способов защиты полимера от ультрафиолетовой радиации состоит во введении в состав материала адсорберов ультрафиолетового излучения или стабилизаторов. Такие добавки способны эффективно поглощать большую часть попадающего в материал ультрафиолетового излучения и рассеивать поглощенную энергию без особого вреда для полимера. Таким образом, полимер защищается от действия ультрафиолетовой радиации за счет ее поглощения специальными адсорберами, которые расходуются во времени. Для указанной цели разработаны различные типы как органических, так и неорганических адсорберов ультрафиолетового излучения. Практически все неорганические пигменты в той или иной степени поглощают ультрафиолетовую радиацию, обеспечивая тем самым защиту материала. По-видимому, наиболее эффективным пигментом такого типа являются некоторые типы технического углерода, который поглощает энергию ультрафиолетового и видимого света практически во всем частотном диапазоне и преобразует ее в относительно безвредное излучение [1].

Стабилизаторы, в отличие от адсорберов ультрафиолетовой радиации, препятствуют разрушению химических связей или же преобразуют энергию излучения на более низкий уровень, который недостаточен для влияния на химические связи. Эффективность действия различных добавок к полимеру, стабилизирующих его против действия ультрафиолетовой радиации, может быть оценена различными методами, которые будут обсуждены в настоящей главе.

5.1.2. Микроорганизмы

Полимерные материалы в обычных условиях эксплуатации, как правило, не слишком подвержены воздействию микроорганизмов. Однако низкомолекулярные добавки, такие как пластификаторы, лубриканты, стабилизаторы, антиоксиданты, могут мигрировать на поверхность изделия, что способствует росту микроорганизмов. Эффект повреждения материала вследствие воздействия микроорганизмов может быть немедленно обнаружен по снижению свойств материала, изменению асептического качества, потере прозрачности и возрастанию хрупкости. Скорость роста микроорганизмов зависит от таких факторов, как тепло, свет и влажность. Для подавления роста и активности микроорганизмов в полимерные материалы добавляют вещества, известные под названием фунгисиды или биосиды. Такие добавки высокотоксичны по отношению к низшим организмам, но не влияют на высокоорганизованные существа.

Необходимость проведения оценок эффективности различных антимикробных добавок как на лабораторном уровне, так и в реальных условиях эксплуатации на открытом воздухе привела к разработке многочисленных различных методов испытаний. Эти методы и ограничения, связанные с их применением, также будут рассмотрены в настоящей главе.

5.1.3. Кислород, влага, тепло и другие факторы окружающей среды

Кроме ультрафиолетовой радиации и действия микроорганизмов, существуют и другие факторы, вызывающие деструкцию полимеров. Хотя большинство полимеров очень медленно взаимодействуют с кислородом, повышенные температуры и ультрафиолетовая радиация могут в сильной степени ускорить окислительные процессы. Вода оказывает сравнительно слабое негативное воздействие. Тем не менее возможны три различных эффекта, связанные с влиянием воды. Это химическое воздействие, состоящее в гидролизе неустойчивых связей, физическое воздействие, заключающееся в нарушении связей между полимером и наполнителем, что приводит к появлению меловых пятен, и фотохимический эффект.

Тепловая энергия играет косвенную роль в деструктивных процессах, ускоряя реакции гидролиза, окисления и фотохимические реакции, вызванные действием иных факторов.

Воздействие окружающей среды на полимеры также связано с влиянием иных разнообразных факторов, таких как озон, атмосферные выбросы, грязь, копоть, смог, двуокись серы, иные промышленные выбросы [2].

5.2. Ускоренные климатические испытания

Многие данные, относящиеся к оценке старения полимерных материалов, получены методами ускоренных климатических испытаний и в условиях реальной экспозиции на открытом воздухе. Ускоренные испытания позволяют сократить время, необходимое для получения требуемых результатов, что помогает провести достаточно быстрый отбор образцов с различными комбинациями добавок и соотношениями между ними. Для этого используют различные источники света, моделирующие солнечный свет. В качестве искусственных источников освещения используют, в частности, угольные и ксеноновые дуговые лампы, флуоресцентные солнечные и ртутные лампы. Все эти источники, за исключением флуоресцентных ламп, способны генерировать излучение гораздо более мощное по сравнению с натуральным солнечным светом. При сопоставимых длинах волн ксеноновые дуговые лампы могут создавать излучение, в два раза превосходящее по мощности наиболее яркий солнечный свет в широком частотном диапазоне.

Очень часто искусственные источники излучения используют для моделирования условий разрушения полимеров, комбинирующих воздействие солнечного света и воды (дождя или росы). В современных приборах предусмотрены устройства, которые

позволяют осуществлять одновременное опрыскивание образцов сверху и/или сзади для имитации воздействия влаги.

Существуют три основных метода ускоренных климатических испытаний:

- экспозиция под углеродной дуговой лампой;
- экспозиция под ксеноновой дуговой лампой;
- экспозиция под флуоресцентной ультрафиолетовой лампой.

Свет ксеноновой дуговой лампы при его правильной фильтрации наиболее близко моделирует спектр солнечного излучения.

5.2.1. Экспозиция полимеров под флуоресцентной ультрафиолетовой лампой (ASTM D432, ISO 4892-5)

Этот метод призван моделировать разрушения пластмасс, обусловленные одновременным воздействием солнечного света и росы с помощью искусственного источника излучения и аппаратуры для конденсации влаги (рис. 5.1 и 5.2).



Рис. 5.1. Аппаратура для создания ультрафиолетового излучения и конденсации влаги (с разрешения Q-Panel Lab Products)

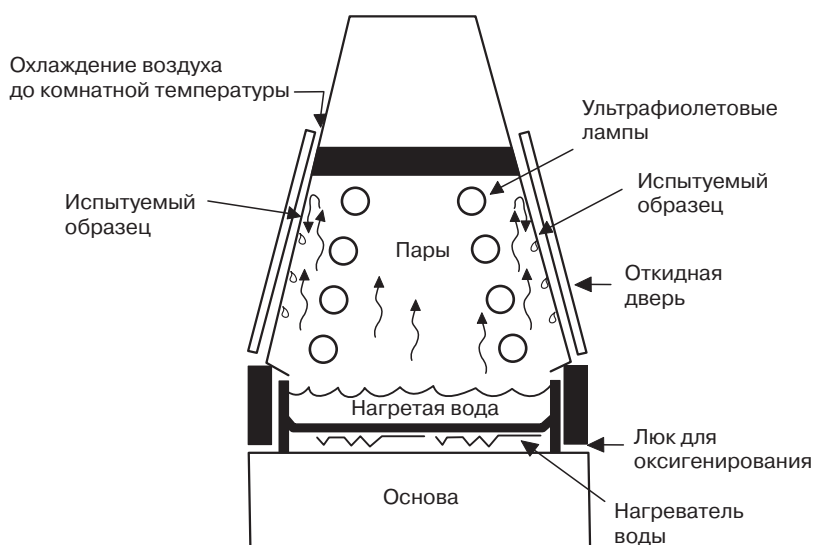
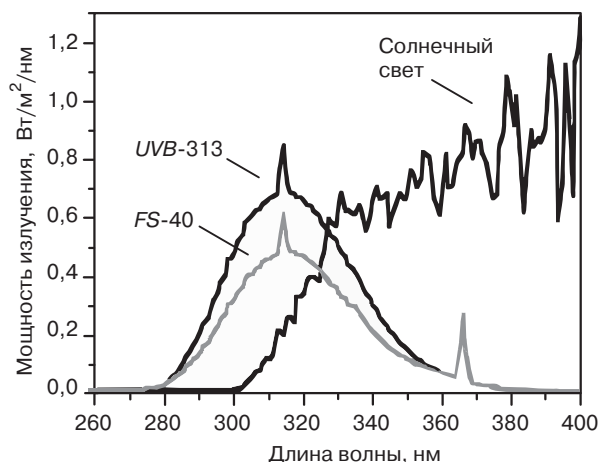


Рис. 5.2. Эскиз, иллюстрирующий принцип действия аппаратуры для одновременного создания ультрафиолетового излучения и конденсации влаги (с разрешения *Q-Panel Lab Products*)

Спектр солнечного излучения охватывает диапазон от ультрафиолета до инфракрасной области. Ультрафиолетовому излучению отвечает диапазон длин волн от 290 до 350 нм, и это тот диапазон солнечного излучения, попадающий на Землю, который вызывает наиболее интенсивное разрушение полимеров. В естественном солнечном свете на долю области с длинами волн меньше 400 нм приходится не более 6% излучаемой энергии [3]. Поскольку в специальных флуоресцентных ультрафиолетовых лампах основная мощность излучения приходится на область от 290 до 350 нм, они могут эффективно использоваться для значительного ускорения процесса разрушения пластмасс. На рис. 5.3 сопоставлены спектральные энергии солнечного излучения и флуоресцентных ламп.

За последнее время ультрафиолетовые лампы типа *UVA-340* приобрели заметную популярность по сравнению с более традиционными лампами типа *FS-40*, которые дают худшие результаты.

Аппаратура для ускоренных климатических испытаний состоит в основном из ряда ультрафиолетовых ламп, емкости для подогрева воды и штатива для установки образцов. Температуры и длительность испытаний контролируются независимо для того, чтобы оценить оба эффекта — как собственно облучения, так и конденсации воды. Образцы устанавливаются на штативе так, чтобы их лицевая поверхность была ориентирована по направлению падающего излучения. Условия испытаний задаются в соответствии с требованиями заказчика и программируются при настройке аппаратуры. Через заданное время образцы вынимаются из экспериментальной установки и подвергаются испытаниям на изменение цвета, образование крейзов, локальное побеление и появление трещин.



ультрафиолетовые (UV) лампы по сравнению
с летним солнечным излучением

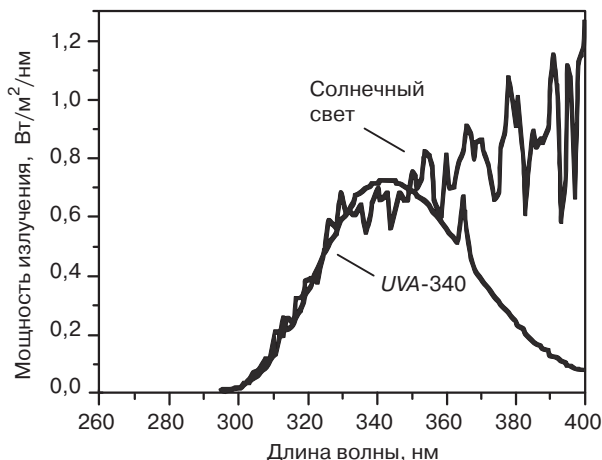


Рис. 5.3. Спектральное распределение энергии излучения солнечного света и флуоресцентных ламп (с разрешения Q-Panel Lab Products)

5.2.2. Экспозиция полимеров под фильтрованным открытым излучением угольной дуги (ASTM D1499) и закрытой угольной дуги (ASTM D6360)

Этот метод дает очень полезные результаты при оценке сопротивления пластмасс разрушению при облучении. На практике в качестве источников излучения используют угольные дуговые лампы различного типа. Одна из таких ламп — это закрытая угольная дуга. Другой тип известен под названием открытой дуги. На рис. 5.4 и 5.5

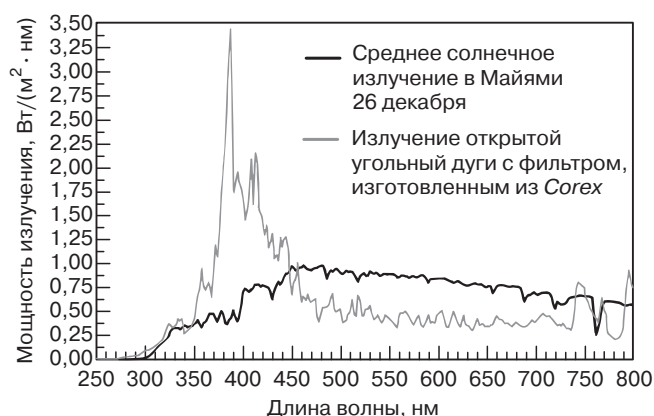


Рис. 5.4. Сопоставление энергии спектров излучения дуги открытого типа и солнечного света (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)

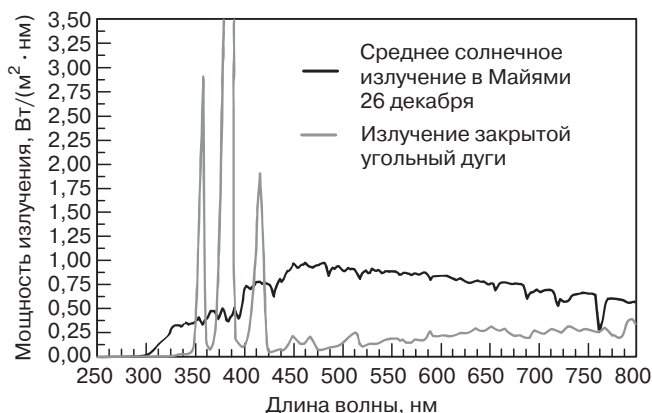


Рис. 5.5. Сопоставление энергии спектров излучения закрытой дуги и солнечного света (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)

излучение ламп обоих типов сопоставлено со спектром натурального солнечного излучения.

Аппарат с закрытой угольной дугой состоит из единичной или сдвоенной ламп, установленных в камере. Пламя лампы заключено в оболочку колокольного типа, изготовленную из боросиликатного стекла. Оболочка отсекает излучение с длинами волн меньше 275 нм, которое отсутствует в солнечном свете и создает полузамкнутую атмосферу, в которой горение дуги происходит наиболее эффективно. Как правило, оболочку необходимо заменять через каждые 2000 ч работы. На рис. 5.6 показан вид внутренней части такой камеры с установленной в ней сдвоенной дуговой лампой закрытого типа.

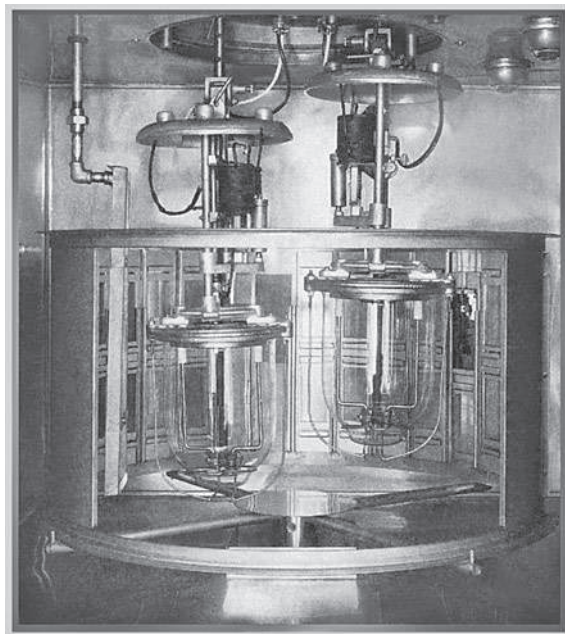


Рис. 5.6. Вид внутренней части типичной камеры со сдвоенной дуговой лампой закрытого типа (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)

Дуговая лампа с открытым пламенем работает непосредственно в воздушной атмосфере. В конструкции лампы использованы три верхних и три нижних электрода, которые могут непрерывно работать в течение 24–26 ч. Лампы окружены фильтром, изготовленным из *Corex*, который отсекает излучение с длинами волн, меньшими 255 нм. Лампы изготовлены с фильтром, постоянно закрепленным на одном месте. Однако фильтр может быть удален, что увеличивает долю энергии в ультрафиолетовой области, отвечающей длинам волн меньше 300 нм. Это значительно усиливает скорость фотодеструкции материалов, чувствительных к ультрафиолетовому излучению.

При работе с этой техникой следует быть особенно осторожным, поскольку этого требует техника безопасности для обслуживающего персонала.

Внутренность аппарата такого типа показана на рис. 5.7.

В аппаратах, использующих лампы закрытого типа, их устанавливают в цилиндр с одним открытым концом, в то время как лампы открытого типа закрепляют в цилиндрической раме. Оба аппарата вращаются относительно центрально установленных ламп. Установки также позволяют проводить испытания образцов в воде, которая разбрызгивается через насадки. Циклы включения и выключения света, а также подачи воды независимы друг от друга, так что схема управления прибором может быть запрограммирована на исследование поведения материала в различных условиях. В камере также устанавливается черная панель, которая позволяет регулировать температуру с помощью датчика, смонтированного непосредственно на исследуемом образце.

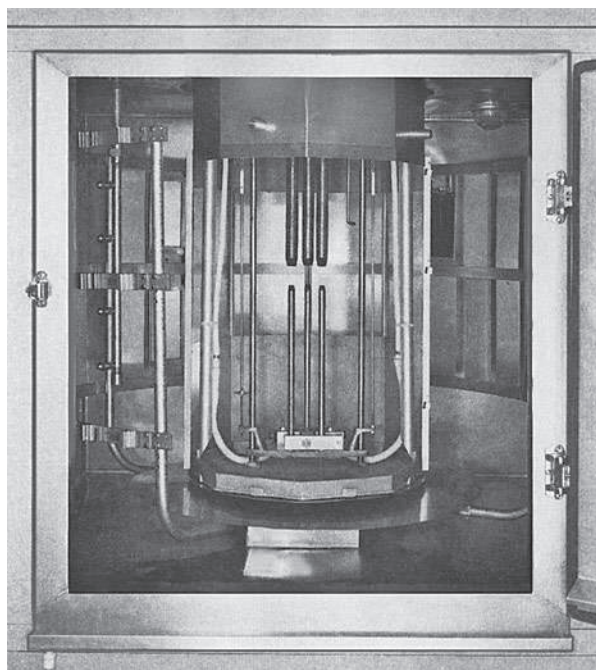


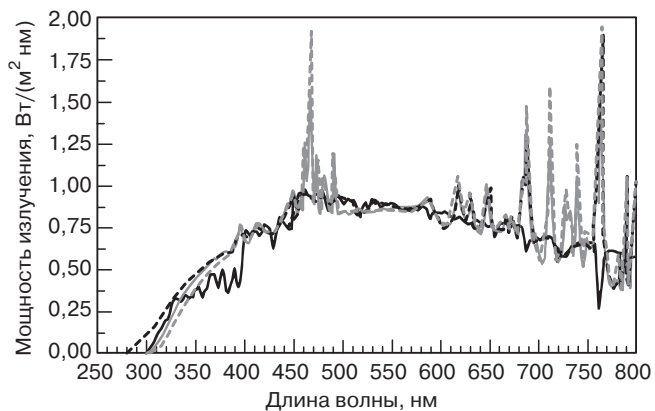
Рис. 5.7. Вид внутренней части типичной аппаратуры с установленной в ней дуговой лампы открытого типа (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)

5.2.3. Экспозиция пластмасс, предназначенных для наружного использования, под ксеноновой лампой (*ASTM D2526, G26, ИСО 4892-2*)

Источник излучения в виде ксеноновой дуговой лампы, охлаждаемый холодной водой, представляет собой один из наиболее популярных методов лабораторного исследования пластмасс, поскольку излучение такой лампы по своему спектральному составу очень близко к спектру солнечного излучения на поверхности Земли [4]. Ксеноновая дуговая лампа состоит из трубки, в которой образуется дуга, и системы световых фильтров. Комбинация взаимозаменяемых фильтров позволяет достичь спектрального состава излучаемого света, который очень хорошо аппроксимирует натуральный солнечный свет (рис. 5.8 и 5.9).

В аппаратах такого типа используется внутренняя система рециркуляции, с помощью которой в системе через лампы прокачивается дистиллированная или деионизированная вода. Вода охлаждает трубку, в которой горит дуга, и фильтры, нагреваемые инфракрасной частью излучения. Если используются системы воздушного охлаждения, то дополнительно применяются оптические фильтры.

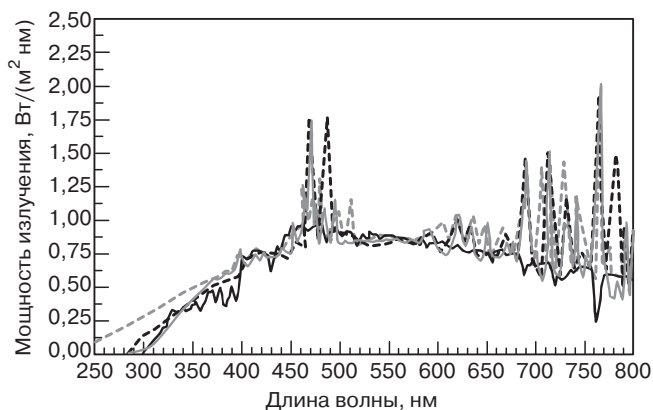
Внутренняя часть аппаратуры ксеноновой дуговой лампы с водяным охлаждением показана на рис. 5.10.



Ксеноновая дуговая лампа мощностью 6500 Вт

- Среднее солнечное излучение в Майями 26 декабря
- - - Фильтр из боросиликатного стекла типа «S»
- Фильтр из натрий-силикатного стекла
- - - сочетание фильтров типа «S» и натрий-силикатного стекла

Рис. 5.8. Сопоставление энергии спектров излучения ксеноновой дуговой лампы с различными фильтрами и солнечного света (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)



Ксеноновая дуговая лампа мощностью 6500 Вт

- Среднее солнечное излучение в Майями 26 декабря
- - - Фильтры из двойного кварцевого стекла
- - - Фильтры из силикатного и кварцевого стекла
- Сдвоенный фильтр типа «S»

Рис. 5.9. Сопоставление энергии спектров излучения ксеноновой дуговой лампы с различными фильтрами и солнечного света (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)

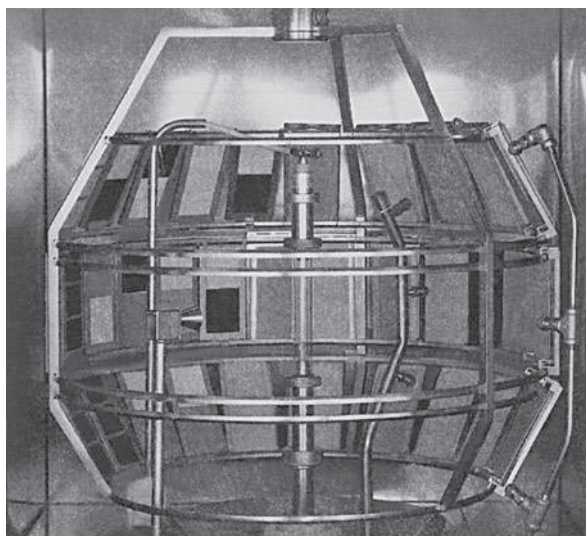


Рис. 5.10. Вид внутренней части аппаратуры, в которой используется ксеноновая дуговая лампа (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)



Рис. 5.11. Тестер для климатических испытаний (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)

Пять возможных циклов испытаний перечислены в Методике D3565. Эти циклы будут рассмотрены ниже. Цикл 1 имеет историческое значение. Цикл 2 предназначен для пластмасс общего назначения. Три остальных цикла подробно описаны в методических рекомендациях *ASTM*. Во всех случаях настоятельно рекомендуется, чтобы в процессе испытаний были использованы контролируемые режимы облучения. Наиболее надежно это осуществляется с использованием непрерывной системы слежения, которая позволяет автоматически поддерживать одинаковый уровень интенсивности облучения на выбранных длинах волн или в выбранном диапазоне длин волн при широкополосном контроле.

На рис. 5.11 показан имеющийся на рынке тестер для климатических испытаний.

5.2.4. Интерпретация результатов и ограничения ускоренных климатических испытаний

Среди ряда пользователей существовало полное непонимание соотношения между результатами контролируемых лабораторных испытаний и испытаниями в реальных условиях наружного применения изделий из пластмасс. Обычно задавались такие вопросы: «Какое количество часов при экспозиции в контролируемых лабораторных условиях соответствует одному месяцу выдержки вне помещения?» и «Как результаты, полученные при испытаниях одного типа, коррелируют с данными, полученными при испытаниях другого типа?» В настоящее время существует общее понимание среди исследователей, производителей материалов и потребителями в том, что чрезвычайно трудно установить соответствие между результатами ускоренных климатических испытаний и данными натурных испытаний. Однако возможно установление некоторого ранжирования различных материалов относительно их стойкости к климатическим воздействиям, основанного на использовании современного испытательного оборудования и строгих методов измерений.

Относительные характеристики стойкости ряда немодифицированных полимерных материалов к климатическим воздействиям приведены в табл. 5.1.

Комитет *G3 ASTM* предложил следующую дефиницию для установления корреляции результатов климатических испытаний: «Для того чтобы получить надежные результаты сопоставления результатов климатических испытаний, необходимо быть уверенным, что изменения в сопоставляемых свойствах имеют своей причиной те же или существенно сходные химические превращения, протекающие в процессе испытаний».

Ускоренные климатические испытания имеют своей целью исследовать то, что происходит вне помещения под влиянием климатических воздействий за существенно более короткий период времени. Такие испытания зачастую дают неверные результаты, которые трудно интерпретировать или сопоставлять с данными натурных испытаний. Причина возможных противоречий состоит в том, что при испытаниях во многих лабораториях при экспозиции образцов используются распределения интенсивности длин света, отличные от естественного солнечного излучения вне помещения.

Таблица 5.1. Относительная стойкость к климатическим воздействиям немодифицированных термопластов

Полимер	Стойкость
Полиакрилаты	Высокая
Политетрафторэтилен и другие фторированные полимеры	Высокая
Поликарбонат	Средняя
Тремолпластичный полиэфир	Средняя
Ацетат бутират целлюлозы	Средняя
Полиамиды	Средняя
Полиуретаны	Средняя
Полифениленоксид	Средняя
Полифениленсульфид	Средняя
Жесткий поливинилхлорид	Средняя
Пластифицированный поливинилхлорид	Низкая
АБС-пластик	Низкая
Полиацетали	Низкая
Полэтилен	Низкая
Полисульфон	Низкая
Полистирол	Низкая
Полипропилен	Низкая
Ацетат целлюлозы	Низкая

Все пластмассы очень чувствительны к особенностям распределения интенсивности по длине света в ультрафиолетовом диапазоне. Если в используемом для лабораторных испытаний источнике света интенсивность той длины волны, к которой особенно чувствителен данный полимер, необычно высока, то степень ускорения процесса будет непропорционально велика по сравнению с натурными условиями.

Температура также очень сильно влияет на скорость разложения полимера. При повышенных температурах могут заметно ускориться окисление и миграция добавок, которые влияют на скорость деградации.

Одно из важных ограничений методов ускоренных испытаний состоит в том, что они никак не учитывают неблагоприятное воздействие промышленных выбросов и многих других факторов, присутствующих в атмосфере, а также синергический эффект их воздействия на полимеры. В некоторых из современных камер для ускоренных климатических испытаний предусмотрена возможность напуска различных газов, что частично устраняет указанный недостаток. В этих установках возможно использование таких газов, как озон, двуокись серы, окислы азота при поддержании контролируемой температуры и влажности.

Использование усовершенствованных источников ультрафиолетового излучения, а также лучшее понимание того, каким образом следует моделировать природные условия, позволяет достичь лучших результатов при ускоренных испытаниях. Для этого рекомендуется использовать следующие методические указания.

1. Проведите испытания материала с известной сопротивляемостью климатическим воздействиям в лабораторных условиях. Если этот материал окажется непригодным, возьмите другой аналогичный материал, про который известно, что он использовался в аналогичных условиях.

2. Оцените стойкость материала к воздействию ультрафиолетового излучения. Измерьте температуру материала, подвергаемого облучению. Найдите время облучения, в течение которого материал продолжает сохранять свои требуемые эксплуатационные характеристики. Постарайтесь установить цикл лабораторных испытаний, который бы в наибольшей степени дублировал баланс факторов воздействия на материал в реальных условиях.
3. Не используйте абнормальную область ультрафиолетового излучения, пытаясь ускорить испытания, если только вы не исследуете материалы с очень небольшими различиями между ними. Использование этого подхода к двум различным материалам может привести к ошибочным результатам.
4. В натурных условиях воздействие на материал складывается из ультрафиолетового излучения, окисления и влияния влаги. При лабораторных испытаниях имеется возможность разделения различных факторов воздействия, что позволяет оценить их относительную роль. Не следует упускать этой возможности.
5. Не пытайтесь найти пересчетную таблицу, которая бы показывала сколько часов экспозиции при лабораторных ускоренных испытаниях соответствуют определенному количеству месяцев при эксплуатации в натурных условиях. Реальное климатическое воздействие может изменяться в очень широких пределах, различаясь даже для разных сторон одного и того же изделия. Пластмассовая крышка багажника подвергается совершенно иным климатическим воздействиям по сравнению с поливинилхлоридной крышей того же самого автомобиля. Существуют приемлемые стандартные методы для оценки работоспособности различных изделий, но если используется один прибор, один и тот же цикл, то совершенно нереалистично пытаться создать единые правила пересчета результатов лабораторных испытаний в предсказания длительности работоспособности на воздухе [5].

Прежде чем делать какие-либо окончательные выводы на основании лабораторных данных относительно возможности данного изделия противостоять климатическим воздействиям, все же необходимо провести наружные испытания в течение разумного времени.

5.3. Наружные климатические испытания пластмасс (ASTM D1435, ISO 877)

Поскольку примерно четвертая часть всех полимерных материалов эксплуатируется вне помещений, климатические испытания на открытом воздухе приобрели определенную популярность [6].

Испытания, целью которых является оценка стабильности полимерных материалов вне помещения, весьма разнообразны, поскольку они учитывают различные варианты варьируемых климатических условий. Важными факторами здесь являются: климат в данной местности, время года и наличие промышленных выбросов. Рекомендуются, чтобы такие испытания для конкретной географической области

использования материала проводились при различной погоде в течение не менее одного года. Поскольку климатические испытания по своему смыслу всегда являются сравнительными, необходимо располагать контрольными образцами, которые выдерживаются в стандартных условиях по температуре и влажности. Кроме того, контрольный образец должен быть обернут в инертное покрытие с тем, чтобы избежать нежелательного воздействия света в течение периода старения. Тем не менее даже выдержка в темноте не гарантирует стабильности материала [7].

Географические точки, в которых проводятся испытания, должны представлять характерные климатические зоны, в которых предполагается использовать данный полимерный материал. Так, Аризона часто выбирается как типичная область с интенсивным солнечным излучением, изменениями температуры в широких пределах и низкой влажностью. Флорида, напротив, рассматривается как место с высокой влажностью, интенсивным солнечным излучением и повышенной температурой.

Для натурных испытаний берутся образцы подходящих размеров, которые закрепляются непосредственно на стойке. При этом образцы должны быть наклонены под углом 45 град и ориентированы лицевой стороной по направлению к экватору. Возможны и другие варианты установки образцов, что определяется требованиями к условиям их применения.

После выдержки в течение заданного времени образцы снимаются со стойки и подвергаются визуальному осмотру и различным исследованиям. Прежде всего определяются их механические и электрические свойства. Полученные данные сопоставляются с результатами испытаний контрольных образцов.

Типичные алюминиевые стойки с закрепленными на них образцами которые используют для натурных испытаний, показаны на рис. 5.12, а способ установки образцов виден из рис. 5.13.

В табл. 5.2 перечислены методы климатических испытаний.

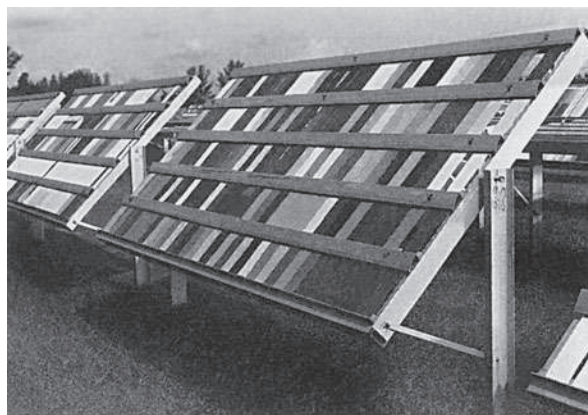


Рис. 5.12. Типичная алюминиевая стойка для установки образцов (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)

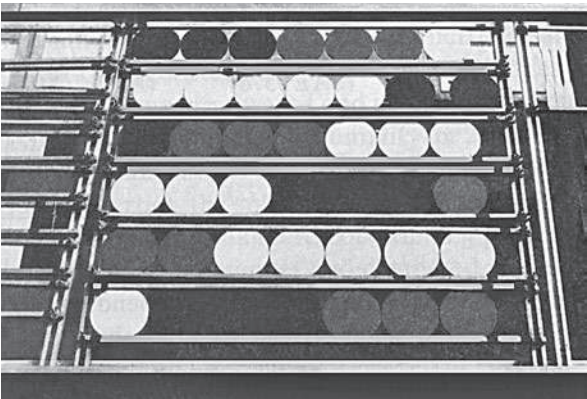
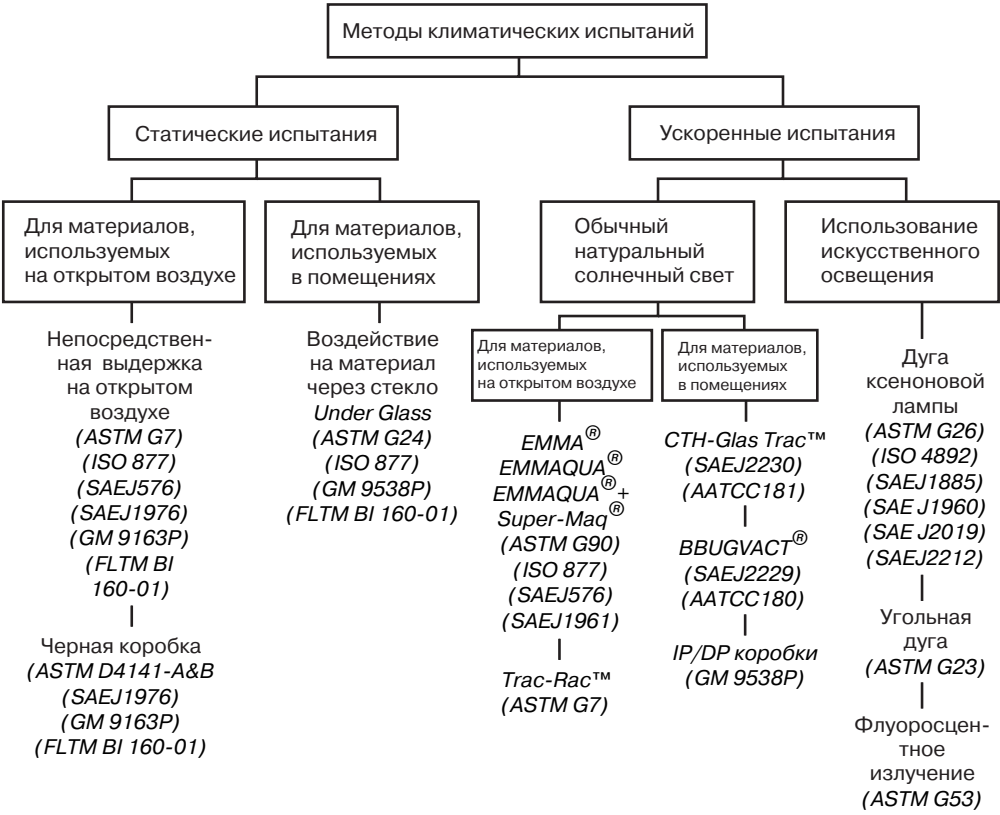


Рис. 5.13. Образцы, смонтированные на стойке (с разрешения *Atlas Material Testing Technology, LLC*)

Таблица 5.2. Методы климатических испытаний



5.3.1. Натурные ускоренные климатические испытания

Натурные ускоренные климатические испытания представляют собой надежный метод предсказания долговременных эксплуатационных характеристик полимерных материалов на основе данных, полученных в течение сравнительно короткого времени. Поэтому соответствующие методики нуждаются в дальнейшем развитии. Испытания такого типа проводятся в течение последних 30 лет организацией *DSET Laboratories*. В основе предлагаемого метода лежит использование концентратора солнечных лучей Френеля, в котором применены 10 плоских зеркал для создания однородного сфокусированного потока солнечного излучения на образец, установленный на подставке. Высококачественные зеркала с поверхностью первого класса создают интенсивность облучения, примерно в 8 раз превосходящую интенсивность солнечных лучей, причем здесь поддерживается естественный баланс в распределении мощности в ультрафиолетовой области, отвечающий естественному солнечному облучению. В рассматриваемом методе сохраняется превосходное соответствие спектру солнечного излучения, соответствующего условиям субтропиков, таких как Южная Флорида или безводные пустыни Аризоны.

Аппаратура для проведения испытаний представляет собой стойку, поворачивающуюся вслед за движением Солнца, с зеркалами, установленными по касательной к воображаемым параболическим поверхностям. Оси ориентированы по направлению север–юг со склонением в северном направлении и возможностью периодической корректировки по высоте.

Поверхность стойки расположена вдоль фокальной линии зеркал. Стойка расположена над туннелем, по которому подается воздух, охлаждающий образцы. В используемой аппаратуре предусмотрена установка набора форсунок, через которые на образцы разбрызгивается деионизированная вода. Режим подачи воды определяется установленной программой испытаний. Подача воды в ночное время преследует цель сохранить образцы влажными на тот период, когда солнечное облучение отсутствует. При таких испытаниях старение образцов в течение 3 лет в климатических условиях Флориды успешно моделируется шестимесячными испытаниями.

Испытания такого рода успешно практикуются в автомобильной промышленности, в сельском хозяйстве, при строительстве, оценке изделий в текстильной и упаковочной областях промышленности.

Такие испытания в коммерческих условиях проводятся компанией *Atlas Weathering Services Group*, которая входит в список компаний, включенных в Приложение.

На рис. 5.14 показан внешний вид установки для ускоренных натурных климатических испытаний.

В табл. 5.3 собран перечень стандартов и рекомендаций, согласно *EMMAQUA*¹.

¹ Аббревиатура зарегистрированного названия *Atlas Material Testing Technology, LLC*. Экваториальная установка с зеркалами, используемыми для ускорения испытаний, и подачи воды), которая позволяет проводить натурные ускоренные климатические испытания на открытом воздухе.

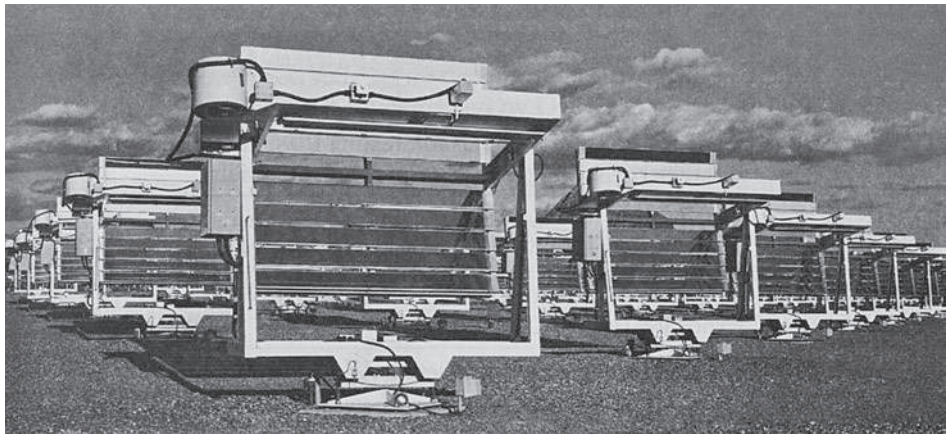


Рис. 5.14. Установка для ускоренных климатических испытаний на открытом воздухе (с разрешения Atlas Material Testing Technology, LLC)

Таблица 5.3. Стандарты и рекомендации по натурным ускоренным климатическим испытаниям

Стандарт	Название	Методы измерений			
ASTM D3105	Перечень стандартных методов для испытаний покровных материалов из эластомеров, пластомеров и иных водонепроницаемых материалов				
ASTM D3841	Спецификация пластиковых панелей из полиэфиров, армированных стекловолокном				
ASTM D4141	Стандартная процедура проведения наружных ускоренных испытаний покрытий				
ASTM D4364	Стандартная процедура проведения наружных ускоренных испытаний с использованием концентрированного натурального солнечного излучения				
ASTM D5105	Стандартная процедура проведения наружных ускоренных испытаний клейких лент с использованием концентрированного натурального солнечного излучения	EMMA®	EMMA-UG®	EMMAQUA®+	
ASTM E1596	Стандартный метод испытаний влияния солнечного излучения на фотогальванические модули				
ASTM C90	Стандартная процедура проведения наружных ускоренных испытаний неметаллических материалов с использованием концентрированного натурального солнечного излучения				
SAE J576	Полимерные материалы, используемые для изготовления оптических деталей, такие как линзы и отражающие рефлекторы, в осветительных приборах автомобилей				
SAE J1961	Ускоренные испытания наружных деталей автомобилей с использованием солнечного света и аппаратуры на основе рефлекторов Френеля				

Окончание табл. 5.3

Стандарт	Название	Методы измерений			
<i>Ford ESB-M16J14-A</i>	Эмалированные двухкомпонентные окрашенные термо-реактивные композиции для наружной отделки высшего класса			EMMA [®] +	
<i>Ford ESB-MSP11-A</i>	Металлизированные детали из пластмасс. Рефлекторы			EMMA [®]	EMMAQUA [®] -NTW
ИСО 877	Пластмассы. Методы экспозиции при прямых наружных испытаниях, при климатических испытаниях с использованием фильтрованного стеклом дневного света и при интенсифицированных климатических испытаниях при дневном свете с использованием зеркал Фрезоля	EMMA [®]	EMMA-UG [®]	EMMAQUA [®] / EMMAQUA [®] +	EMMAQUA [®] -NTW
<i>ANSI/NSF 54</i>	Облицовка гибких мембран		EMMA [®]		
<i>JIS Z 2381</i>	Рекомендуемые методики климатических испытаний			EMMAQUA [®] / EMMAQUA [®] +	EMMAQUA [®] -NTW
<i>MIL-T-22085D</i>	Ленты, адгезивы, чувствительные к давлению и уплотнения			EMMAQUA [®] / EMMAQUA [®] +	EMMAQUA [®] -NTW

5.4. Стойкость полимерных материалов к плесени (ASTM G21)

Рассматриваемый метод ускоренных лабораторных испытаний призван характеризовать влияние плесени на свойства полимерных материалов. Этот метод также позволяет оценить эффективность антимикробных добавок, вводимых в пластмассы.

Методика испытаний состоит в том, что готовится суспензия спор из культур, которые наиболее активны при воздействии на полимеры. Этим методом, если это необходимо, могут также оцениваться влияние многих различных организмов. Приготовленная суспензия спор используется в качестве контрольного материала для оценки скорости роста плесени в отсутствие полимерного образца. Что касается образца для испытаний, то он может быть любой формы и размеров, включая конечные изделия, бруски или части готовых изделий. Для исследования влияния плесени на оптическую прозрачность или отражение используют оптически прозрачные образцы.

Испытания проводят в чашке Петри или ином подходящем стеклянном сосуде, на дне которого помещают питательный солевой раствор агара. Затем на внутреннюю поверхность через пульверизатор наносят суспензию спор, зараженные образцы накрывают крышкой и помещают в инкубатор, температура в котором поддерживается на уровне 28–30 °С, а влажность составляет не менее 85%. Образцы выдерживают в таких условиях 21 день. После этого визуально оценивают рост плесени.

Для того чтобы исследовать влияние плесени на физические, оптические и электрические свойства материала, образцы отмывают от плесени и кондиционируют в соответствии с принятыми стандартными методиками. Физические испытания проводят обычными методами и их результаты сравнивают со свойствами контрольных образцов.

5.5. Стойкость полимерных материалов к бактериям (ASTM G22)

Предусмотренные указанным стандартом ускоренные испытания на стойкость полимерных материалов к действию бактерий аналогичны испытаниям на стойкость к плесени. Вместо суспензии спор в этом случае используют суспензию, содержащую бактериальные клетки. Испытания проводятся по той же схеме: на образец, помещенный в чашку Петри, распыляется суспензия бактериальных клеток. Далее образцы на 21 день помещают в инкубатор, где они хранятся в стандартизованных условиях. Вариантом метода испытаний является схема, по которой образец помещается между двумя питательными средами, образуя нечто вроде сэндвича. Далее суспензия, содержащая бактериальные клетки, разбрызгивается с двух сторон. По этой схеме обеспечивается более тесный контакт между бактериями и испытуемым образцом.

5.6. Ограничения методов испытаний на стойкость к микроорганизмам

Данные, получаемые в результате ускоренных испытаний на стойкость к скорости роста микроорганизмов, могут давать результаты, приводящие к неверным выводам, если эти результаты не подвергаются корректному обсуждению и неправильно интерпретируются [8]. Ограничения этого метода испытаний таковы:

- стремление к осуществлению оптимальных условий роста микробиологических объектов диктует необходимость использования высокого уровня токсичных компонентов, которые в реальных условиях привели бы к чрезмерному эффекту «сверхубийства»;
- экспозиции обычно ограничены относительно малым числом различных видов микроорганизмов;
- экспозиции ограничены по температуре и времени;
- неправильная интерпретация полученных данных лицами, не являющимися экспертами в данной области.

Также важно понять, что некоторые химикалии могут оказаться очень токсичными для микроорганизмов в течение кратковременных ускоренных испытаний, продолжительностью 14–21 сутки, но их эффективность может падать при долгосрочных экспозициях. Так, например, фунгисиды могут просто выпариваться в горячей атмосфере, разрушаться под действием ультрафиолетового излучения или вымываться дождем или росой.

5.7. Натурные испытания для исследования стойкости полимерных материалов к плесени и бактериям и их ограничения

Испытания на открытом воздухе, проводимые для оценки стойкости полимерных материалов к действию микроорганизмов, выполняются по самым различным

методикам [9]. Простейший вариант испытаний состоит в том, что образцы просто располагаются в открытом пространстве в той географической зоне, которая наиболее благоприятна для роста микробиологических объектов.

Альтернативный способ испытаний называется методом захоронения в почве. Этот метод состоит в том, что образцы закапывают в землю на четыре недели, и затем исследуются результаты влияния микроорганизмов на исследуемые образцы.

Существуют следующие серьезные ограничения натурных испытаний полимерных образцов:

- химический состав продуктов;
- угол, под которым устанавливаются образцы, подвергаемые воздействию окружающей среды;
- время года, в которое проводятся испытания;
- географическое расположение места испытаний.

Эффективность воздействия микроорганизмов в сильной степени зависит от химического состава материала. Полимеры, которые хорошо противостоят действию влаги и устойчивы в различных погодных условиях, обычно обладают высокой стойкостью по отношению к воздействию микроорганизмов, поскольку на поверхности изделий из таких материалов не выделяются пластифицирующие компоненты и не создается питательная среда для микроорганизмов. Продукты, которые обладают способностью частично смывать микроорганизмы с поверхности, обладают определенными преимуществами, поскольку основное влияние микроорганизмы оказывают именно на поверхность изделий.

Угол, под которым образцы во время экспозиции ориентированы по отношению к солнечному свету и атмосферным воздействиям, в общем случае влияет на эффективность и продолжительность микробиологического воздействия. Для некоторых пластмасс характерно более быстрое выделение добавок, играющих роль питательной среды, если они установлены под углом 40 град к югу, чем если они располагаются вертикально.

Время года и география места испытаний также играют важную роль, поскольку микроорганизмы растут более активно в теплой и влажной атмосфере, чем в холодном и сухом климате.

В заключение заметим, что испытания на стойкость к плесени и бактериям должны проводиться в две стадии. Во-первых, следует выполнить кратковременные ускоренные испытания, которые позволят отсеять материалы, не представляющие перспективного интереса. Во-вторых, выполняются долговременные натурные испытания, которые призваны подтвердить результаты лабораторных оценок.

Литература

1. Mascia L. *The Role of Additives in Plastics*, Edward Arnold Publishing Company, London, England, 1974, p. 134.
2. Kamal M.R. «Weatherability of Plastic Materials» *Appl. Poly. Symp.*, No. 4, Interscience Publishers, New York, (1967), p. 2.

3. *Ibid.*, p. 64.
4. *Ibid.*, p. 62.
5. Dregger D.R. «How Dependable are Accelerated Weathering Tests for Plastics and Finishes?» *Machine Design* (Nov. 1973), pp. 61-67.
6. Winolow R.M., Matreyek W., and Trozzolo A.M. «Polymers Under Weather» *S.P.E.J.* 28(7), (July 1972), p. 19-24.
7. Kinmonth R.A., Saxon R., and King R.M. «Sources of Variability in Laboratory Weathering» *Polym. Eng. Sci.* 10(5), (Sept. 1970), p. 309-313.
8. Wienert L.A. and Hillard M.W. «A Hard Look at Fungal-Resistance Testing» *Plast. Tech.* (Jan. 1977), p. 75.
9. *Ibid.*, p. 77.

Рекомендуемые источники

1. Mullen A., Kinmonth R.A., and Searle N.Z. «Spectral Energy Distributions and Aging Characteristics of Fluorescent Sunlamps and Blacklight» *J. Testing and Evaluation* 3(1), (Jan. 1975), p. 15-20.
2. Reinhart F.W. and Mutchler M.K. «Fluorescent Sunlamps in Laboratory Aging Tests for Plastics» *SATM Bull.*, 212(33), (Feb. 1956), p. 45-51.
3. Dunn J.L. and Heffner M.H. «Outdoor Weatherability of Rigid PVC» *SPE ANTEC*, 19(1973), p. 483-488.
4. Yaeger C.C. «The Use of Antimicrobials in Flexible Vinyl Systems» *SPE ANTEC*, 17(1971), p. 579.
5. Weinberg E.L. *Modern Plastics Encyclopedia*. McGraw-Hill, New York, 1976-1977, p. 217.
6. Borg-Warner «Weatherability of Cyclocac Brand ABS Resins» *Tech. Bull.*, Parkersburg W. VA, PB-120A.
7. Atlas Electric Devices Co. «Atlas Sun Spots» *Tech. Bull.*, Chicago, published quarterly.
8. Metzinger R. and Kinmonth R.A. «Laboratory Weathering» *Modern Paint and Coatings* (Dec. 1975).
9. *Int. Symp. on the Weathering of Plastics and Rubber*, Reprints, Plastics and Rubber Institute, London, England, 1976.
10. Rosato D.V. *Environmental Effects on Polymeric Materials*. Interscience, New York, 1967.
11. Wypych G. *Handbook of Material Weathering*, Plastics Design Library, Norwich, NY, 1995.
12. *The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers*, PDL Handbook Series, Plastics Design Library, Norwich, NY, 1994.
13. Keller D.M. «Testing to failure of paint on plastics» Advance Coating Technology Conference, Chicago, IL, 1992, p. 133-144.
14. Technical and sales literature, «Weathering Services» Atlas Weathering Services Group, Miami, FL.

6 Оптические свойства

6.1. Введение

Уникальное сочетание свойств — превосходная чистота и прозрачность, стойкость к ударным нагрузкам, возможность получения изделий путем литья в форму, низкая стоимость — делают пластмассы в ряде случаев оптимальным выбором для конструктора. Эти прозрачные или полупрозрачные материалы успешно применяют для создания автомобильных фонарей, безопасных стекол, оконных покрытий, витрин магазинов и инструментальных панелей. Сравнительно недавно пластмассы нашли применение для изготовления более ответственных изделий, например, контактных линз, призм, линз в дешевых камерах, увеличительных стекол. Пластмассы более стойки к удару по сравнению с неорганическими стеклами. Поэтому такие полимеры, как поликарбонат, более стойкие к действию вандалов, заменяют обычные стекла в лампах уличного освещения и остеклении школ. Однако отсутствие размерной стабильности в широком диапазоне температур и плохая стойкость к нанесению царапин препятствуют расширению применения пластмасс в таких областях, как линзы дорогих камер, микроскопы и другие изделия точной оптики, где традиционно используют обычные стекла.

Почти все пластмассы, если толщина изготовленного из них изделия ниже некоторого предела, становятся полупрозрачными. И только некоторые пластмассы полностью прозрачны. Является ли пластмасса прозрачной или полупрозрачной зависит от структуры полимера. Вообще говоря, все аморфные пластмассы прозрачны. Кристалличность способствует увеличению плотности материала, что снижает скорость распространения света и приводит к возрастанию показателя преломления. Если размер кристалла становится больше, чем длина видимого света, то луч света, проходя через множество кристаллических и аморфных областей, рассеивается, и прозрачность материала уменьшается. Большие единичные кристаллы рассеивают свет под широкими углами, и это приводит к появлению мутности [1]. Как правило, частично кристаллические полимеры полупрозрачны. Однако их прозрачность может быть улучшена путем закалки или статистической сополимеризации [2, 3].

К числу основных оптических свойств относятся:

- показатель преломления;
- светопропускание и мутность;
- фотоупругие свойства;
- цвет;
- внешний блеск (отражательная способность).

6.2. Показатель преломления (ASTM D542, ISO 489)

Показатель преломления представляет собой фундаментальную характеристику прозрачных материалов. Величина показателя преломления играет первостепенную роль для конструктора при разработке линз для камер, микроскопов и других оптических систем. Показатель преломления, также называемый индексом рефракции, определяется как отношение скоростей света в вакууме (или в воздухе) и в данной среде. Он вычисляется как

$$\text{Показатель преломления} = \frac{\text{Синус угла падающего луча света}}{\text{Синус угла преломленного луча}}.$$

В табл. 6.1 собраны значения показателей преломления различных материалов. Обратите внимание на то, что показатель преломления большинства пластмасс очень близок к показателю преломления стекла.

Существуют два основных метода измерения показателя преломления. Первый метод, называемый рефрактометрическим, основан на использовании рефрактометра. Альтернативный метод состоит в использовании микроскопа не менее чем с 200-кратным увеличением. Рефрактометрический метод более предпочтителен по сравнению с микроскопическим, поскольку он дает более точные результаты. Точность микроскопического метода зависит от квалификации оператора при фокусировке изображения, и поэтому он менее точен.

Таблица 6.1. Показатели преломления пластмасс

Полимер	Показатель преломления
Политетрафторэтилен	1,35
Ацетат бутират целлюлозы	1,47
Ацетат целлюлозы	1,49
Полиацетали (гомополимеры)	1,48
Полиакрилаты	1,49
Полипропилен	1,50
Полибутилен	1,51
Иономер	1,51
Полиэтилен низкой плотности	1,52
Жесткий поливинилхлорид	1,53
Полиамид 66	1,54
Мочевиноформальдегидная смола	1,54
Сополимер стирола с акрилонитрилом	1,56
Поликарбонат	1,58
Полистирол	1,60
Полисulfон	1,63
Неорганическое стекло	1,60

6.2.1. Рефрактометрический метод

Для измерения показателя преломления наиболее часто используют рефрактометр Аббе (рис. 6.1).

Для проведения измерений требуется источник белого света и контактная жидкость, которая не должна взаимодействовать с поверхностью полимера. Показатель преломления этой жидкости должен быть заведомо выше, чем у исследуемого полимера. Образец может быть любых размеров, он лишь должен хорошо примыкать в поверхности фиксированной половины призмы рефрактометра. Поверхность образца, находящаяся в контакте с призмой, должна быть оптически плоской и полированной.

Испытания состоят в том, что образец приводится в соприкосновение с призмой, вводя между ними каплю контактной жидкости. Как уже говорилось, показатель преломления этой жидкости должен быть выше, чем у исследуемого образца. Далее, наблюдая через окуляр и вращая рукоятку настройки, смещают линию тени так, чтобы она попала в поле наблюдения. Корректор дисперсии настраивают таким образом, чтобы устранить все цвета с линии тени. Граница между светом и тенью должна быть резкой с четким разделением белого поля и небелого фона. На заключительной стадии эксперимента край границы тени совмещается с перекрестием волосяных линий, и значение показателя преломления считывается с дисплея.



Рис. 6.1. Рефрактометр Аббе (с разрешения Abbe Engineering Company)

6.2.2. Микроскопический метод

При применении этого метода необходимо иметь микроскоп не менее чем с 200-кратным увеличением. Образец должен иметь удобные размеры. Две противоположные поверхности должны быть параллельны и гладко отполированы. Испытания состоят в том, что производится попеременная фокусировка на верхнюю и нижнюю поверхности образца, что позволяет достаточно точно определить продольное смещение на линзе. Разница между двумя отсчетами представляет собой кажущуюся толщину образца. Тогда показатель преломления рассчитывается по формуле:

$$\text{Показатель преломления} = \frac{\text{Действительная толщина образца}}{\text{Кажущаяся толщина образца}}.$$

6.3. Измерения прозрачности и мутности (ASTM D1003)

Прозрачность определяется как отношение интенсивности света, прошедшего через образец, к интенсивности падающего светового потока. Этот показатель обычно выражают в процентах от падающего света. Так, например, полиметилметакрилат пропускает 92% падающего нормально к образцу светового потока. Около 4% нормально падающего светового луча преломляется на границе полимер–воздух [4].

Мутность — это внешний вид прозрачного образца, напоминающий облачность. Это явление обусловлено светорассеянием внутри полимера или от его поверхности. Мутность определяется как доля светового потока, проходящего через образец, которая отклоняется от направления луча вследствие обратного рассеяния. Обычно принимают, что если интенсивность прошедшего света более чем на 2,5 град отклоняется от интенсивности падающего луча, то соответствующий образец рассматривается как мутный. Обычно мутность бывает обусловлена поверхностными дефектами, вариациями плотности или включениями, вызывающими рассеяние света. Величину мутности также оценивают в процентах.

Светопропускание и мутность с практической точки зрения представляют собой исключительно важные характеристики материала. Так, например, материал, используемый для покрытий оконных стекол, должен иметь очень высокую прозрачность и мутность должна отсутствовать. Напротив, материалы, используемые для изготовления корпусов световой аппаратуры, должны в максимальной степени рассеивать свет и быть минимально прозрачными, чтобы исключить прямые лучи от ярких источников света. Однако такой материал должен обладать высоким светопропусканием [5].

6.3.1. Процедура испытаний

Для проведения испытаний необходимо иметь интегрирующий сферический измеритель мутности. Схема экспериментальной установки показана на рис. 6.2.

Испытуемый образец должен быть достаточно большим, чтобы перекрыть апертуру, но при этом не слишком большим, чтобы он мог располагаться по касательной к сферической части прибора. Наиболее часто для этой цели используют диск диаметром 2,00 дюйма.

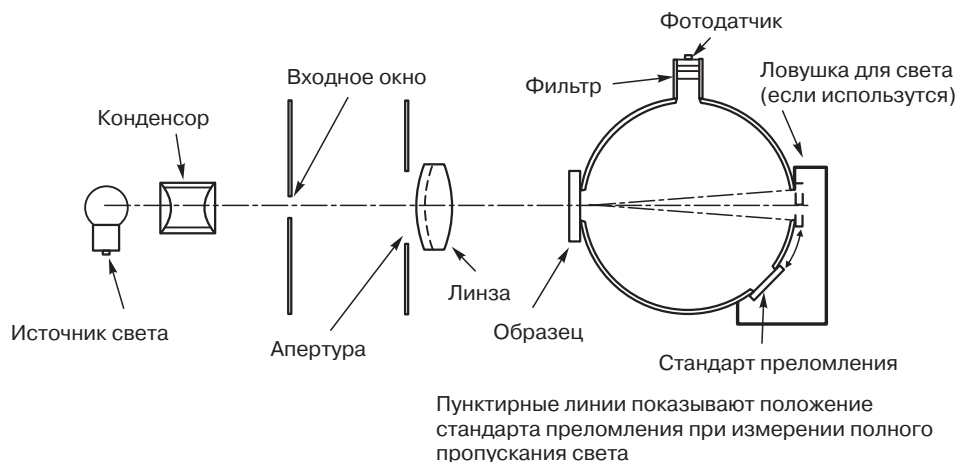


Рис. 6.2. Схематическое изображение прибора для измерений мутности (с разрешения *ASTM*)

Пример имеющегося на рынке прибора для измерения мутности, показан на рис. 6.3.

Процедура измерений состоит в получении четырех последовательных показаний, измеряемых с помощью фотодатчика, а именно:

T_1 — образец и ловушка для света установлены вне позиции для измерений, стандарт преломления установлен в позиции для измерений;

T_2 — образец и стандарт установлены в позиции для измерений, ловушка для света находится вне позиции для измерений;

T_3 — ловушка для света установлена в позиции для измерений, образец и стандарт находятся вне позиции для измерений;

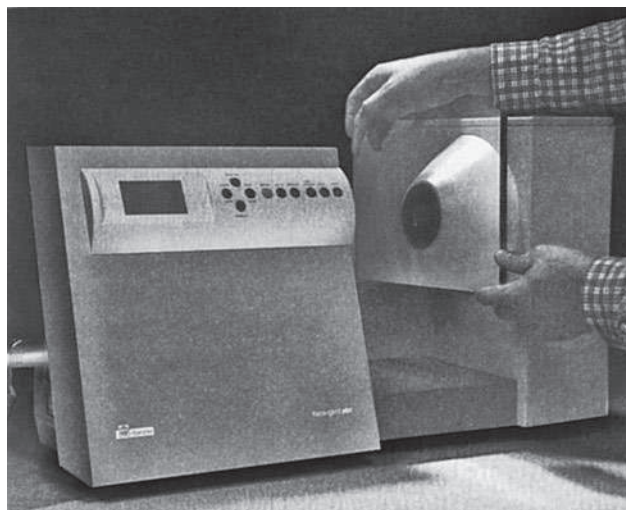


Рис. 6.3. Прибор для измерения мутности (с разрешения *Byk-Gardner USA*)

T_4 — образец и ловушка для света установлены в позиции для измерений, стандарт находится вне позиции для измерений.

Величины, получаемые в каждой серии измерений — это интенсивность падающего свет, общий световой поток, прошедший через образец, светорассеяние, обусловленное прибором, и светорассеяние, обусловленное прибором и образцом.

Общее светопропускание T_t , диффузное светопропускание T_d и мутность рассчитывают по формулам:

$$T_t = \frac{T_2}{T_1}; \quad T_d = [T_4 - T_3(T_2/T_1)]/T_1; \quad \text{Мутность в процентах} = \frac{T_d}{T_t} \cdot 100\%.$$

6.4. Фотоупругие свойства

Если рассматривать многие полимеры, находящиеся под действием внутренних или внешних напряжений, в поляризованном свете, то они обнаруживают отчетливо выраженные динамооптические свойства [6]. Световые волны в плоскости, в которой созданы деформации, распространяются с иной скоростью, нежели в перпендикулярном направлении. Различие в скоростях распространения световых волн в различных направлениях называют двулучепреломлением. Под оптической чувствительностью к действию напряжений понимают способность некоторых материалов к проявлению различного преломления (двулучепреломлению), если материал находится под действием напряжений [7].

Для того чтобы создать плоскую поляризацию некогерентного света используют поляризационные линзы (рис. 6.4).

Поляризованные солнечные очки и линзы, исключающие возможность ослепления от слишком яркого света путем плоской поляризации, — это только несколько примеров применения эффекта поляризации. Когда две такие поляризованные среды находятся под углом друг к другу, возникает оптический эффект вращения или же появляется двойное лучепреломление [8].

Фотоупругий эффект в прозрачных материалах используется инженерами-конструкторами для анализа полей напряжения, а двойное лучепреломление,

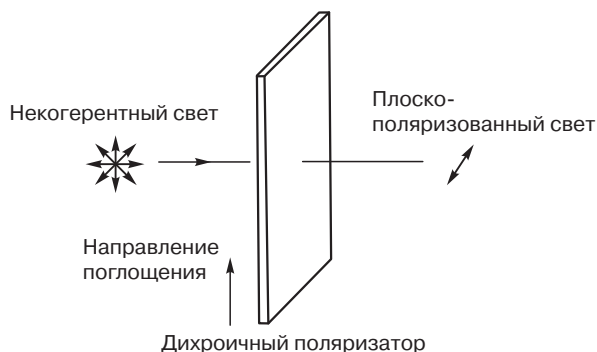


Рис. 6.4. Создание плоскополяризованного света (воспроизведено с разрешения Van Nostrand Reinhold Company)

появляющееся при переработке изделий, свидетельствует о наличии остаточных напряжений или ориентационных явлениях. Создание фотомodelей из прозрачных пластмасс и рассмотрение их в поляризованном свете позволяет проанализировать характер развития напряжений в таких сложных конструкциях, как мосты, крылья самолетов и зубчатые колеса. Этим методом можно также получить полезную информацию относительно мест концентрации напряжений, влияния острых углов и резких переходов по сечению изделия. Такому же анализу могут подвергаться отдельные части сложных изделий. Применение фотоэффекта позволяет сэкономить деньги, которые были бы затрачены на создание новых литьевых форм, а риск при эксплуатации ответственных изделий может быть минимизирован путем анализа их прозрачных фотомodelей и исключения мест концентрации напряжений. Такой анализ также полезен при выборе мест расположения литников, линий сварки, сверлений, при отжиге и последующей обработке изделий.

При производстве линз и других прозрачных деталей метод фотоупругости может использоваться для контроля качества. Это метод представляет собой способ неразрушающего контроля, который позволяет оценить условия разрушения деталей путем отливки нескольких образцов из прозрачных пластмасс и исследовании концентрации напряжений в этих образцах.

6.4.1. Определение динамооптической чувствительности

Для определения зависимости оптического эффекта от напряжения используется довольно простая установка, схема которой показана на рис. 6.5.

Эксперимент состоит в том, что исследуемый образец помещается между двумя поляризирующими средами. Наблюдение за этим образцом происходит со стороны, противоположной источнику освещения. Поляризованный свет характеризуется числом полос или колец, которое является мерой действующих напряжений. Если в качестве источника освещения используется белый свет, то картина поляризации

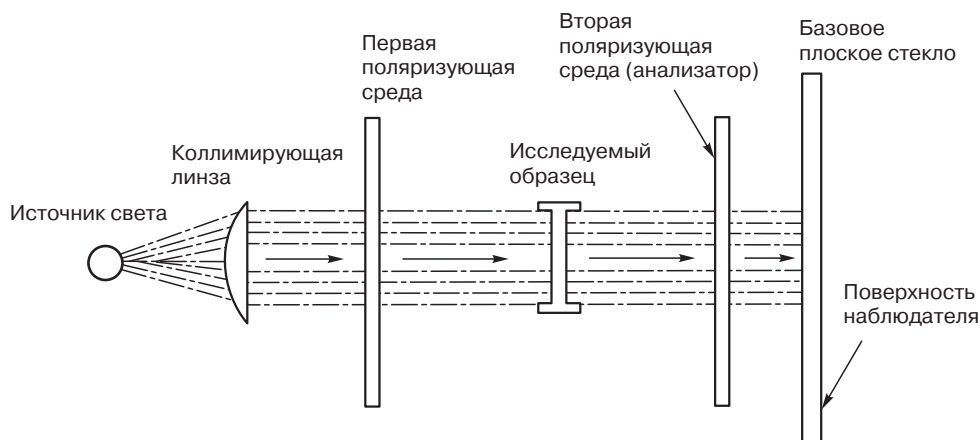


Рис. 6.5. Схема установки, используемой для оценки фотоупругих свойств материала (воспроизведено с разрешения McGraw-Hill Company)

представляет собой красивый набор полос всех цветов спектра. Но для количественного исследования распределения напряжений предпочтительнее использовать монохроматический свет, что позволяет получать более точные результаты.

Динамооптический коэффициент большинства пластмасс составляет величины порядка 1000 фунтов/дюйм²/одно кольцо. Это означает, что наблюдатель, рассматривающий через поляризатор пластину толщиной в 1 дюйм, освещенную монохроматическим поляризованным светом, увидит одно черное кольцо, если напряжения составляют 1000 фунтов/дюйм² [9].

Типичная картина фотоупругого эффекта представлена на рис. 6.6.

Для исследования эффекта фотоупругости может быть сконструирован световой короб, состоящий из поляризованных листов и источника света (рис. 6.7).

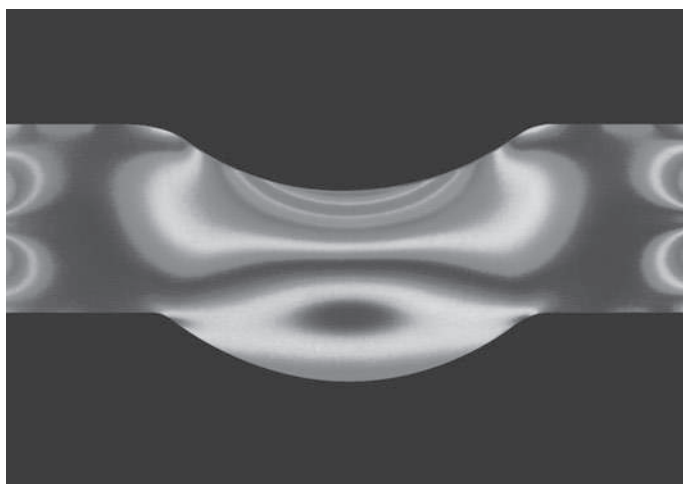


Рис. 6.6. Типичная картина, представляющая эффект фотоупругости (с разрешения *Measurements Group, Inc.*). См. также цветную вклейку

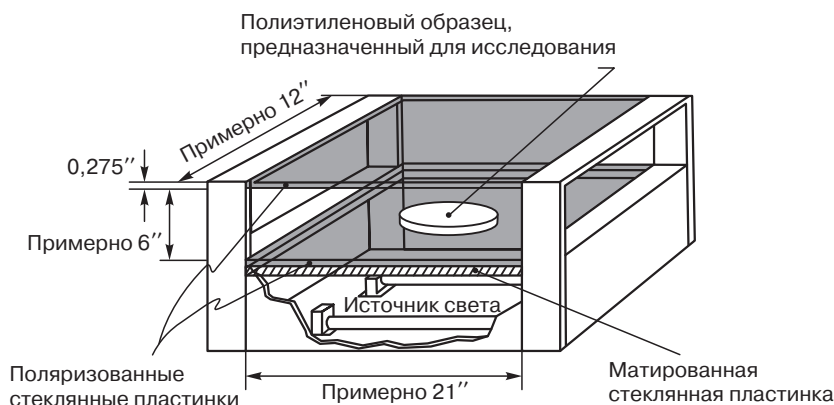


Рис. 6.7. Световой короб для исследования чувствительности материала по отношению к эффекту фотоупругости

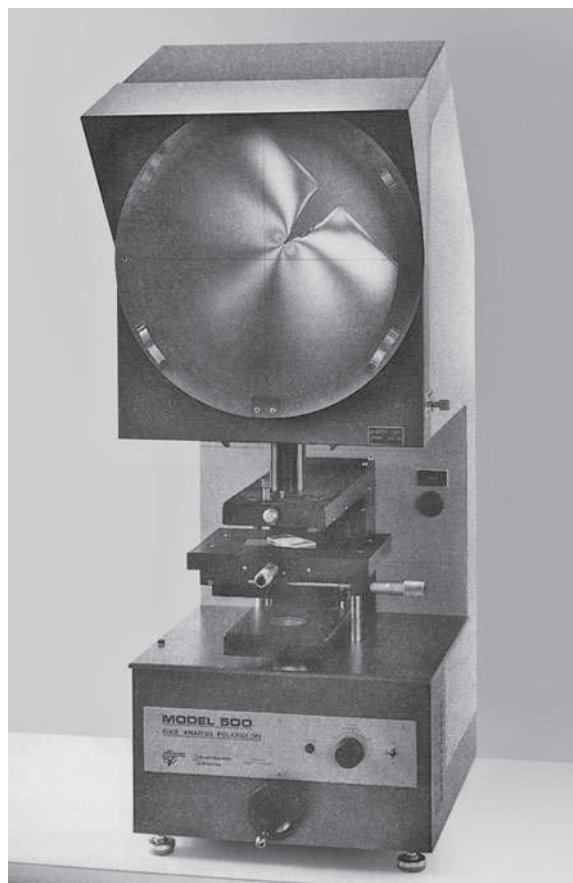


Рис. 6.8. Полярископ для исследования двух- и трехмерных фотоупругих моделей (с разрешения *Measurements Group, Inc.*)

На рис. 6.8 показан предлагаемый на рынке прибор для исследования фотоупругости.

6.5. Окраска

Возможность окрашивания полимерных материалов (причем краситель проникает во внутреннюю структуру материала) делает пластмассы одним из самых успешных материалов, разработанных в XX веке. Для того чтобы понять смысл измерений цвета, его оценку и допуска на изменения цвета, необходимо обратиться к теории цвета.

Восприятие цвета требует участие трех компонент — источника света, объекта и наблюдателя. Процесс состоит в следующем. Световой поток достигает поверхности образца. Далее часть светового потока отражается от поверхности. Угол этого зеркального или полного отражения равен углу, под которым пучок света падает на

поверхность образца, но распространяется в противоположном направлении. В отраженном свете содержатся все компоненты цветовой гаммы, которые присутствовали в падающем пучке света. Поэтому если объект освещался белым светом, то и отраженный свет будет белым.

Часть падающего света попадает внутрь образца, где он модулируется благодаря селективной адсорбции, отражается и рассеивается красителем, полимером и различными добавками. Селективная адсорбция и отражение различных длин волн создают цвет. Так, например, если объект поглощает все цвета спектра из падающего белого света, кроме голубого, то голубая компонента остается немодифицированной и отражается или проходит через образец. Наблюдатель видит эту голубую составляющую прошедшего или отраженного света и говорит, что исследуемый объект — голубой.

Цветовая гамма меняется в пределах от темного до светлого цвета. Самый темный — это черный цвет, серый занимает промежуточное положение, а самый светлый — это белый цвет. Эти цвета называют нейтральными. Цвет характеризуют «величиной», или «яркостью». Другая классификация основана на длинах волн: цвет может быть красным, синим, зеленым или желтым. При такой классификации используется термин «оттенок цвета». Именно оттенки цветовой гаммы позволяют определить окраску объекта, называя ее красной, желтой, зеленой, синей, пурпурной или же промежуточной между двумя различными цветами. Кроме того, используют такой термин, как «насыщенность» цвета или его «шкала», который выражает степень отклонения данного цвета от серого при одинаковой яркости. Эта классификация, основанная на определении оттенка и насыщенности цвета, представлена в виде карты на рис. 6.9.

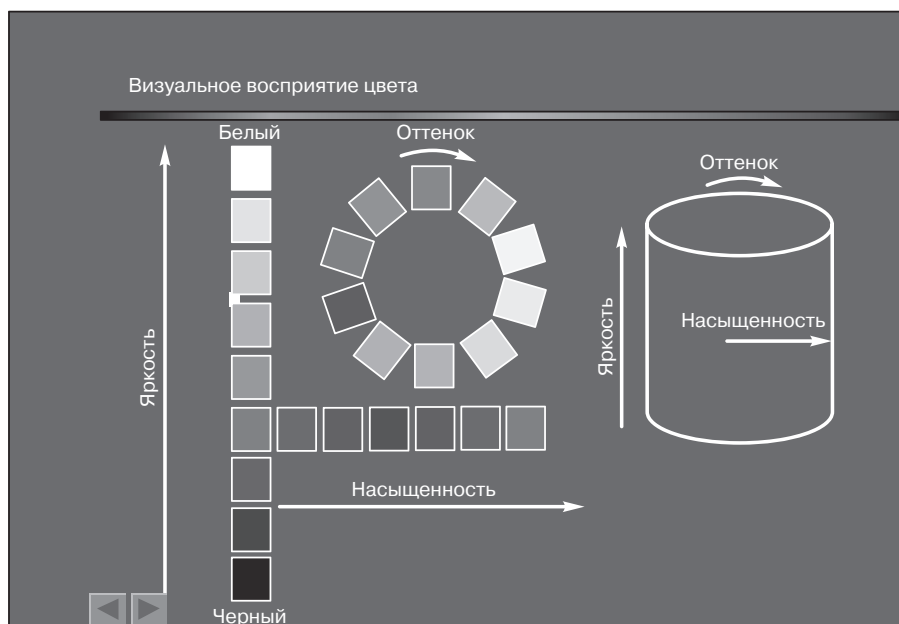


Рис. 6.9. Карта, показывающая соотношение между оттенками и насыщенностью цвета (с разрешения *Hunter Associates laboratory Inc.*) См. также цветную вклейку

Существенной особенностью различных оттенков цвета является длина волны. Белый свет разлагается на спектр благодаря разности длин волн различных цветов. Спектр видимого света располагается между светом фиолетовым (с длиной волны около 380 нм) и красным (с максимальной длиной волны 760 нм) [10].

Для того чтобы увидеть объект, он должен быть освещен. Тип осветительного устройства, угол освещения и угол, под которым наблюдатель смотрит на объект — все это влияет на результаты наблюдения. Поэтому при измерении окраски следует учитывать влияние спектрального распределения энергии освещения на внешний вид объекта.

Для стандартизации методики измерений Комиссия по источникам освещения *CIE* (*Commission Internationale de l'Eclairage*) установила ряд стандартов освещенности. Так, освещение типа *A* — это свет ламп накаливания, типа *B* — свет Солнца в полдень, типа *C* — освещение в пасмурный день. Еще один фактор, который должен приниматься во внимание при определении окраски, это собственно наблюдатель. Согласно стандарту *CIE*, «наблюдатель» — это численное описание цвета нормального человеческого глаза [11]. Трехмерная спектральная оценка света по *CIE* должна основываться на использовании стандартного источника освещения, стандартном наблюдателе и выбранном объекте.

Исходя из требований стандарта *CIE* ясно, что при соблюдении необходимых условий можно получить оценку цвета. Прибор, с помощью которого осуществляют соответствующие измерения, называют трехмерным («*tristimulus*») колориметром. Этот прибор определяет окраску в терминах трех основных цветов — красного, зеленого и синего, или, если сказать по-другому, терминах трех составляющих компонент белого цвета. Для того чтобы численно описать окраску в терминах цвета и яркости, предложен ряд шкал. Одна из наиболее популярных называется *L*-, *a*-, *b*-системой. На рис. 6.10 показано определение цвета в трехмерных координатах. Ось *L* ориентирована в вертикальном направлении и отвечает яркости окраски. Она проградуирована в единицах от 0 до 100, где 100 соответствует идеальному белому, а 0 идеально черному цвету. Оси *a* и *b* указывают на цвет и его насыщенность соответственно. Положительные значения *a* соответствуют доле красного, а отрицательные — зеленого цвета. Например, окраска школьного автобуса желтая, и это отвечает следующим значениям рассматриваемых показателей: $L = 70,3$, $a = 30,3$ и $b = 23,7$. Эта окраска в быту называется ярко-желтой, что отражается в высоком значении показателя *L*, а в окраске присутствует значительная доля красного цвета, что отражается в величинах показателей *a* и *b* [14].

В последние годы появилось новое поколение колориметров, основанных на использовании спектрофотометров. В этих приборах не моделируется человеческий глаз. Вместо этого проводятся измерения интенсивности светового потока в 16 точках по длине волн с интервалом в 20 нм, что позволяет перекрыть всю область видимого света. Доля отраженного света, полученного спектрофотометром, с помощью встроенного микропроцессора преобразуется в три основные характеристики окраски, обсуждавшиеся выше. Еще одним достоинством таких спектрофотометров является возможность выбора различных типов освещенности, согласно рекомендациям *CIE*. Даже если используется один и тот же источник освещенности, применение

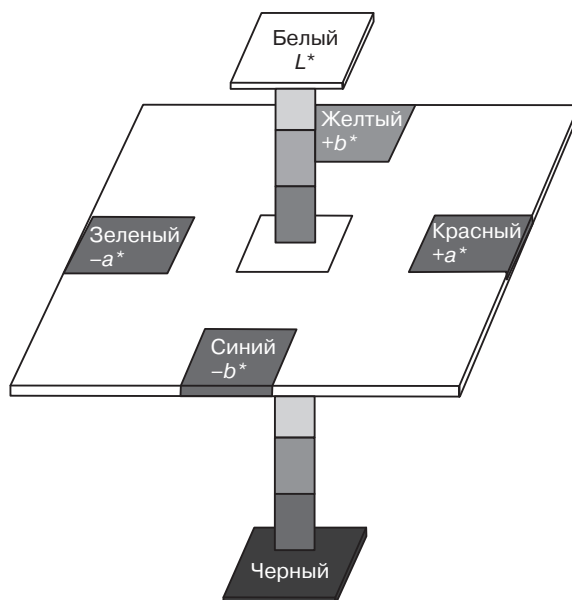


Рис. 6.10. Оценка окраски в трехмерных координатах L , a , b (с разрешения *Gretag Macbeth*). См. также цветную вклейку

микропроцессора позволяет рассчитать характеристики окраски, какими бы они были при различных типах освещенности.

При проведении исследовательских работ использование колориметров, которые дают достаточно простую трехмерную оценку окраски, оказывается недостаточным. Здесь требуется применение более строгих методов, основанных на спектрофотометрических измерениях. Спектрофотометр дает полную развертку спектра в области длин волн от 380 до 700 нм. Кроме того, эти приборы дают оценку отражения на различных длинах волн с интервалом 20 нм и позволяют рассчитать трехмерные координаты окраски, как об этом говорилось выше, и сравнить различные цвета.

6.5.1. Инструментальные методы контроля

В зависимости от поставленной задачи применяются колориметры двух типов. Колориметры с фильтрами представляют собой спектрофотометры, которые используются, когда потребитель заинтересован в получении только значений окраски в трехкоординатной системе и данных по разнице окраски. На рис. 6.11 показан имеющийся на рынке колориметр такого типа. Эти приборы используют, главным образом, для технологического контроля продукции, оценки качества, сравнения со спецификациями и требованиями по соответствию цвета образцу.

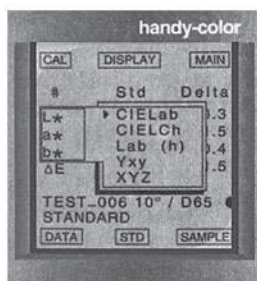
Спектрофотометры обычно используют для подбора цвета и иных исследовательских работ.



17. Цвет

17.11.2 Ручной колориметр™

Catalog 94/11



Технические данные

Геометрия	Угол наблюдения 45° / Двухлучевая оптика под углом 0°
Область измерений	390–710 нм
Источник энергии	8 перезаряжаемых NiCd аккумуляторов с возможностью проведения примерно 500 измерений на каждой перезарядке
LCD-дисплей	жидкокристаллический размером 50×50 мм (2×2 дюйма)
Язык	Английский, немецкий, французский, итальянский, испанский
Емкость хранения	500 образцов, 50 стандартов
Возможности дисплея	Цветовая шкала, работает/отказ, графики в шкалах CIELab, Lab(h)
Шкалы цвета	CIELab, CIELCh, Lab(h), Yxy, XYZ
Разность цвета	$\Delta E_{L^*a^*b^*}$, $\Delta E_{L^*a^*b^*}$, ΔE_{CMC} Разности компонент цвета в шкалах
Индексы	Метамерия Степень желтизны YI E312, YI D1925 Степень белизны WI E313, по CIE Яркость цвета Затененность
Осветители	Дневной свет C, D65 Вольфрамовая лампа накаливания типа A Белый флуоресцентный свет F2 Узкополосный белый флуоресцентный свет F11
Положение наблюдателя по CIE	Под углом 2° или 10°
Лампа	Пульсирующая вольфрамовая лампа накаливания
Срок жизни лампы	Примерно 500 000 измерений
Размеры	Длина×ширина×высота 10×8,9×25 см 4×3,5×10 дюймы
Вес	10 кг (2,3 фунта)
Площадь измерения:	
большая площадь	200 мм (0,79 дюйма)
малая площадь	11 мм (0,43 дюйма)

Рис. 6.11. Колориметр (с разрешения BYK-Gardner, USA)



Рис. 6.12. Спектрофотометр (с разрешения *Gretag Macbeth*)

На рис. 6.12 показан внешний вид имеющегося на рынке спектрофотометра, оборудованного монитором для представления результатов измерений и построения графиков.

В табл. 6.2 приведена сводка различий между колориметрами и спектрофотометрами.

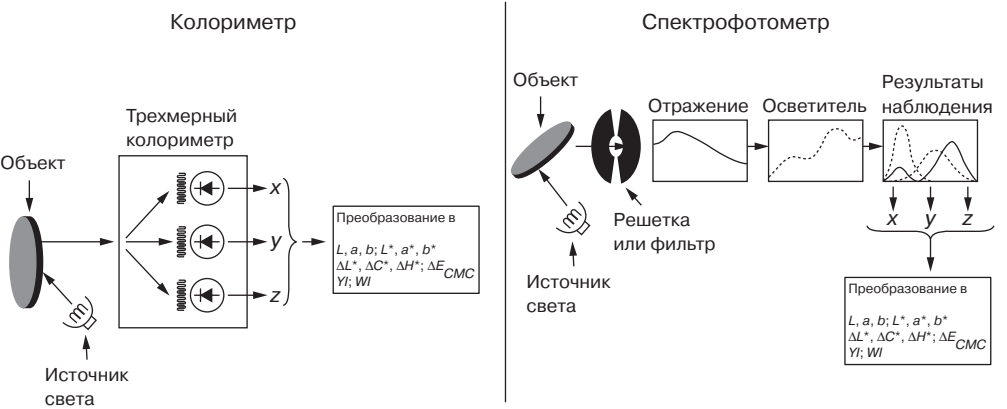
Методика работы с современным фотоколориметром очень проста. Прежде всего, прибор калибруют, используя имеющиеся стандарты. Далее, в соответствии с рекомендациями *CIE*, выбирают способ освещения. Плоский окрашенный образец устанавливают в держателе и направляют на него свет от источника. На дисплее немедленно появляются значения интенсивности отражения во всей видимой части спектра с интервалом в 20 нм. Встроенный микропроцессор сразу же дает значения показателей цвета в шкале *CIE Lab* и представляет график спектральной интенсивности в функции длины волны света. Подбор цвета исследуемого материала осуществляется путем сопоставления его спектра со спектром стандартного образца (рис. 6.13, а).

К числу дополнительных полезных возможностей большинства имеющихся в продаже колориметров и спектрофотометров относится возможность измерения индексов желтизны (по *ASTM D1925*) и белизны (по *ASTM D2244*). Эти стандарты детально описывают процедуру инструментального контроля разности цветов непрозрачных материалов.

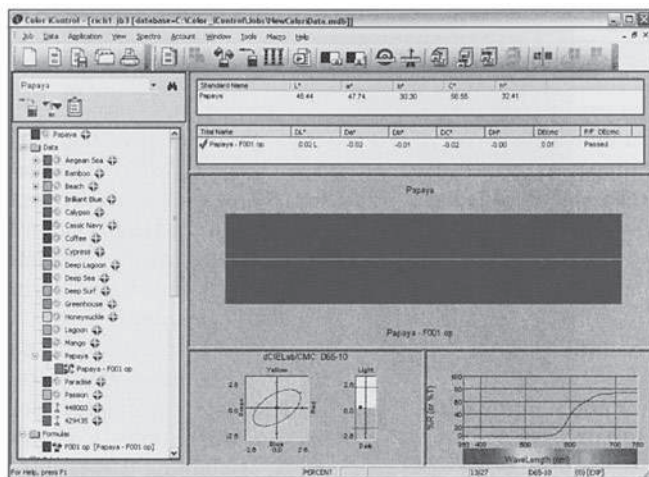
В последние годы достигнут значительный прогресс в развитии новейших технологий измерения цвета. Большинство достижений относится к области создания портативных спектрофотометров. Новые переносные спектрофотометры (см. рис. 6.13, б) позволяют производить оценку цвета непосредственно в производственных условиях. Некоторые из таких спектрофотометров дают возможность строить полную

Таблица 6.2. Сопоставление колориметров и спектрофотометров

Колориметры	Спектрофотометры
<p>Инструмент для психофизического анализа. Позволяет получать данные, коррелирующие с оценкой человеческого глаза. Оценки выражаются непосредственно в принятых шкалах XYZ, L,a,b и др.</p> <p>Состоит из датчика и простого процессора</p> <p>Оборудован системой освещения/наблюдатель (обычно под углом 2°)</p> <p>С помощью фильтров исключает широкую область длин волн</p> <p>Обычно — это более грубый и менее сложный прибор, чем спектрофотометры</p> <p>Удобен для рутинных измерений цвета и оценки небольших различий в цвете при сопоставимых условиях.</p> <p>Оптимален для контроля качества</p> <p>Пример прибора: <i>HunterLab D25</i> — серийных приборов для колориметрических измерений</p>	<p>Инструмент для физического анализа — осуществляет волновой спектральный анализ отраженного и/или проходящего света без привязки к оценке человеческим глазом. Может использоваться для не прямой оценки психофизических (колориметрических) характеристик окраски</p> <p>Состоит из датчика, процессора и включает программное обеспечение</p> <p>Оборудован различными комбинациями систем освещения/наблюдатель, которые могут использоваться для оценки стандартных показателей окраски и относительной цветности образцов</p> <p>С помощью призм, решеток или фильтров исключает узкую полосу спектра</p> <p>Более сложный и комплексный прибор по сравнению с колориметром</p> <p>Удобен для подбора компонент цвета и оценки метамерии при различных комбинациях освещения/наблюдатель</p> <p>Оптимален как для контроля качества, так и для исследовательских работ</p> <p>Примеры приборов: спектрофотометры <i>HunterLab</i> серии <i>ColorQUESTS</i>, <i>LabScans</i>, <i>MiniScans</i> и <i>UltraScans</i></p>



а)



б)

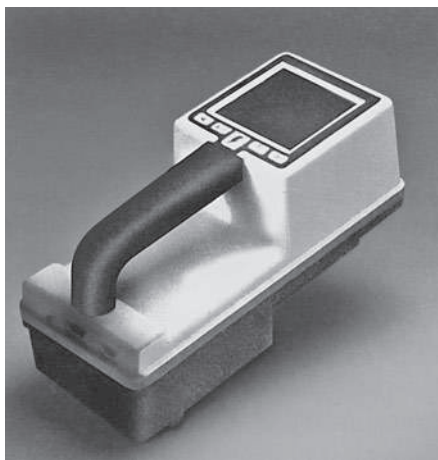


Рис. 6.13. Типичная спектральная кривая отражения света (а) (с разрешения *Gretag Macbeth*). Показан также портативный спектрофотометр (б) (с разрешения *Datacolor*)

спектральную характеристику цвета. Спектрофотометры, используемые в лабораторных условиях, усовершенствованы с тем, чтобы осуществлять компьютерный контроль за использованием линз, фильтров ультрафиолетового излучения и зеркальных портов. Возможность калибровки прибора в ультрафиолетовой области представляется важной особенностью измерительной техники, позволяющей получать более точные данные для флуоресцентного света. Преимущества, связанные с использованием современного программного обеспечения, позволяют проводить статистический анализ окраски, что важно для измерений и коррекции цвета, а также подбора цвета.

Предлагаются также колориметры непрерывного действия для установки в производственных линиях. Эти приборы предназначены для того, чтобы их можно было использовать для контроля производства в неблагоприятной атмосфере цеха, в котором производят окрашенные гранулы и иные экструдированные или литьевые изделия. Информация об окраске изделия получается в реальном времени, что позволяет пользователю осуществлять контроль за тенденциями изменения цвета и вовремя вносить необходимые коррективы.

6.5.2. Визуальная оценка цвета (*ASTM D1729*)

Переработчики пластмасс требуют от производителя соблюдения заданного цвета. Производитель использует различные инструментальные методы контроля, такие как спектрофотометры и колориметры, и вполне убежден, что продукция удовлетворяет требованиям потребителя. Однако когда материал попадает к потребителю, последний часто бывает разочарован цветом полученного полимера. Случается так, что поставщик вынужден трижды изменять цвет с тем, чтобы удовлетворить запросы потребителя.

Сценарий такого рода часто встречается как при производстве изделий из пластмасс, так и в других областях промышленности. Два объекта одного и того же цвета могут не различаться, если они рассматриваются при освещении одного типа (например, при дневном свете), но их цвет кажется различным, если используется иное освещение (например, свет ламп накаливания). Это явление известно под названием метамерия. Под этим названием имеют в виду явление несовпадения относительной окраски сопоставляемых образцов при изменении типа освещения или наблюдателя.

В целях упрощения визуальной оценки окраски и минимизации изменений, обусловленных различием в способах освещения образцов, был предложен стандартный метод определения различий цвета. Согласно этому методу испытаний определяются спектральные характеристики источника света. Для визуальной оценки цвета используют три различных типа источника света. За условия дневного освещения принимают спектральный состав света дневного северного неба с умеренной облачностью. В качестве освещенности в условиях закрытого помещения принимают свет лампы накаливания с температурой раскаленной нити в 2854 К. И в качестве флуоресцентного освещения принимают свет дневной лампы с температурой 4400 К.

На рис. 6.14 показан внешний вид имеющегося на рынке оборудования для визуального контроля цвета. Фон интерьера помещения образован нейтральным серым цветом. Образец рассматривается в специально оговоренных условиях освещенности и сравнивается со стандартом. Результатом испытаний является оценка отклонения цвета от стандарта, оцениваемая по яркости, насыщенности и окраске с указанием на то, в каком порядке необходимо вносит коррекции. Во многих случаях поставщики согласуют допуски на варьирование цвета, так что можно легко установить и согласовать отклонения от контрольного образца.

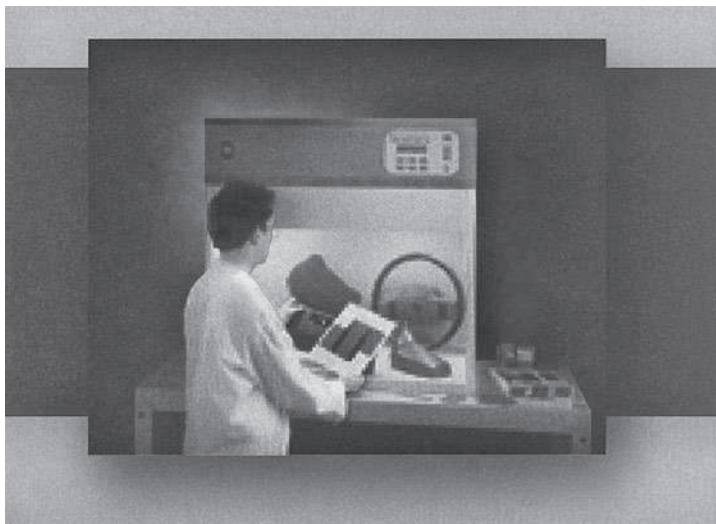


Рис. 6.14. Лабораторная установка для визуальной оценки цвета (с разрешения Gretag Macbeth)

6.6. Отражательная способность (ASTM D2457, D523)

Под отражательной способностью («*specular gloss*») понимается возможность поверхности образца отражать, как зеркало, падающий на него поток света. Соответствующий метод разработан с целью сопоставить результаты инструментальных измерений с блеском поверхности, наблюдаемым визуально по отражению света при соответствующих углах. Пучок света направляется на образец под некоторым углом, а отраженный свет собирается и измеряется его интенсивность. Все стандарты, согласно которым оценивается отражательная способность поверхности, основываются, прежде всего, на сопоставлении отражения от поверхности испытуемого образца с отражением от хорошо отполированной черной поверхности, отражательная способность которой принимается за 100.

В основном используются три значения углов падения света — 20, 60 и 80 град. При увеличении угла падения света показатель отражательной способности возрастает [14].

Прибор для измерения отражения состоит из источника света и оптической системы. В качестве источника используется свет лампы накаливания. Оптическая система включает фокусирующую линзу и систему сбора отраженного света. Луч света от источника направляется на образец. Чувствительный фотодетектор собирает отраженный свет и преобразует его в электрический сигнал, который через усилитель попадает на аналоговый или цифровой датчик. Измеренный сигнал преобразуется в единицы отражательной способности («единицы блеска»).

Схематическое изображение прибора для измерения отражательной способности показано на рис. 6.15.

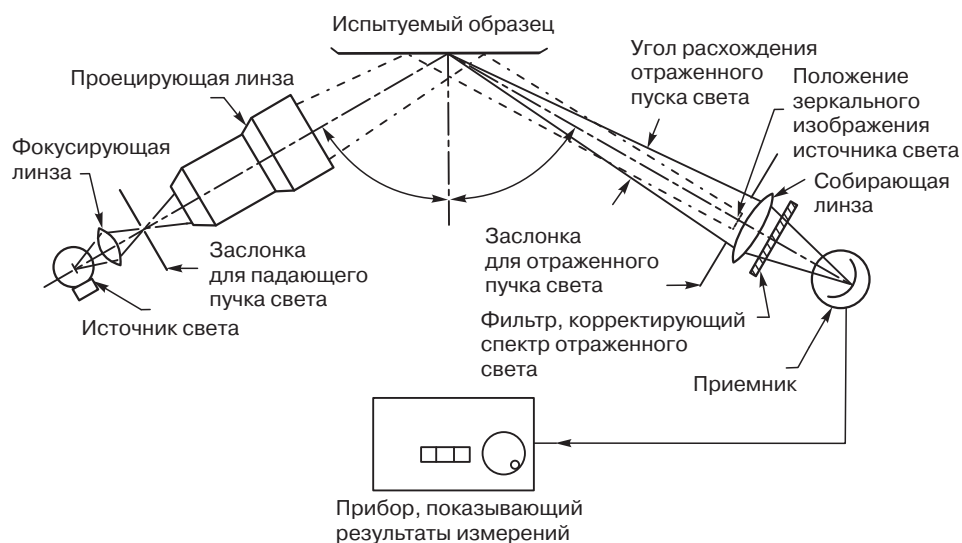


Рис. 6.15. Схема прибора для измерения отражательной способности поверхности образца. Показаны положения апертуры, источника и приемника света (воспроизведено с разрешения *ASTM*)



Рис. 6.16. Прибор для измерения отражательной способности поверхности — *glossmeter* (с разрешения *BYK-Gardner, USA*)

Методика измерения интенсивности отражения очень проста. Прибор включается, и проводятся измерения отражательной способности черного стандарта. Шкала с помощью регулятора устанавливается таким образом, чтобы получить значение, отвечающее этому стандарту. Затем датчик помещается на поверхность исследуемого образца, и величина отражения считывается непосредственно со шкалы аналогового или числового прибора. Линейность шкалы прибора грубо контролируется путем измерения блеска другого — белого — стандарта, который должен давать значение отражательной способности, не выходящего за пределы 1 единицы по отношению к принятой величине отражения этого стандарта.

На рис. 6.16 показан внешний вид имеющегося на рынке прибора для измерения отражательной способности поверхности.

Литература

1. Deanin R.D. *Polymer Structure Properties and Applications*, Cahnners, Boston, MA, 1972, p. 248.
2. *Ibid.*, p. 248.
3. Byrdson I.A. *Plastic Materials*, Reinhold, New York, 1970, p. 96.
4. *Ibid.*, p. 241.
5. Ives C.G., Mead J.A. and Riley M.M., *Handbook of Plastics Test Methods*, IILFFE Books, London, England, 1971, p. 432.
6. Baer E. *Engineering Design for Plastics*, Reinhold, New York, 1964, p. 604.
7. Milby R.V. *Plastics Technology*, McGraw-Hill, New York, 1973, p. 548.
8. Levy S. and Dubois J.H., *Plastics Product Design Engineering Handbook*, Reinhold, New York, 1977, p. 309–310.
9. Kinney G.E. *Engineering Properties and Applications of Plastics*, Wiley, New York, 1957, p. 220.
10. McCamy C.S. *Color Measurement and Specification*, Macbeth Corporation, Newburgh, NY, Technical Literature, p. 10.
11. Billmeyer E.W. and Saltzman M. *Principles of Color Technology*, Interscience, New York, 1966, p. 38.
12. Gardner Laboratories, *Tech. Bull.: Color and Color Related Properties*. Bull. No. 010, Silver Spring, MD.
13. McCamy, Reference 10, p. 9.
14. Gardner Laboratories, *Tech. Bull.: Gloss Measurement*. Bull. No. 073, Silver Spring, MD.

Рекомендуемые источники

1. Webber T.G. (Ed.) *Coloring of Plastics*, Wiley-Interscience, New York, 1979.
2. Ahmed M. *Coloring of Plastics Theory and Practice*, Reinhold, New York, 1979.
3. Ross L. and Birley A.W. «Optical Properties of Polymeric Materials and their Measurements» *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 6(1973), p. 795.
4. Jenkins F.A. and White H.E. *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, New York, 1957.

5. Jacobs D.H. *Fundamentals of Optical Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1943.
6. X-Rite Incorporated, Tech. Bull.: «Understanding Color Communication» Grandville, MI.
7. Mulholland B.M. «Introduction to Color Theory» *Plastics Engineering*, August 97, p. 33.
8. Technical Bulletins «How to Choose the Right Refractometer», «Refractive Index to Transparent-Solid Materials» Reichert, Inc., Depew, New York.

7. Испытания, характеризующие материал

7.1. Введение

Промышленность пластмасс за последние 20 лет показала феноменальный рост. Потребление пластмасс выросло в четыре раза. В настоящее время на рынке имеется огромное число предприятий, которые перерабатывают более чем 100 миллионов фунтов полимерных материалов в год. Возрастающее число технологов, работающих в области переработки полимеров, занимаются поисками надежных методов характеристики материалов с тем, чтобы обезопасить себя от изменений свойств поставляемого материала от партии к партии. Такие колебания свойств и технологичности полимера очень дорого обходятся при его переработке.

Для того чтобы понять причины колебаний свойств различных партий, необходимо представить себе, как происходит процесс полимеризации. Механизм полимеризации зачастую может быть очень сложным. В целом полимеризация состоит в том, что мономер или смесь мономеров вводится в реакционный сосуд совместно с некоторыми другими ингредиентами, такими как катализатор или инициатор и вода, в зависимости от типа полимеризационного процесса. Все компоненты перемешиваются с определенной скоростью. Продолжительность реакции, температура и давление тщательно контролируются. В результате химического процесса мономер превращается в полимер. Свойства конечного продукта зависят от ряда факторов, например, от соотношения долей мономера и воды, присутствия воды, скорости перемешивания, удаления избыточного тепла, выделяющегося в ходе полимеризации, и способности полимера растворяться в мономере. Ситуация усложняется еще и тем, что один и тот же полимерный продукт может быть получен при использовании различных технологических схем.

Поскольку чрезвычайно трудно получить моодисперсные полимеры (то есть материалы, в которых все молекулы имеют одну и ту же длину), в действительности мы имеем дело с материалами, в которых размеры и вес молекул, входящих в состав полимера, оказываются различными. Колебания размеров и веса макромолекул в полимере чрезвычайно трудно контролировать. Наличие в полимере молекул различной длины называется молекулярно-весовым распределением. Технологические свойства полимеров при переработке в очень сильной степени зависят от типа молекулярно-весового распределения, т. е. от того, является ли оно широким или узким.

Сама природа полимеризационных процессов требует создания методов характеристики материалов, которые бы показали, каким образом изменяются их свойства.

В табл. 7.1 и 7.2 перечислены различные используемые для этого методы, включая методы реологии и термического анализа.

Таблица 7.1. Характеристика материалов, основанная на использовании методов реологии и термического анализа

Свойство +Метод = Решение							
Свойство	Реометрия			Термический анализ			
	Реометр крутящего момента	Ротационный реометр	Капиллярный вискозиметр	ДМА	ДСК	ТГ/ТТА	ТИА
Стабильность при раздуве пленочного рукава	✓	✓					
Анализ состава					✓	✓	
Компаундирование	✓		✓				
Ползучесть и релаксация напряжений		✓		✓			✓
Исследование сшивания	✓	✓		✓	✓		
Степень поперечных сшивок				✓	✓		
Диэлектрические свойства							
Раздув (разбухание) струи	✓		✓				
Электрореология		✓					
Продольная вязкость			✓				
Гамма, бета переходы				✓		✓	
гель-точка		✓	✓			✓	
Температура стеклования				✓	✓	✓	✓
Мутность и блеск пленки	✓	✓					
Теплоемкость				✓			
Сопротивление удару		✓		✓		✓	
Предсказания долговременной прочности		✓		✓			
Измерение степени дисперсности	✓	✓		✓	✓		
Измерение реологических свойств	✓	✓	✓	✓			✓
Прочность расплава		✓	✓				
Температура плавления	✓			✓	✓	✓	✓
Молекулярный вес	✓	✓	✓	✓			
Молекулярно-весовое распределение	✓	✓	✓	✓			
Устойчивость к окислению	✓				✓		
Технологичность при переработке	✓	✓	✓		✓		
Приготовление образцов	✓						
Сдвиговая вязкость	✓	✓	✓				
Силы усадки							✓
Липкость и адгезия		✓		✓			✓
Термическая устойчивость	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Вязкоупругие свойства		✓		✓			✓

Таблица 7.2. Приложение различных методов характеристики материалов

Получаемая информация	Метод	Получаемые данные
<i>Композиции</i>		
Смолы, полимеры, модификаторы	ДСК	Тип вещества, а также состав сополимеров, смесей и сплавов
	ГХ	Полимеры, олигомеры и содержание остаточного мономера
Добавки	ДСК	Определение присутствия и количества по термическому эффекту (стабилизаторы, антиоксиданты, пенообразователи, пластификаторы и др.)
	ГХ	Определение любых органических добавок (по их молекулярному весу)
Армирующие элементы, наполнители, влага	ТГ	Количество (по весу образующейся золы)
	ТГ	Количество (по потери веса)
Летучие	ДСК	Количество (если тепловой эффект достаточно велик)
Содержание вторичных компонент	ДСК	Определение количества по смещению точки плавления
	ГХ	Определение количества исходя из сдвига молекулярно-весового распределения
<i>Технологичность при переработке</i>		
Плавление	ДСК	Температура плавления, область плавления (для каждого компонента в смеси); затраты энергии
Характеристики текучести	ГХ	Определяется из соотношения низко- и высокомолекулярных компонент в молекулярно-весовом распределении
<i>Физические и механические свойства</i>		
Температура стеклования	ДСК	Обнаруживается по ступенчатому изменению поглощения энергии при нагревании смол
	ТМ	Определяется по термическому расширению образца
Кристалличность	ДСК	Рассчитывается по теплоте плавления при температуре перехода; позволяет также найти температурно-временную зависимость при достижении заданной степени кристалличности
Растяжение, изгиб, сопротивление удару	ГХ	Находится по соотношению содержания высоко- и низкомолекулярных фракций в молекулярно-весовом распределении
	ДСК	Рассчитывается по составу композиции
<i>Характеристики сшивания термореактивных смол</i>		
Реакционно-способные материалы Препреги	ДСК	Определяются гель-точка, температура и время структурирования
	ДСК	Определяется содержание несшитых смол в препрегах на В-стадии или после завершения процесса (по содержанию летучих)
	ГХ	То же, что и выше, но контролируется по величине молекулярной массы остатков после завершения реакции

Примечание. ДСК — дифференциальная сканирующая калориметрия; ГХ — гель-хроматография; ТМ — термомеханический анализ.

Существуют различные подходы к характеристике полимерных материалов. Некоторые из них достаточно просты, другие — это более строгие и сложные методы. Наиболее часто используют следующие пять различных методов:

- измерение индекса расплава (показателя текучести расплава) — этот метод относится к области реологии;
- измерения вязкости;
- гель-проникающая хроматография;
- термический анализ (ТГА, ТМА, ДСК);
- спектроскопия.

Указанные методы не специфичны для идентификации материала. Определение типа полимера может быть сделано путем сравнения полученной характеристики свойств с аналогичной характеристикой, ранее установленной для известного материала или композиции. В ином случае необходимо применять иные аналитические методы.

7.2. Измерения индекса расплава (ASTM D1238, ISO 1133)

7.2.1. Значение метода

Индекс расплава, также называемый показателем текучести расплава (ПТР), характеризует скорость истечения расплава термопласта через насадку (капилляр) заданных диаметра и длины в оговоренных условиях по температуре и давлению. Этот метод испытаний предназначен, прежде всего, для характеристики текучести расплава. Получаемые значения ПТР предназначены для классификации различных марок термопластов. Сопротивление течению высокомолекулярных полимеров выше, чем низкомолекулярных материалов.

Однако данные, получаемые при таких испытаниях, нельзя напрямую связать с технологичностью расплава при его переработке. Это объясняется, в частности, тем, что полимеры очень редко производятся без добавок различного рода, которые влияют на технологичность материала, а именно на его стабильность и текучесть. Влияние таких добавок не очень явно отражается на значениях индекса расплава.

Реологические свойства расплавов полимеров зависят от ряда факторов. Поскольку влияние этих факторов по-разному проявляется при крупномасштабном производстве, результаты измерений индекса расплава могут не коррелировать с технологичностью материала.

7.2.2. Методика измерений

Методика измерений индекса расплава состоит в том, что прибор (показанный на рис. 7.1) предварительно нагревается до заданной температуры. Требуемое количество исследуемого материала загружается в цилиндр прибора сверху и поджимается поршнем.

Стандартизованные условия измерений индекса расплава приведены в табл. 7.3, а и б.

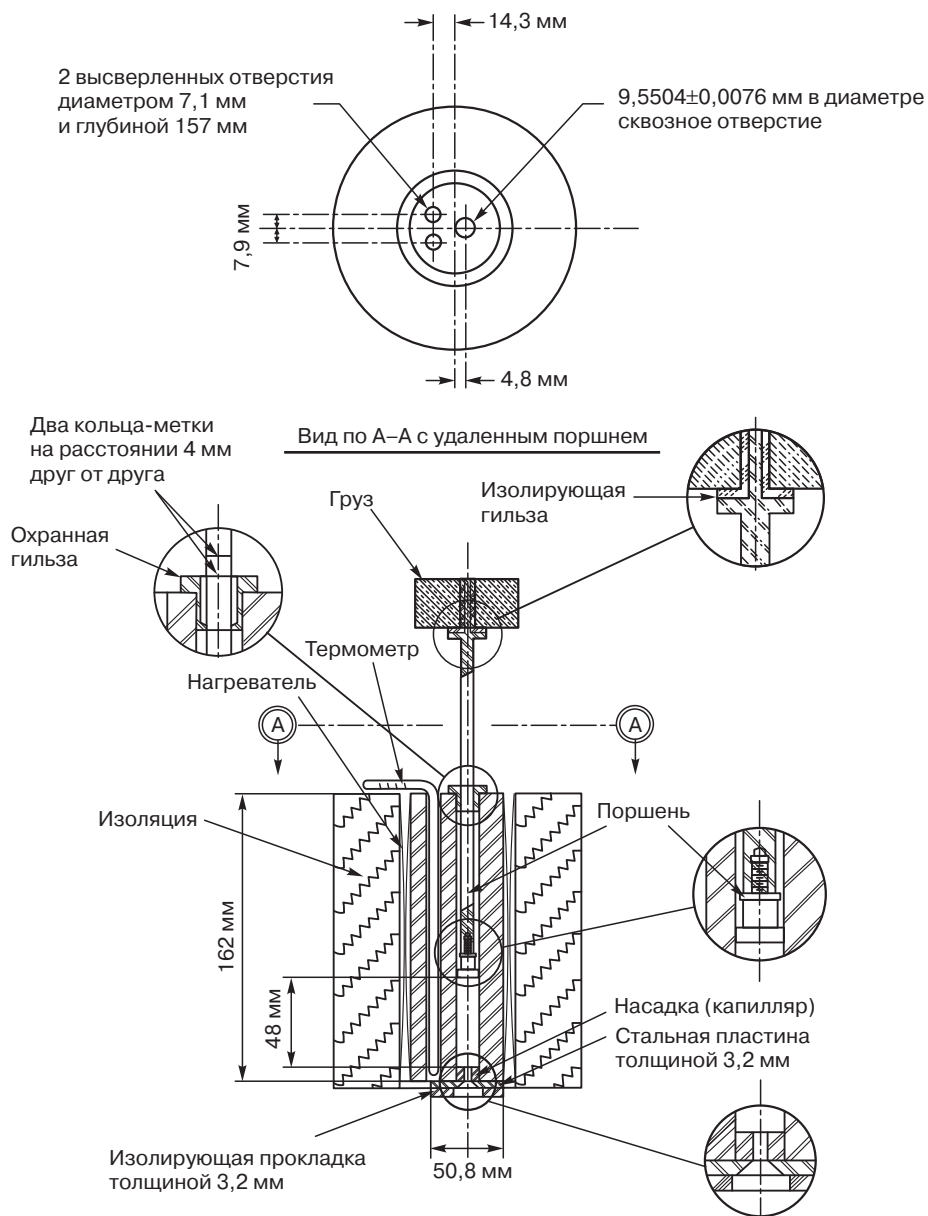


Рис. 7.1. Схематичное изображение прибора для измерения индекса расплава (воспроизведено с разрешения ASTM)

Таблица 7.3, а. Стандартные условия испытаний

Материал	Условия испытаний	
Полиацетали (гомо- и сополимеры)	190/2,16	190/1,05
Полиакрилаты	230/1,2	230/3,8
АБС-пластики	200/5,0	230/3,8
	220/10	
Смеси АБС-пластиков с поликарбонатом	230/3,8	250/1,2
	265/3,8	265/5,0
Эфиры целлюлозы	190/0,325	190/2,16
	190/21,6	210/2,16
Этилен хлор/фтор сополимеры	271,5/2,16	
Сополимеры тетрафторэтилена	297/5,0	
Полиамиды	275/0,325	235/1,0
	235/2,16	235/5,0
	275/5,0	
Сополимеры перфторэтиленпропилена	372/2,16	
Полиперфторалкоксиалканы	372/5,0	
Полихлортрифторэтилен	265/12,5	
Полиэтилены	125/0,325	125/2,16
	2,50/1,2	
	190/0,325	190/2,16
	190/21,6	190/10
	310/12,5	
Поликарбонат	300/1,2	
Полимонохлортрифторэтилен	265/21,6	
	365/31,6	
Полипропилен	230/2,16	
Полистирол	200/5,0	230/1,2
	230/3,8	190/5,0
Политерефталат	250/2,16	210/2,16
	285/2,16	
Поливинилацеталь	150/21,6	
Поливинилиденфторид	230/21,6	
	230/5,0	
Полифениленсульфид	315/5,0	
Сополимер стирола с акрилонитрилом	220/10	230/10
	230/3,8	
Термопластичный эластомер со стиролом	190/2,16	200/5,0
Термопластичный эластомер на основе простых и сложных эфиров	190/2,16	220/2,16
	230/2,16	240/2,16
		250/2,16
Термопластичный эластомер (типа <i>TEO</i>)	230/2,16	
Сополимеры винилиденфторида	230/21,6	
	230/5,0	

При $T_m = 100^\circ$ использовать 120/5,0 или 21,6Из стандарта *ASTM D 1238*. Воспроизведено с разрешения *ASTM*.

Таблица 7.3, б. Стандартные условия испытаний. Температура и нагрузка

Условия Стандарт Обозначение	Температура, °C	Общая нагруз- ка, включая вес поршня	Давление	
			кПа	фунт/ двойм ²
125/0,325	125	0,325	44,8	6,5
125/2,16	125	2,16	298,2	43,25
150/2,16	150	2,16	298,2	43,25
190/0,325	190	0,325	44,8	6,5
190/2,16	190	2,16	298,2	43,25
190/21,60	190	21,60	2982,2	432,5
200/5,0	200	5,0	689,5	100,0
230/1,2	230	1,2	165,4	24,0
230/3,8	230	3,8	524,0	76,0
265/12,5	265	12,5	1723,7	250,0
275/0,325	275	0,325	44,8	6,5
230/2,16	230	2,16	298,2	43,25
190/1,05	190	1,05	144,7	21,0
190/10,0	190	10,0	1379,0	200,0
300/1,2	300	1,2	165,4	24,0
190/5,0	190	5,0	689,5	100,0
235/1,0	235	1,0	138,2	20,05
235/2,16	235	2,16	298,2	43,25
235/5,0	235	5,0	689,5	100,0
250/2,16	250	2,16	298,2	43,25
310/12,5	310	12,5	1723,7	250,0
210/2,16	210	2,16	298,2	43,25
285/2,16	285	2,16	298,2	3,25
315/5,0	315	5,0	689,5	100,0
372/2,16	372	2,16	298,2	43,25
372/5,0	372	5,0	689,5	100
297/5,0	297	5,0	689,5	100
230/21,6	230	21,6	2982,2	432,5
230/5,0	230	5,0	689,5	100
265/21,6	265	21,6	2982,2	432,5
265/31,6	265	31,6	4361,2	632,5
271,5/2,16	271,5	2,16	298,2	43,25
220/10,0	220	10,0	1379,0	200,0
250/1,2	250	1,2	165,4	24,0
265/3,8	265	3,8	524,0	76,0
265/5,0	265	5,0	689,5	100,0

Из стандарта *ASTM D1238*. Воспроизведено с разрешения *ASTM*.

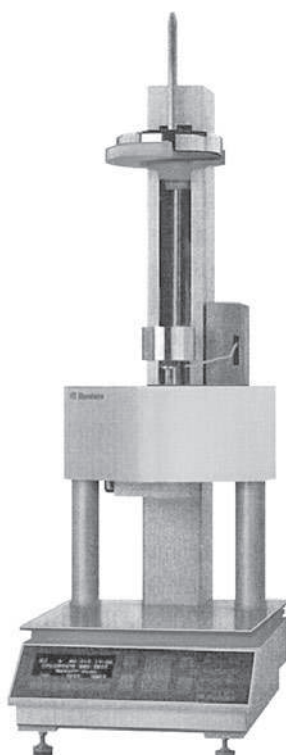


Рис. 7.2. Внешний вид прибора для измерения индекса расплава (с разрешения *Dynisco*)

Эксперимент состоит в том, что материал под давлением вытекает из насадки. Начальная порция экструдата не принимается в расчет, поскольку она может содержать пузырьки и загрязнения. В зависимости от типа материала или скорости течения кусочки экструдата отрезаются через некоторые интервалы времени. Эти кусочки взвешиваются, и индекс расплава рассчитывается как вес экструдата в граммах, вытекающего за 10 мин.

Альтернативный метод расчета индекса расплава относится к материалам с высокой скоростью течения. Он состоит в автоматическом измерении скорости истечения с помощью какого-либо электронного или механического приспособления. Тогда индекс расплава рассчитывается по формуле:

$$\text{Индекс расплава} = (426 \cdot L \cdot d)/t,$$

где L — калиброванная длина пути перемещения поршня, см; d — плотность расплава при температуре испытания, г/см³; t — время перемещения поршня на расстояние L с.

Внешний вид имеющегося на рынке прибора для измерения индекса расплава показан на рис. 7.2

7.2.3. Факторы, влияющие на результаты измерений

1. *Время предварительного подогрева.* Если цилиндр не был предварительно подогрет в течение требуемого времени, то возникает неоднородность распределения температуры по цилиндру, даже если датчик температуры показывает, что требуемый уровень температуры близок к заданному значению. Это приводит к заметным колебаниям скорости течения. Необходимо, чтобы по всей длине цилиндра градиент температуры отсутствовал.
2. *Влажность.* Наличие влаги в материале, особенно содержащем красители, приводит к тому, что в экструдате появляются пузырьки, которые могут быть и неразличимы невооруженным глазом. Взвешивание коротких отрезков экструдата, выдавливаемых из капилляра, покажет наличие влаги, поскольку вес таких отрезком весьма чувствителен к присутствию пузырьков.
3. *Загрузка.* Образец должен быть правильно загружен в цилиндр прибора. Полимер должен быть утрамбован достаточно плотно, чтобы выдавить воздух, захваченный между гранулами. После того как в цилиндр установлен поршень, материал в цилиндре оказывается запертым, и воздух уже не может выйти. По этой причине возможен разброс получаемых результатов измерений.
4. *Объем образца.* Для того чтобы получать хорошо воспроизводимые результаты, необходимо, чтобы вес образца, загруженного в цилиндр, был постоянным. Любые изменения объема загрузки приводят к тому, что значительно изменяется тепловой поток от цилиндра к полимеру.

7.2.4. Интерпретация результатов измерений

Значения индекса расплава, получаемые в результате описанных выше измерений, могут интерпретироваться в различных аспектах. Во-первых, некоторые колебания индекса расплава могут указывать на подозрительные изменения материала. Тогда необходимо проконсультироваться с поставщиком материала, чтобы достичь требуемой воспроизводимости результатов измерений. Во-вторых, резкие изменения индекса расплава по сравнению с контрольным образцом могут быть обусловлены различными причинами. Так, это может быть следствием различия марок материала, что приводит к изменению его текучести. Это также может означать, что средний молекулярный вес или молекулярно-весовое распределение партии материала отличается от характеристик контрольного образца, что отражается на свойствах материала.

Индекс расплава представляет собой обратную меру молекулярного веса. Вследствие этого высокомолекулярный полимер характеризуется низкими значениями индекса расплава, и наоборот.

7.3. Реология

Под реологическими свойствами понимают особенности текучести материала. Вязкость представляет собой меру сопротивления течения, возникающего вследствие внутреннего трения при скольжении слоев жидкости друг по другу. Чем выше трение,

тем большую силу необходимо приложить, чтобы реализовать относительное перемещение слоев, называемое «сдвигом». Сдвиговые деформации возникают всегда, когда жидкость движется или перемешивается, например, когда жидкость наливается в сосуд, смешивается с другой жидкостью или разбрызгивается. Для перемещения более вязких жидкостей требуется приложение больших усилий, чем маловязких. Мерой скорости перемещения слоев относительно друг друга является градиент скорости. Эта величина описывает сдвиг слоев друг относительно друга и поэтому выражается как скорость сдвига [1].

Напряжение сдвига — это напряжение, действующее между соседними слоями при их относительном перемещении. Если отношение напряжения сдвига к скорости сдвига постоянно, как это имеет место в случае воды, то такая жидкость называется «ньютоновской». В случае неньютоновских жидкостей это отношение зависит от напряжения сдвига. Говоря другими словами, в неньютоновской жидкости при изменении скорости сдвига напряжение сдвига изменяется непропорционально скорости сдвига. Поэтому вязкость такой жидкости зависит от скорости сдвига. Для всех полимерных материалов характерно неньютоновское поведение. Информация, касающаяся вязкостных свойств полимеров, очень важна для их идентификации и характеристики. Измерение реологических свойств также имеет значение для определения упругости, молекулярных и иных физических свойств полимера, моделирования и расчета условий крупномасштабных процессов переработки, а также для выполнения фундаментальных исследовательских работ.

Приборы, используемые для измерений реологических свойств материалов, называют реометрами. В настоящее время известно большое количество разнообразных конструкций реометров. Для анализа и интерпретации экспериментальных данных, получаемых при реологических измерениях, имеется программное обеспечение.

До недавнего времени реологические измерения проводились только на лабораторном уровне как метод контроля качества продуктов, а также для проведения исследовательских работ. В последнее время предложен ряд средств измерений, которые позволяют проводить оценку реологических свойств непосредственно в цеховых условиях в процессе производства. Этот подход дополняется устройством замкнутой обратной связи, основанном на том, что небольшая часть потока отбирается из технологической линии, исследуется и затем возвращается в основной процесс. При использовании такого измерительного блока часть расплава, отбираемая от основного потока, с помощью прецизионного шестеренчатого насоса продавливается через капилляр. В другом случае используется аналогичный принцип, но расплав для измерения его вязкости продавливается через плоскую щель. Известны также варианты открытой схемы измерений, когда отбираемая часть потока не возвращается в основной процесс, а разделяется на две части и продавливается через капилляры с разным отношением длины к диаметру, что позволяет одновременно измерять вязкость при двух различных скоростях сдвига [2].

В последующих разделах описываются три основных типа реометров, наиболее широко используемые в промышленности.

7.3.1. Реометр крутящего момента

Реометры, в которых измеряется крутящий момент, широко используются на практике для определения реологических свойств полимеров, определения термической стабильности, времени деструкции и характеристики особенностей различных композиций. Подробно реометры этого типа описаны в главе 12.

7.3.2. Ротационные реометры/вискозиметры

Известны различные типы ротационных реометров и вискозиметров. Наиболее часто используют приборы типа конус-плоскость, цилиндр-цилиндр (вискозиметр Куэтта), торсионную схему измерений, шпindel, на конце которого установлен диск.

Шпindelный вискозиметр (по *ASTM D2393*) представляет собой простейший инструмент этого типа. Принцип его работы заключается в измерении крутящего момента, который возникает при вращении некоторого элемента (шпинделя), погруженного в исследуемую жидкость. Шпindel приводится во вращение электродвигателем через калиброванную пружину. Смещение этой пружины служит мерой крутящего момента. Величина смещения пересчитывается в значения вязкости, выраженные в сантипуазах. Если использовать различные скорости вращения и сменные пружины, то оказывается возможным измерить значения вязкости в широком диапазоне ее значений.

Процедура измерений состоит в том, что исследуемый образец помещается в предварительно нагретый сосуд, температура которого устанавливается на заданном уровне. Шпindel с выбранными размерами погружается в жидкость и вращается в течение двух минут до того, как будет произведен отсчет крутящего момента. Получаемые результаты записываются на принтере или передаются к компьютеру, где они обрабатываются с помощью встроенной программы. В современных вариантах этого прибора используется программируемый режим измерений, с помощью которого можно одновременно измерять и записывать вязкость и температуру.

На рис. 7.3, а показан такой программируемый вискозиметр, который может работать как отдельно, так и в связи с персональным компьютером.

Для определения абсолютных значений вязкости идеально подходит ротационный вискозиметр типа конус-плоскость, который проводит измерения на образцах небольшого объема. Прибор такого типа имеется на рынке (например, вискозиметр *Wells–Brookfield*). Он снабжен высокоточной системой измерения крутящего момента, состоящей из пружины, изготовленной из бериллиевой бронзы, и привода, с помощью которого осуществляется вращение конуса относительно неподвижного плоского основания прибора. Смещение пружины отражает сопротивление вращению, обусловленное присутствием образца. Измеряемый по смещению пружины крутящий момент пропорционален напряжениям сдвига, действующим в жидкости. Величина крутящего момента представляется на дисплее численно.

Пример такого вискозиметра показан на рис. 7.3, б.

7.3.3. Капиллярный реометр

Очень часто индекс расплава не дает достаточной информации о свойствах материала, поскольку этот показатель является одноточечным. Температура, задаваемая для его



Рис. 7.3. Ротационные приборы: а — шпиндельный вискозиметр (с разрешения Brookfield Engineering laboratories), б — вискозиметр типа конус-плоскость (с разрешения Brookfield Engineering laboratories)

измерения, не обязательно оказывается той температурой, при которой осуществляется переработка материала. Измерения индекса расплава проводятся при низкой скорости сдвига, существенно меньшей, чем тот диапазон скоростей, который отвечает реальным условиям переработки расплава. Скорость течения измеряется при одном напряжении сдвига, одной температуре и при определенных геометрических условиях течения. Далее, поскольку индекс расплава отражает текучесть материала в одной точке, вполне возможно, что два материала с одинаковым индексом расплава поведут себя совершенно по-разному при напряжениях, отличных от тех, при которых измерялся индекс расплава.

Использование капиллярного реометра позволяет выполнять измерения как индекса расплава, так и значений вязкости в очень широком диапазоне скоростей сдвига, отвечающих различным типам процессов переработки — компрессионному литью, каландрованию, экструзии, литью под давлением и т. д. Капиллярный реометр представляет собой прецизионный прибор, позволяющий проводить испытания полимера с высокой точностью и хорошей воспроизводимостью получаемых результатов.

Входной контроль материала, поступающего к потребителю, должен быть быстрым, простым и точным. Применение капиллярного реометра позволяет убедиться, что свойства поступающего материала лежат в пределах тех допусков, которые отвечают данной марке полимера. График, отражающий кривую течения расплава полимера, которая отвечает предъявляемым требованиям к материалу, может быть построен в пределах от нижней до верхней критической скорости сдвига. Это достигается путем многоточечных измерений испытуемого полимера.

На рис. 7.4, *a* показана одна такая кривая течения. Кривая течения исследуемого материала сопоставляется с контрольной кривой течения стандартного образца. Как видно, в области низких скоростей сдвига измеренная кривая течения вполне входит в пределы допусков для контрольного образца. Однако при высоких скоростях сдвига, отвечающих реальным условиям переработки, требуемое качество материала не выдерживается [3].

Показанный график также демонстрирует преимущества метода капиллярной реометрии над простым стандартным измерением индекса расплава. При измерении индекса расплава исследуемый материал кажется удовлетворяющим требованиям входного контроля, хотя в действительности это ложный вывод.

Термическая стабильность и накладываемые ею ограничения на возможные условия переработки играют исключительно важную роль для технолога. Использование капиллярного реометра позволяет получить надежные оценки термической стабильности полимера. Такие полимеры, как поливинилхлорид, могут начать образовывать поперечные сшивки, что отражается на огромном росте вязкости, если процесс продолжается недопустимо долго. Это может привести к остановке процесса или разрушению изделий, т. е. нежелательным затратам времени и материала. Использование капиллярного реометра позволяет определить допустимые длительности пребывания материала при различных температурах при изменении скорости сдвига и температуры в широких пределах, встречающихся в процессах переработки. В итоге это позволяет установить оптимальные режимы технологического процесса [4].

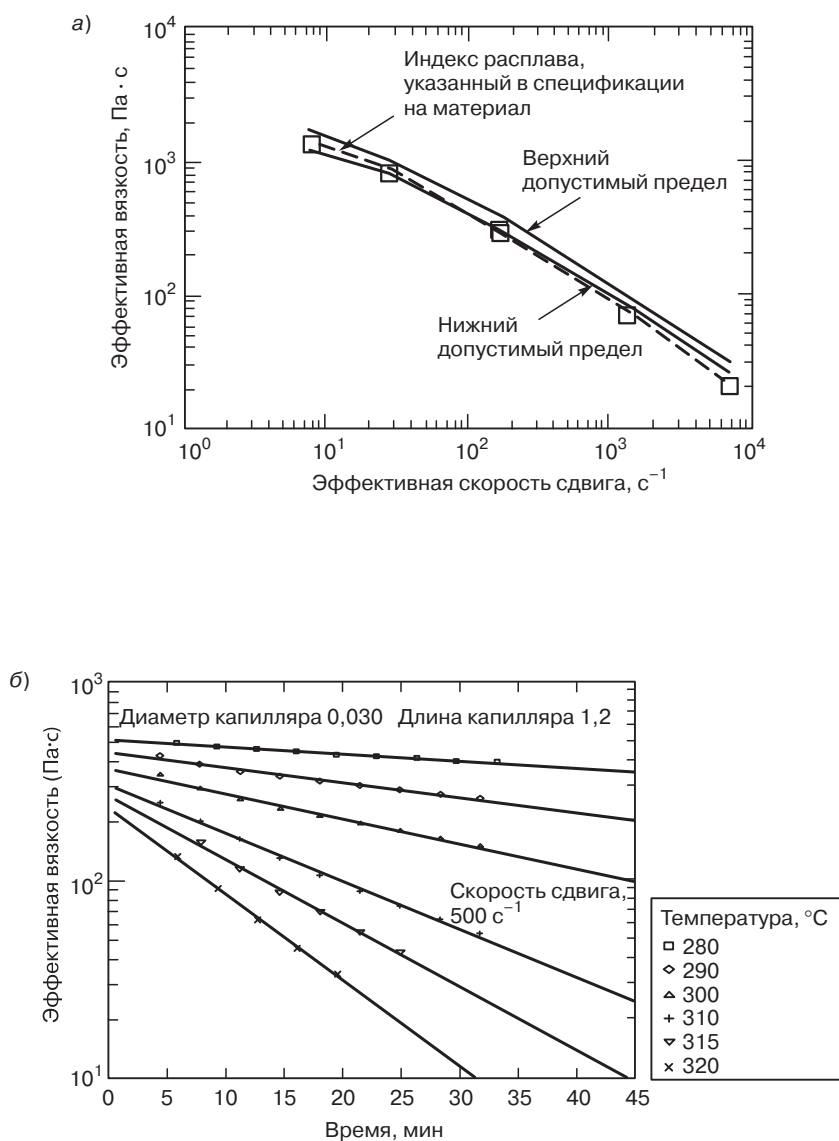


Рис. 7.4. Кривые течения расплавов полимеров: а — использование кривой течения для контроля качества; б — зависимость эффективной вязкости от времени пребывания полиамида 66 при высокой температуре, иллюстрирующая наступление термической деструкции

Зависимость сдвиговой вязкости от длительности пребывания при высокой температуре в качестве примера показана для полиамида 66 на рис. 7.4, б, откуда ясно виден эффект деструкции.

На основании измерений реологических кривых течения при различных температурах можно определить температурную зависимость вязкости при различных скоростях сдвига. Эта информация важна для конструктора, который использует для проектирования программное обеспечение, моделирующее реальные процессы переработки. Если использовать данные по температурной чувствительности вязкости вместе с данными относительно реологических свойств расплава, то можно получить ценную информацию, которая может быть использована при моделировании процессов заполнения формы или течения через формующие головки [5]. Данные, получаемые с помощью капиллярного реометра, можно использовать для оценки возможности вторичной переработки полимеров, а также для оптимизации технологического процесса.

Капиллярный реометр (рис. 7.5) состоит из электрически нагреваемого цилиндра, устройства для создания давления, системы контроля температуры, таймера и сменных капилляров. Плунжер может перемещаться с постоянной скоростью, что обеспечивает постоянную скорость сдвига. Усилие, которое необходимо приложить для поддержания постоянной скорости движения плунжера, создает определяемые в

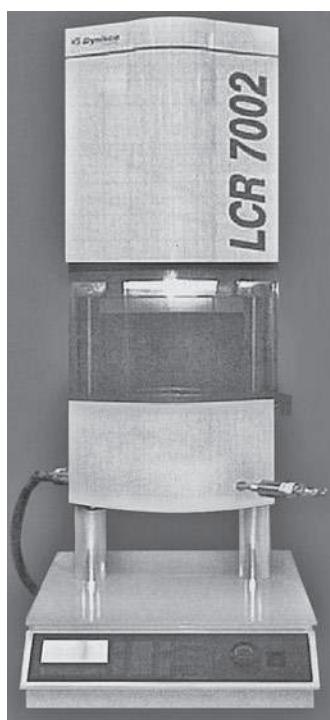


Рис. 7.5. Капиллярный реометр (с разрешения Dynisco)

эксперименте напряжения сдвига. Возможен и альтернативный вариант, в котором к плунжеру прикладывается постоянный вес или создается постоянное давление, что создает постоянное напряжение сдвига, а скорость движения плунжера определяется путем отрезания кусочков экструдата через определенное время и их взвешивания. Скорость сдвига рассчитывается исходя из этих данных, если известна плотность экструдированного расплава.

Метод измерений состоит в том, что кусочки исследуемого материала помещаются в цилиндр, устанавливается заданная температура и расплав выдавливается через капилляр. Усилие, необходимое для осуществления движения плунжера с заданной скоростью, определяются с помощью датчика силы. Напряжение сдвига, скорость сдвига и эффективная вязкость рассчитываются по следующим формулам [6]:

$$\tau = \frac{F_r}{2\pi R^2 l},$$

где τ — напряжение сдвига, фунт/дюйм²; F — усилие, прикладываемое к плунжеру, фунт; r — радиус капилляра, дюйм; R — радиус цилиндра, дюйм; l — длина капилляра, дюйм.

$$\gamma = \frac{4Q}{\pi r^3},$$

где γ — скорость сдвига, с⁻¹; Q — объемная скорость истечения, дюйм³/с.

Примеры зависимостей напряжения сдвига от скорости сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига представлены на рис. 7.6 и 7.7 соответственно.

7.4. Измерения вязкости

Вязкость — это свойство, характеризующее сопротивление течению в объеме материала. Оно выражается как отношение приложенного напряжения сдвига к вызванной этим напряжением скорости сдвига. В идеальном случае ньютоновской жидкости отношение напряжения к скорости сдвига постоянно. Для расплавов полимеров характерно неньютоновское поведение, характеризующееся тем, что это отношение зависит от напряжения сдвига.

Возможны два подхода к определению вязкости. Динамическую, или абсолютную, вязкость лучше всего определять с помощью ротационных вискозиметров с малым зазором между подвижной и неподвижной поверхностями. Эта величина не зависит от плотности или удельного веса жидкости и выражается в пуазах или сантипуазах. Кинематическую вязкость измеряют с помощью вискозиметров истечения, которые имеют на конце отверстие или капиллярную насадку. Течение происходит под действием силы тяжести, и скорость течения в сильной степени зависит от плотности или удельного веса жидкости. Эта величина выражается в стоксах или сантистоксах.

Соотношение между двумя типами вязкости выражается формулой:

$$\text{Стокс} \times \text{удельный вес} = \text{Пуаз}.$$

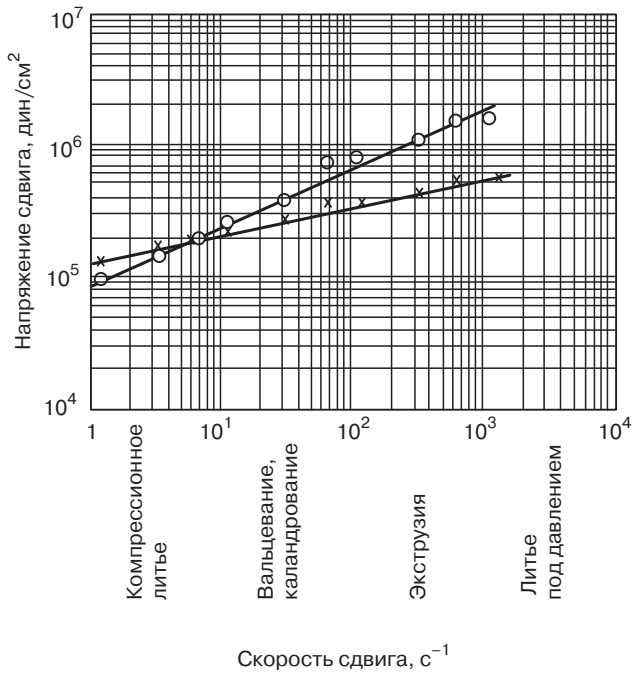


Рис. 7.6. Зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига для двух образцов поливинилхлорида с различными пластификаторами. Обратите внимание, что вязкостные свойства обоих материалов одинаковы при скорости сдвига 5 с^{-1} , но существенно различаются при всех других скоростях сдвига

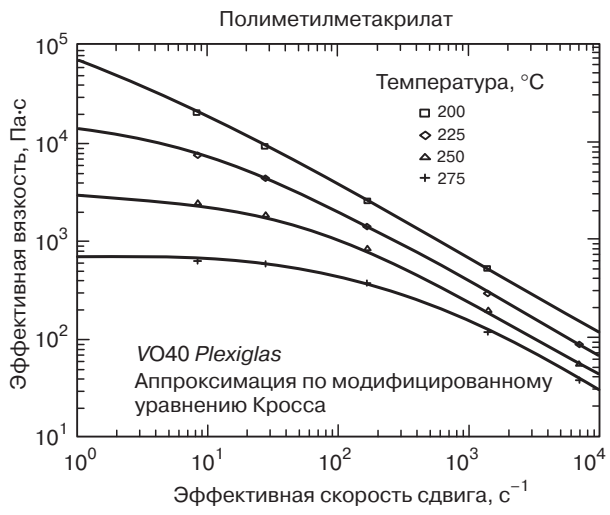


Рис. 7.7. Зависимость эффективной вязкости от эффективной скорости сдвига

Измерения и контроль реологических свойств жидкости производится с помощью приборов, называемых «вискозиметрами». С помощью этих приборов измеряется не непосредственно динамическая или кинематическая вязкость, а осуществляется сравнение текучести различных жидкостей.

Вязкость полимеров измеряется с помощью приборов трех типов, в которых деформации осуществляются путем различных способов приложения усилия [7]:

- истечение жидкости вниз через капиллярное отверстие или насадку под действием силы тяжести;
- измерение скорости подъема воздушных пузырьков в исследуемой жидкости;
- измерение крутящего момента при движении жидкости между вращающейся и неподвижной поверхностями.

Первый из этих методов обычно применяют для термопластичных материалов, остальные два — для термореактивных смол, пластизолов, органозолов. Эти методы рассмотрены в разделе 7.3.2.

7.4.1. Измерение вязкости разбавленных растворов полимеров (ASTM D2657)

Этот метод предназначен для измерения вязкости разбавленных растворов любых полимеров, которые могут полностью растворяться без каких-либо химических реакций или деструкции, образуя растворы, устойчивые во времени в области температур приблизительно от комнатной до 150 °С. Результаты этих испытаний выражают в терминах относительной, приведенной или характеристической вязкости. Может быть также рассчитана приведенная или удельная вязкость.

В табл. 7.4 приведены рекомендации по условиям испытаний для определения вязкости разбавленных растворов полимеров.

Таблица 7.4. Рекомендуемые условия измерений вязкости разбавленных растворов некоторых полимеров

Полимер	Растворитель	Режим приготовления раствора	Температура испытаний, °С	Концентрация раствора г/дл
Полиамид	Муравьиная кислота или <i>м</i> -крезол	30 °С 100 °С, 2 ч	30	0,0050±0,00002
Поликарбонат	Метиленхлорид или <i>п</i> -диоксан	30 °С 60 °С	30	0,0040±0,0002
Полиметилметакрилат	Этилендихлорид	30 °С, 24 ч	30	0,0020±0,00002
Поливинилхлорид	Циклогексанон	85±10 °С	30	0,0020±0,00002

Прибор для измерений состоит из емкости для приготовления раствора, соединительных трубок, жидкостного термостата для поддержания постоянной температуры, таймера, вискозиметра и термометра. Рекомендуется, чтобы при проведении измерений вязкости раствора одной концентрации использовался прибор одного и того же объема. Несколько иной тип прибора называется вискозиметром разбавления. В этом случае требование постоянного объема не является обязательным. Приборы такого типа используют для определения характеристической вязкости.

Различные типы обычно используемых вискозиметров показаны на рис. 7.8.

Образец для испытаний готовят путем растворения точно отмеренной навески полимера в выбранном растворителе. Приготовленный раствор и вискозиметр помещают в термостат, в котором поддерживается заданная постоянная температуры. Необходимое количество раствора засасывается в вискозиметр через соединительную трубку. После того как устанавливается температурное равновесие, уровень жидкости с помощью небольшого давления воздуха, создаваемого в плече вискозиметра, противоположном капилляру, поднимается выше верхней метки. Таймер включается в момент, когда мениск проходит через верхнюю метку, и выключается, когда мениск пересекает нижнюю метку. Испытания повторяют для чистого растворителя и каждого раствора, по крайней мере, трижды. Время, за которое раствор перемещается между верхней и нижней метками, называют временем истечения. Значения относительной, удельной, приведенной, логарифмической приведенной и характеристической вязкости рассчитывают так, как это описано ниже [8]

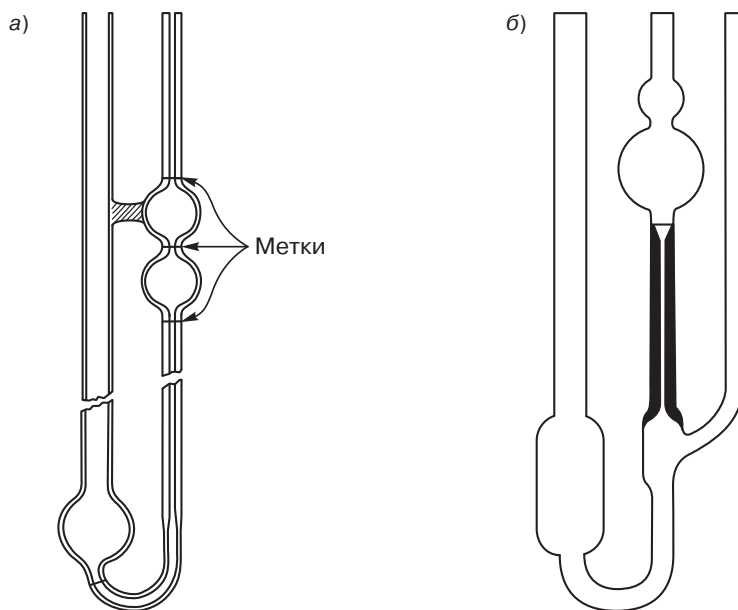


Рис. 7.8. Капиллярные вискозиметры, обычно используемые для измерений вязкости разбавленных растворов полимеров: а — вискозиметр Оствальда–Фенске; б — вискозиметр Уббелюде (воспроизведено с разрешения Wiley-Interscience)

А. Относительная вязкость

Этот термин означает отношение времен истечения раствора полимера в выбранном растворителе через капилляр ко времени истечения того же объема чистого растворителя через тот же самый капилляр.

$$\text{Относительная вязкость} \equiv \eta_{rel} = t/t_0,$$

где t — время истечения раствора; t_0 — время истечения чистого растворителя.

Или же определение относительной вязкости может быть записано как

$$\text{Относительная вязкость} \equiv \eta_{rel} = \eta/\eta_0,$$

где η — вязкость раствора; η_0 — вязкость растворителя.

Б. Удельная вязкость

Эта величина находится как относительная вязкость за вычетом единицы, т. е.

$$\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1,$$

где η_{sp} — удельная вязкость; η_{rel} — относительная вязкость.

В. Приведенная вязкость (число вязкости)

Это понятие представляет собой отношение удельной вязкости к концентрации раствора:

$$\eta_{red} = \eta_{sp}/c,$$

где c — концентрация раствора, выраженная в г/мл.

Г. Логарифмическая приведенная вязкость (логарифмическое число вязкости)

Эта величина представляет собой отношение натурального логарифма относительной вязкости к концентрации, т. е.

$$\eta_{inh} = \frac{\ln \eta_{rel}}{c}.$$

где η_{inh} — логарифмическая приведенная вязкость; $\ln \eta_{rel}$ — натуральный логарифм относительной вязкости; c — концентрация раствора, выраженная в г/дл.

Д. Характеристическая вязкость (предельное число вязкости)

Для того чтобы определить характеристическую вязкость разбавленных растворов измеряют значения приведенной и логарифмической приведенной вязкости растворов различных концентраций при постоянной температуре. Полученные значения представляют на графике в зависимости от концентрации (рис. 7.9). Через полученные экспериментальные точки проводят прямые линии, которые экстраполируют к нулевой концентрации. Характеристическая вязкость представляет собой точку пересечения этих прямых с осью ординат при нулевой концентрации.

7.4.2. Применение и ограничения результатов измерений вязкости разбавленных растворов полимеров

Молекулярные веса полимеров могут быть определены с помощью либо абсолютных, либо относительных методов. Такие абсолютные методы, как измерение осмотического

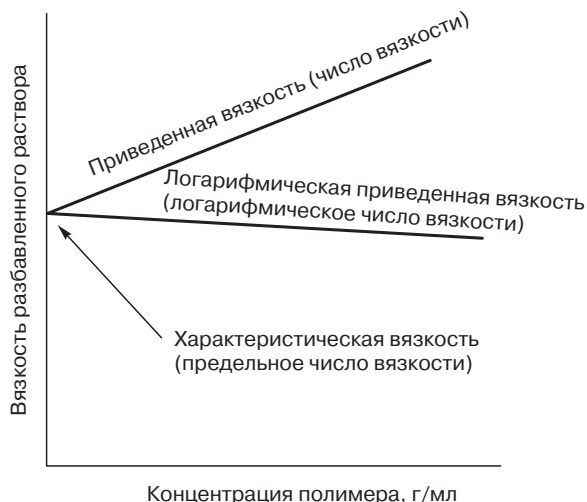


Рис. 7.9. Пример построения, используемого для определения характеристической вязкости (воспроизведено с разрешения ASTM)

давления или светорассеяния дают точные результаты, но они довольно сложны, и эксперимент занимает много времени. На практике измерение вязкости разбавленных растворов оказался одним из наиболее популярных методов оценки молекулярного веса. В простейшем случае молекулярный вес и характеристическая вязкость связаны следующими соотношениями [9]:

$$\bar{M}_n = \frac{1}{2}[\eta] \cdot 10^5,$$

где \bar{M}_n — среднечисловой молекулярный вес; $[\eta]$ — характеристическая вязкость, измеренная в циклогексаноне при 30 °С.

$$\bar{M}_w = 0,9[\eta] \cdot 10^5,$$

где \bar{M}_w — среднемассовый молекулярный вес.

Измерение вязкости разбавленного раствора предоставляет ограниченную информацию относительно молекулярных характеристик полимеров. Если использовать данные таких измерений в сочетании с определением других молекулярных параметров, то можно более полно предсказать свойства полимера. Результаты измерений вязкости сами по себе имеют ограниченное значение для описания технологических свойств полимера при его переработке. Однако если использовать результаты измерений вязкости разбавленных растворов в сочетании с другими вязкостными и иными физическими свойствами полимера, то при этом получается достаточно полная характеристика полимера.

Вязкость разбавленных растворов крайне чувствительна к присутствию неизвестных или известных добавок. Если пытаться использовать результаты измерений вязкости разбавленных растворов для предсказания абсолютных значений физических

свойств полимера, то при этом возникнет ряд трудностей. Дело в том, что большинство измерений вязкости проводятся с растворами, концентрация которых составляет не более 1%, причем полимер должен быть полностью растворим в использованном растворителе. Конечно, такие системы вряд ли могут быть названы составами, используемыми в промышленности [10]. Вязкость растворов более высокомолекулярных образцов может зависеть от скорости сдвига, а вязкость полиэлектролитов (полимеров, содержащих в своей структуре ионогенные группы) зависит от состава полимера и ионной силы растворителя. При измерениях вязкости таких полимеров требуется принимать специальные меры предосторожности. Вязкость разбавленных растворов чрезвычайно сильно чувствительна к чистоте и типу растворителя, типу примененного для измерений вискозиметра, температуры и времени. Даже сравнительно незначительные изменения одного или нескольких из перечисленных параметров, может заметно сказаться на результатах измерений.

Удовлетворительного соответствия между результатами измерений вязкости разбавленных растворов и другими свойствами полимера можно ожидать только для полимеров, полученных при одном и том же технологическом процессе их производства. Если же сопоставляемые полимеры получены по различным технологическим схемам, то такое соответствие может быть лишь весьма ограниченным.

7.5. Гель-проникающая хроматография

Очень часто такие традиционные методы испытаний, как измерение индекса расплава или вязкости разбавленного раствора, не дают достаточной информации относительно технологичности полимера при его переработке. Испытания такого рода позволяют оценить лишь некоторые средние значения и ничего не говорят об особенностях распределений, которые дают эти средние значения. Упомянем, например, о средней дневной температуре для какого-нибудь города. Такая информация может привести к неверным выводам, поскольку она ничего не говорит об экстремально высокой или экстремально низкой температурах. Аналогичным образом, результаты измерений вязкости или индекса расплава очень хорошо коррелируют с некоторыми средними значениями молекулярных весов, но не могут дать никакой информации относительно молекулярно-вещевого распределения. Две партии одного и того же полимера могут характеризоваться одним и тем же значением индекса расплава, что просто указывает на то, что средние значения молекулярных весов этих партий одинаковы. Однако молекулярно-вещевого распределения (т. е. относительное содержание макромолекул различной молекулярной массы), которые соответствуют одним и тем же средним значениям, могут оказаться совершенно различными. Если в материале имеется повышенное содержание высокомолекулярных фракций, то такой материал оказывается жестким и хрупким. Напротив, если повышено содержание низкомолекулярных фракций, то полимер оказывается мягким и липким.

На рис. 7.10 показан пример молекулярно-вещевого распределений трех различных полиэтиленов.

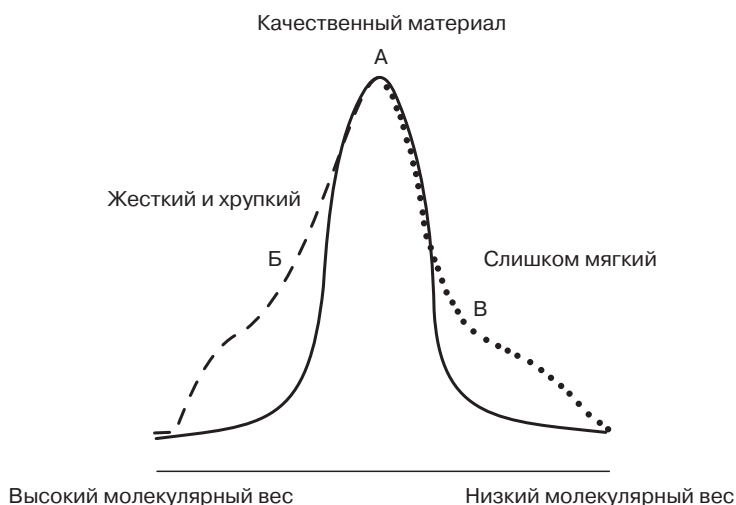


Рис. 7.10. Кривые молекулярно-вещного распределения различных образцов полиэтилена (с разрешения *Waters Corporation*): А — высококачественный материал; Б — материал с повышенным содержанием высокомолекулярных фракций — жесткий и хрупкий; В — материал с повышенным содержанием низкомолекулярных фракций — мягкий и липкий

При оценке качества поставляемого материала специалист-переработчик заинтересован в использовании надежного метода, который позволил бы получить необходимую информацию для максимально полной характеристики материала, такой, например, как молекулярно-вещное распределение. Молекулярно-вещное распределение — единственное наиболее фундаментальное свойство полимера. Эта характеристика не только дает ответ на вопрос о технологичности материала при его переработке, но и позволяет предсказать механические свойства будущего изделия.

Гель-проникающая хроматография (ГПХ) — это наилучший метод для определения молекулярно-массового распределения. Эта техника получила широкое распространение среди производителей полимерных материалов и специалистов в области переработки, благодаря ее относительно низкой стоимости, простоте и возможности получения надежной информации за относительно короткое время. ГПХ позволяет измерять молекулярно-вещные распределения не только полимеров, олигомеров и определять мономеры, но и находить низкомолекулярные добавки и даже загрязнения, содержащиеся в материале в небольших количествах. Можно построить кривую молекулярно-вещного распределения для хорошо охарактеризованного стандартного образца и сравнивать с ним кривую распределения для испытуемого полимера. В этом отношении легко контролируется однородность и качество материала от одной партии к другой.

Разделение макромолекул по их молекулярным весам при использовании метода ГПХ основано на различии их «эффективных размеров» в растворе (эффективный размер непосредственно связан с молекулярным весом). Разделение происходит при

непрерывном движении потока раствора через высокопористую массу, образованную жесткими частичками геля, плотно заполняющего колонку. Размер пор может варьироваться от очень маленьких до довольно больших значений. По мере продвижения раствора через колонку, заполненную пористым гелем, молекулы с меньшим эффективным размером (более низкомолекулярные) проникают на большее расстояние, чем высокомолекулярные фракции. Если размеры пор в колонке подобраны так, чтобы покрыть широкий диапазон размеров, то в результате произойдет четкое разделение по молекулярным массам.

7.5.1. Оборудование для ГПХ

Гель-проникающая хроматография, также известная под названием размерно-эксклюзивная хроматография, основывается на использовании системы подачи растворителя и исследуемого образца полимера; далее раствор перемещается вдоль колонки, детектора и регистрирующего устройства, который фиксирует информацию, поставляемую детектором. Эта схема измерений показана на рис. 7.11.

А. Система подачи растворителя

Подающий насос обеспечивает равномерную подачу растворителя не зависимо от различий вязкости, а также быструю прокачку раствора через колонку.

Б. Инжектор

Инжектор обеспечивает равномерный впрыск полимера в поток растворителя.

В. Колонки

Колонка набита мелкими высокопористыми частичками плотно упакованного геля. Размер пор может варьироваться от очень мелких до сравнительно крупных. В колонке происходит разделения полимера на фракции, что обеспечивает возможность определения молекулярно-весового распределения.

Г. Детекторы

После того как произошло разделение полимера на фракции, для определения их молекулярных весов возможно использование двух основных методов. Обычно ис-

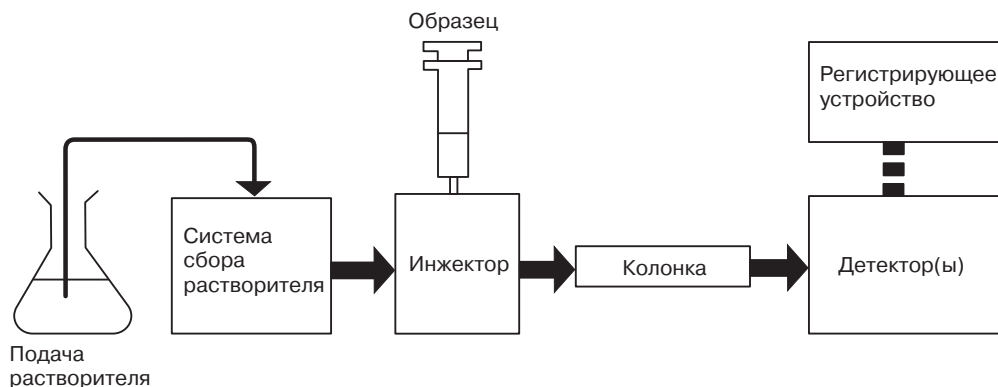


Рис. 7.11. Схематическое изображение устройства для ГПХ (с разрешения *Waters Corporation*)

пользуют универсальный детектор, основанный на измерении разности показателей преломления. Для определения молекулярных масс низкомолекулярных фракций, добавок и загрязнений используют более высокочувствительный ультрафиолетовый детектор.

Д. Регистрирующее устройство

Результатом измерения молекулярно-вещного распределения является непрерывная кривая, регистрируемая с помощью соответствующего прибора.

7.5.2. Процедура измерения

Небольшое количество испытуемого образца растворяется в выбранном растворителе, и раствор пропускается через фильтр с тем, чтобы нерастворенные загрязнения. Следующий шаг состоит в выборе подходящей колонки, сборке всей установки, установке датчика в детектор и приведения всей системы в равновесие. Эксперимент состоит в том, что раствор полимера пропускается через колонку. Далее тщательно анализируется полученная хроматограмма. Если на хроматограмме отражена вся необходимая информация, то проводится ее завершающий анализ. Если же нет, то изменяются условия испытаний, такие как характеристики колонки, их количество, скорость прокачки раствора, что позволяет оптимизировать режим проведения эксперимента. Заключительный этап состоит в повторении испытаний, чтобы затем провести окончательный анализ полученных результатов.

В ходе завершающего анализа разделение макромолекул по размерам происходит в силу чисто механических причин. Из-за их меньшего размера низкомолекулярные фракции более легко попадают в поры, и вследствие этого для них необходимо большее время, чтобы достичь дна колонки. Разделение по молекулярным весам при этом происходит просто из-за того, что для разных фракций требуется различное время для прохождения через колонку, так что они попадают на детектор в порядке уменьшения размеров макромолекул. Детектор определяет концентрацию молекул каждого размера, а результаты фиксируются на ленте в виде молекулярно-вещного распределения.

Прибор для ГПХ-анализа, имеющийся на рынке, показан на рис. 7.12.

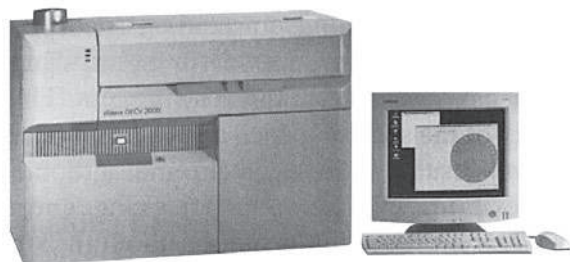


Рис. 7.12. Прибор для анализа методом ГПХ (с разрешения *Waters Corporation*)

7.5.3 Интерпретация кривых, получаемых методом ГПХ

Кривые, получаемые методом ГПХ, предоставляют большой объем информации. Различные области на хроматограмме в общем случае легко и просто сопоставляются с фракциями полимера, имеющими различные молекулярные массы. Молекулы всегда проходят через колонку и появляются на хроматограмме в порядке убывания молекулярной массы. Полимерные компоненты всегда появляются первыми, поскольку их молекулярные веса максимальны (рис. 7.13). Затем появляются низкомолекулярные компоненты, которые проявляются на хроматограмме в виде острых пиков в области *В*. На заключительной стадии появляются вещества с наименьшими молекулярными массами, такие как непрореагировавшие мономеры и низкомолекулярные загрязнения, например, влага. Относительное содержание различных фракций может быть легко установлено, поскольку высота кривой в каждой точке пропорциональна содержанию соответствующей фракции, отвечающей соответствующей точке на кривой.

Широкая кривая в области *А* хроматограммы доставляет наибольшее важную информацию, характеризующую полимер. Расстояние от начала хроматограммы до средней точки кривой молекулярно-массового распределения дает значение среднего молекулярного веса. Это расстояние, расположение кривой в целом и форма молекулярно-массового распределения позволяют предсказать физические и технологические свойства полимера. Любые изменения в положении и формы кривой указывают на различия в свойствах полимера. Так, на избыточное содержание высокомолекулярных фракций указывает смещение кривой в сторону высоких значений молекулярных весов. Повышенное содержание низкомолекулярных фракций, напротив, приводит к смещению кривой в противоположную сторону. Отдельные пики, которые могут наблюдаться как в высоко-, так и в низкомолекулярной части молекулярно-вещного распределения, будут приводить к изменению поведения полимера.

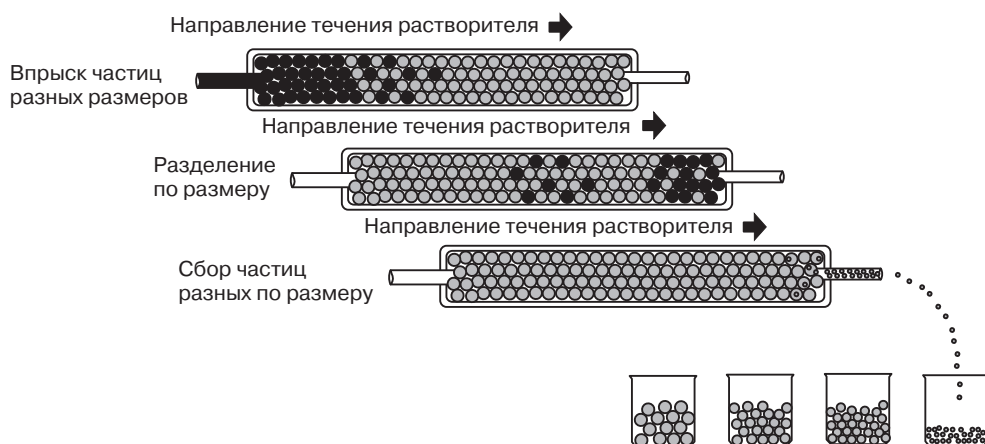
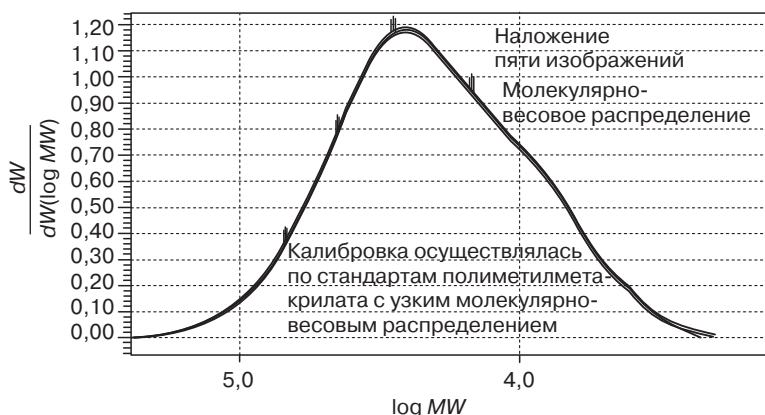


Рис. 7.13. Типичная хроматограмма, показывающая порядок выхода молекул из колонки после впрыска полимера (с разрешения *Waters Corporation*)



Колонки:	1 Stylagel HR2, 1 HR3 и 1 HR4; набивка колонок предназначена специально для работы с гексафтор-2-изопропанолом
Прибор:	Waters Alliance System с детектором 410 dRI при 30 °C
Подвижная фаза:	гексафтор-2-изопропанол с 0,05M натриевой соли трифторуксусной кислоты
Скорость прокачки:	0,35 мл/мин
Температура колонки:	300 °C
Инжектируемый объем:	25 мкл образца с концентрацией 0,1 %вес.

Рис. 7.14. Сопоставление путем наложения на прозрачное стекло хроматограммы исследуемого образца полимера с кривой для контрольного образца (с разрешения *Waters Corporation*)

Наиболее прямой (иногда наиболее информативный) способ использования кривых, получаемых методом ГПХ, состоит в сравнении хроматограмм путем их наложения двух на друга. При этом становятся наглядными различия в молекулярно-весовом распределении, форма пиков, сдвиг их положения, появление «хвостов». Основываясь на этом, удастся непосредственно судить о наличии добавок и иных низкомолекулярных компонент.

Часто можно построить базовую хроматограмму, отвечающую материалу хорошего качества, и указать на допустимые отклонения от нее. Затем все партии полимера, подлежащие испытаниям, сравниваются с этой базовой кривой, что представляет собой ускоренный метод контроля качества. Эта методика иллюстрируется рис. 7.14.

Могут быть установлены различные корреляции между кривыми, получаемыми методом ГПХ, и различными физическими и технологическими свойствами полимера.

В последнее время был достигнут значительный прогресс в разработке новых систем подачи растворителя, позволяющих использовать на практике даже такие дорогостоящие растворители, как гексафтор-2-изопропанол. В новейших вариантах приборов для ГПХ отказались от использования традиционных шестеренчатых насосов с механическим приводом. Вместо этого предлагается применять независимо

регулируемые поршневые системы с датчиками давления и числовыми управляющими системами, связанными с соответствующими программными устройствами. Это позволяет регулировать подачу растворителя в реальном времени, что способствует оптимизации работы системы подачи и обеспечивает получение превосходных хроматографических результатов. Новейшее программное обеспечение приборов позволяет усовершенствовать как систему работы хроматографов, так и представления экспериментальных результатов. Поставляемый в комплекте с прибором библиотеки данных предоставляют неограниченную информацию относительно структурного состава полимеров, а также возможности спектрального анализа сополимеров, смесей, сплавов и вводимых добавок.

7.6. Техника термического анализа

Термический анализ состоит из набора аналитических методов, в которых свойства материала рассматриваются как функции времени или температуры при программируемом изменении температуры. К числу таких свойств относятся: вес, размеры, выделение энергии, дифференциальная температура, диэлектрические потери, модуль упругости, выделение газообразных продуктов, и иные более редко рассматриваемые характеристики. Приложения термического анализа в промышленности пластмасс и эластомеров весьма многообразны. Результаты термического анализа используют для контроля качества, чтобы быть уверенным в возможности конкретных применений материала, и для решения проблем, возникающих при переработке полимеров.

Термический анализ включает в себя три основных метода, которые могут использоваться как раздельно, так и совместно. Это:

- дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК);
- термогравиметрический анализ (ТГА);
- термомеханический анализ (ТМА).

В максимальной мере возможности термического анализа раскрываются при совместном использовании всех трех методов. На рис. 7.15 показаны принципиальные схемы трех перечисленных методов и указаны их возможности. В последующих разделах более подробно обсуждаются эти методы с точки зрения их аналитических возможностей и стандартизации.

7.6.1. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ASTM D3415, ASTM D3418)

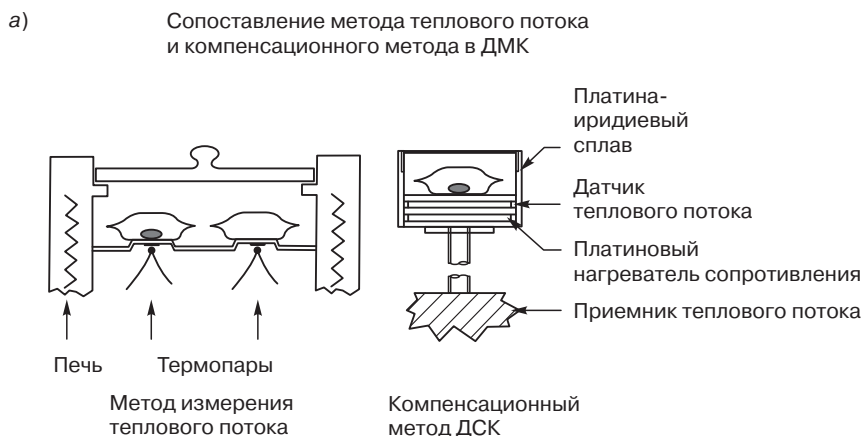
При использовании метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) наиболее часто применяют методику, основанную на измерении скорости теплового потока, поступающего к образцу, в дифференциальном режиме, находящемся в выбранной атмосфере. При этом температура изменяется по заданной программе. Поскольку все материалы обладают определенной теплоемкостью, при нагревании или охлаждении образца возникает тепловой поток, направленный к образцу или от него.



Рис. 7.15. Термический анализ пластмасс (с разрешения *Perkin-Elmer Corporation*)

Два наиболее часто используемых варианта ячеек, используемых в методе ДСК, показаны на рис. 7.16, *а*. Тепловой поток передается диску, на котором установлен образец, параллельно установлена контрольная ячейка без образца. Нагревание осуществляется с помощью обычной печки (термокамеры). Разность тепловых потоков, идущих от обеих ячеек, пропорционально разнице температур обеих ячеек, измеряемых термопарой. При использовании компенсационной схемы контролируются отдельно температуры образца и контрольной ячейки. Использование пластинового термометра сопротивления и усилителя позволяет зафиксировать потребляемую энергию, которую необходимо скомпенсировать с тем, чтобы температура образца изменялась по заданной программе. По другому варианту измерений определяется непосредственно тепловой поток, обычно выражаемый в мВт или Вт/г или же в Вт/(г·град), т. е. в единицах удельной теплоемкости. На рис. 7.16, *б* показан внешний вид прибора для проведения ДСК.

Процедура измерений вполне проста. Небольшой образец, обычно массой 5–10 г, помещается в инертную капсулу, сделанную, как правило, из алюминия. Такой образец укрепляется на держателе или устанавливается на платформе прибора. С помощью приданного прибору регулятора или управляющего компьютера оператор



б)

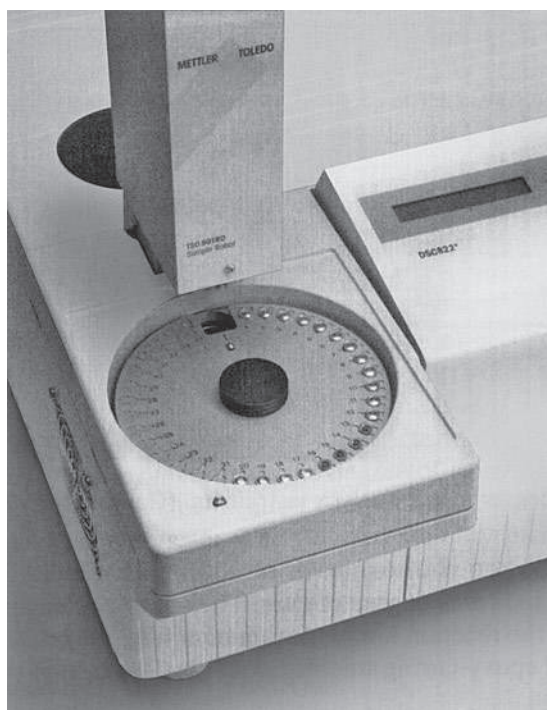


Рис. 7.16. Схема ячеек: а (с разрешения *Perkin-Elmer Corporation*) и внешний вид прибора для ДСК; б (с разрешения *Mettler-Toledo Inc.*)

выбирает область температур, в которой предполагается проведение исследования, а также устанавливает скорость подъема температуры или, возможно, более сложную программу изменения температуры. Далее начинается эксперимент.

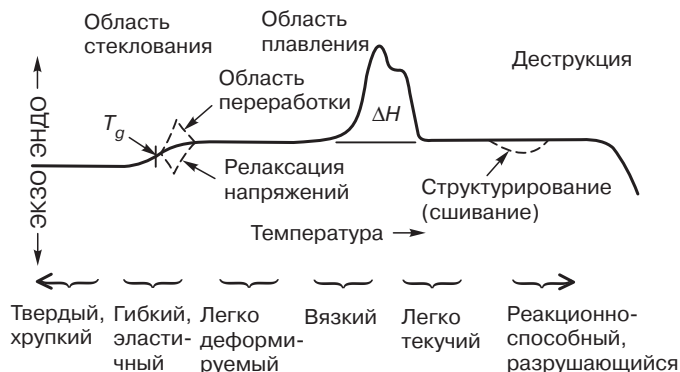


Рис. 7.17. Типичная термограмма, получаемая методом ДСК (с разрешения *Perkin-Elmer Corporation*)

Гипотетическая кривая, на которой видны как эндотермические, так и экзотермические эффекты, обнаруживаемые при испытаниях полимера методом ДСК, показана на рис. 7.17.

Первоначально требуется подведение некоторого количества энергии для того, чтобы разогреть образец. Это поступление энергии образует базовую линию. В точках перехода требуется либо больше, либо меньше энергии для поддержания постоянной скорости изменения температуры в зависимости от того, является ли переход эндо- или экзотермическим. Так, например, в области стеклования теплоемкость материала возрастает. Срединная точка принимается за температуру стеклования T_g . При добавлении пластификатора к полимеру наблюдается смещение T_g в сторону меньших значений. Когда достигается область плавления, то при этом затрачивается больше количество энергии (эндотермический процесс) на расплавление кристаллической структуры. Площадь под наблюдаемым пиком, выраженная в единицах энергии, представляет собой энтальпию, или теплоту плавления.

Положение пика плавления на температурной шкале и форма кривой в области плавления дают информацию о степени кристалличности материала, молекулярно-массовом распределении, степени разветвленности, составе сополимера, или же о предыстории переработки материала. Часто для оценки качества полимера бывает достаточно сравнить наблюдаемую форму кривой в области плавления с эталонной.

При структурировании (сшивании) полимера обычно некоторое количество энергии высвобождается, что соответствует экзотермическому эффекту. В этом случае площадь под кривой пропорциональна числу образовавшихся поперечных связей, что указывает на степень сшивания. Анализ формы кривой в области структурирования позволяет найти кинетические константы этого процесса. В литературе описаны также варианты использования метода ДСК для анализа процесса пенообразования [11, 12] и сшивания композиций на основе эпоксидных смол [13, 14].

7.6.2. Термогравиметрический анализ

Термогравиметрический анализ (ТГА) состоит в том, что измеряются изменения веса образца по мере его непрерывного нагревания. Слежение за изменением веса

осуществляется в непрерывном режиме, тогда как температура может изменяться либо непрерывно с заданной скоростью, либо ступенчато с выдержкой при каждой температуре. Компоненты, входящие в состав пластмассы или эластомера, испаряются или разлагаются при различных температурах. Это приводит к ступенчатым потерям веса, что позволяет давать количественную оценку этим компонентам. Типичный современный высокочувствительный прибор для термогравиметрического анализа состоит из аналитических весов и платиновой чашечки для образца, которая помещается в печь (рис. 7.18). В некоторых вариантах прибора печка устанавливается горизонтально с соответствующим расположением весов.

Простейший вариант разделения вклада компонент в термогравиметрическую кривую хорошо виден на рис. 7.19, который получен при исследовании полипропилена, наполненного минеральным наполнителем.

Образец нагревается на воздухе, что приводит к полному разложению полипропилена; оставшаяся часть составляет минеральный наполнитель. Относительное содержание летучих (которые отсутствуют в данном случае), полимера и наполнителя могут быть найдены из анализа термогравиметрической кривой. Небольшие потери веса (3,5%) в области температур 750–800 °С характеризуют свойства использованного в данном случае конкретного минерального наполнителя. На рисунке также представлена термогравиметрическая кривая чистого полипропилена для его сравнения с наполненной композицией.

Метод ТГА чрезвычайно эффективен для анализа полимеров, содержащих различные добавки, о которых можно судить по потерям веса. Этот метод также может использоваться для анализа относительной термической стабильности индивидуальных компонент в смесевых композициях. Термическую стабильность можно оценить по кинетике потери веса при разложении материала. Описано также использование метода ТГА для оценки сопротивления композиций на основе эпоксидных смол к образованию трещин [15].

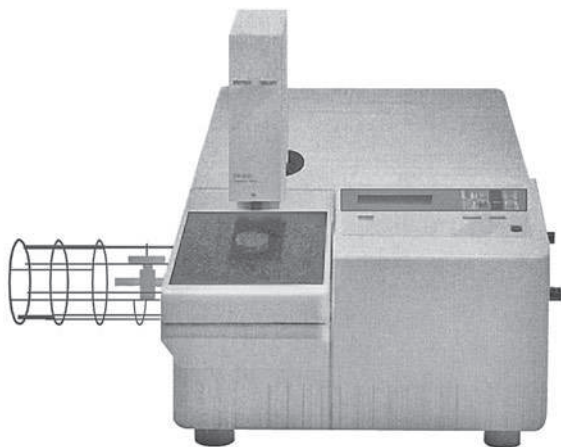


Рис. 7.18. Прибор для проведения термогравиметрического анализа (с разрешения *Mettler-Toledo Inc.*)

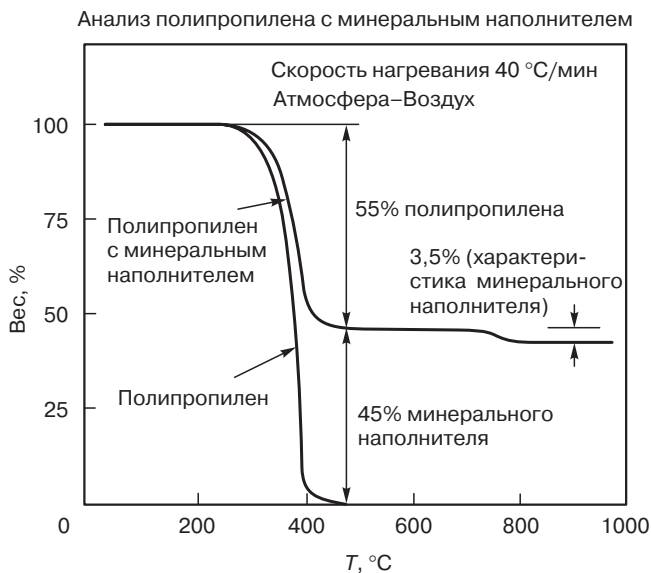


Рис. 7.19. Типичный вид термограммы, получаемой методом ТГА (с разрешения *Perkin-Elmer Corporation*)

7.6.3. Термомеханический анализ (ТМА)

Размеры образца при нагревании изменяются из-за теплового расширения материала, дезориентационных процессов и деформации, обусловленной приложением напряжений. Метод термомеханического анализа (ТМА) состоит в измерении этих изменений размеров при приложении постоянной силы. Если сила отсутствует или же она постоянна, то при использовании метода ТМА измеряется изменение длины образца в вертикальном направлении в условиях контролируемого изменения температуры.

Оборудование для выполнения термомеханического анализа (см. рис. 7.20) состоит из образца, механически связанного с тремя элементами измерительной схемы: датчика усилия, который необходим для поддержания действия постоянной силы, прикладываемой к образцу; датчика смещения, который фиксирует изменения размеров образца; системы задания и контроля температуры образца.

Образцы для испытаний заданных размеров готовят механической обработкой заготовки и затем помещают в прибор для ТМА, где образец деформируется, подвергаясь действию заданной силы. Это может быть сжатие, растяжение или изгиб. После сборки измерительной схемы образец помещают в печь (термокамеру), температура в которой контролируется термопарой.

Типичная термомеханическая кривая показана на рис. 7.21. Здесь в качестве приспособления для создания сжатия образца использован переходник, изготовленный из плавленого кремнезема. Этот переходник устанавливается на образец, сжатие или расширение которого фиксируется в зависимости от температуры.

Полимер, подвергаемый испытаниям, содержит вспенивающий агент.

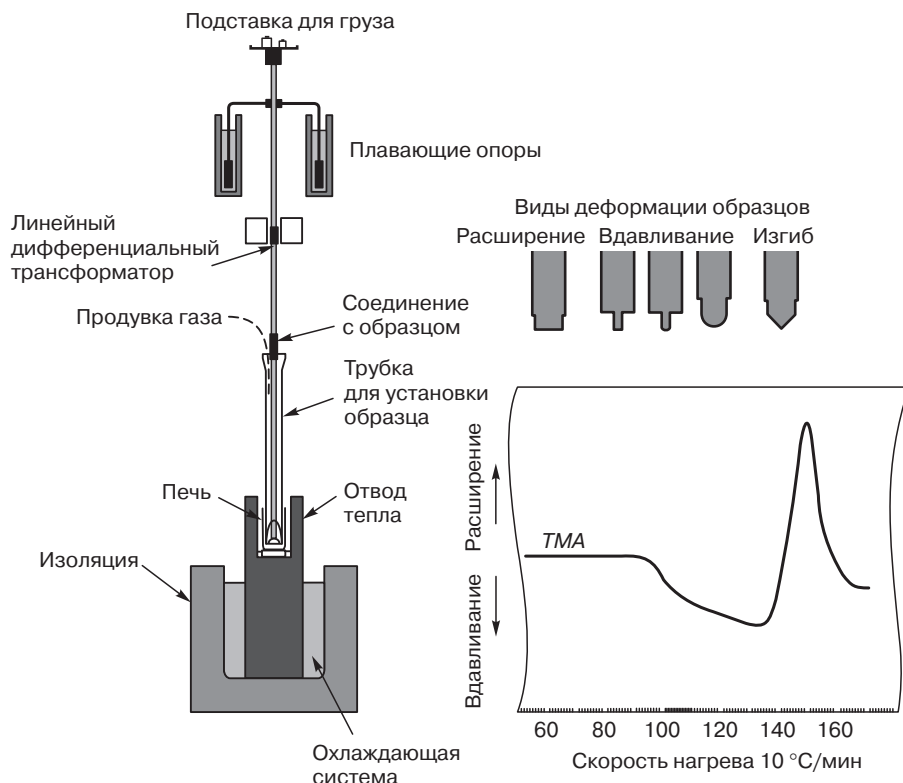


Рис. 7.20. Схема испытательной установки для термомеханического анализа (с разрешения Perkin-Elmer Corporation)

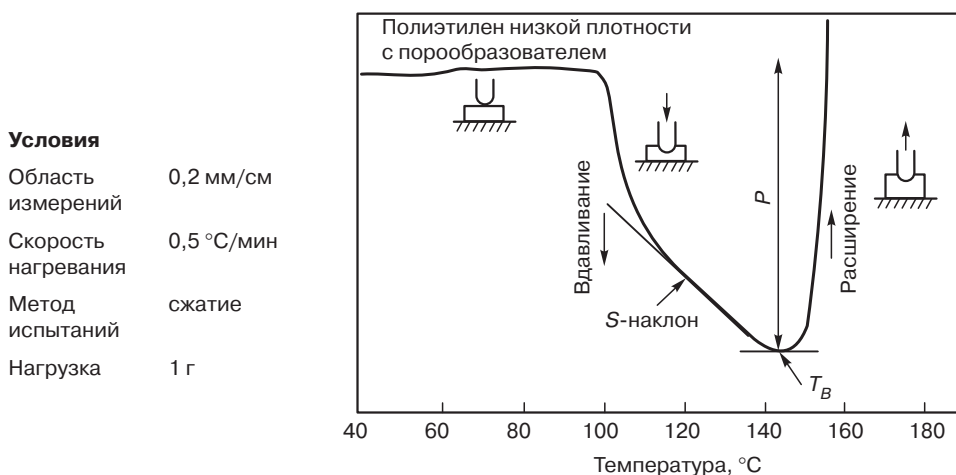


Рис. 7.21. Типичная термограмма, полученная методом ТМА (с разрешения Perkin-Elmer Corporation)

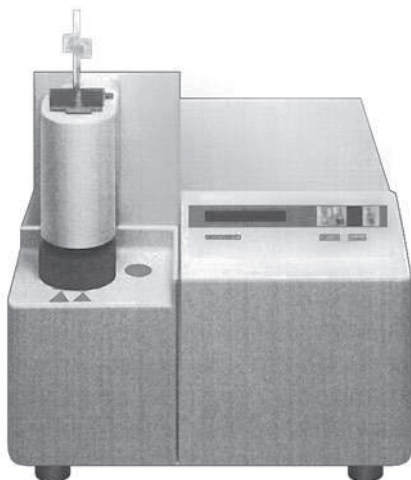


Рис. 7.22. Прибор для ТМА (с разрешения *Mettler-Toledo Inc.*)

При нагревании до 60°C наблюдается некоторое увеличение размера вследствие термического расширения самого полимера. В области плавления пробник слегка внедряется в полимер со скоростью, определяемой его вязкостью. Затем это внедрение компенсируется за счет того, что образуется пена при разложении вспенивающего агента.

Характеристика полимера, получаемая методом ТМА, дополняется определением температуры стеклования, коэффициента термического расширения и значения модуля упругости. Данные, получаемые методом ТМА, коррелируют с результатами определения точки размягчения по Вика и с температурой деформационной теплостойкости. На рис. 7.22 показан имеющийся на рынке прибор для испытаний по методу ТМА.

7.6.4. Измерения динамических механических свойств

Датчики, используемые при динамических механических испытаниях (ДМА) полимеров в линейной области идентичны или функционально аналогичны применяемым в методе ТМА. Однако в дополнение к статической нагрузке при динамических испытаниях создаются осциллирующие напряжения (или деформации). Это позволяет измерить динамический модуль (который представляет собой отношение напряжения, т. е. нормализованной силы, к деформации — нормализованному смещению). Для каждого цикла нагружения метод ДМА дает значения модуля и сдвига фаз, обусловленного запаздыванием отклика при деформировании вязкоупругого материала. Из этих результатов измерений могут быть вычислены модуль упругости («запаса») и модуль потерь, податливость и динамическая вязкость. Эти параметры зависят от приложенного напряжения, деформации, частоты, а также температуры.

Известно огромное множество результатов испытаний, выполненных этим методом в условиях контролируемого напряжения или деформации. Для испытаний

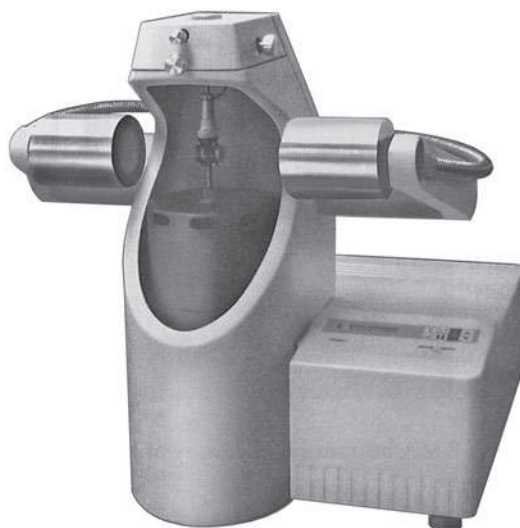


Рис. 7.23. Прибор для испытаний методом ДМА (с разрешения *Mettler-Toledo Inc.*)

методом ДМА используются образцы различной геометрической формы — консольные твердые образцы, деформируемые в условиях изгиба, образцы, зажатые по краям, при испытаниях пленок и волокон, сдвиг между параллельными плоскостями при испытаниях расплава.

Метод ДМА позволяет получить количественную характеристику вязкоупругих свойств полимеров. Это дает основания для оценки способности материала запасать или поглощать механическую энергию деформирования в конкретных условиях. Результаты измерений, выполненных методом ДМА, коррелируют с данными, получаемыми при таких традиционных испытаниях, как определение твердости, прочности, предела текучести, сопротивления ударным нагрузкам и (в некоторых случаях) измерение вязкости. Огромное разнообразие способов и методик измерений, а также геометрических форм образцов позволяет дать здесь лишь очень краткое описание этого метода.

На рис. 7.23 показан прибор для испытаний методом ДМА.

7.7. Спектроскопия

Инфракрасная спектроскопия представляет собой один из наиболее широко распространенных методов анализа полимеров, используемый уже более 70 лет. Инфракрасный спектр представляет собой своеобразный «отпечаток пальцев» материала, так как пики поглощения соответствуют частотам колебаний связей атомов, образующих материал. Поскольку каждый материал — это уникальная комбинация атомов, два разных материала всегда дают разные инфракрасные спектры. Отсюда следует возможность идентификации полимера по его спектру. По высоте пиков можно также судить об относительном содержании данного материала.

Современная техника инфракрасного анализа, называемая фурье-преобразованием инфракрасных спектров (*Fourier transformed infrared spectrometry, FT-IR*) позволяет устранить некоторые недостатки, присущие традиционному методу инфракрасной спектроскопии. В ранее существовавших приборах для инфракрасного анализа пики, отвечающие индивидуальным частотам, разделялись и измерялись отдельно, используя линии инфракрасного излучения, выделяемые призмами или решетками. В таких приборах, в которых каждое измерение на каждой частоте выполнялось отдельно, процедура измерений была чрезвычайно медленной. С помощью современных приборов, в которых используется принцип фурье-спектроскопии, возможно измерение до 100 образцов в день по сравнению с 2–4 в традиционной спектроскопии. Новые варианты Фурье-инфракрасных спектрометров обладают быстродействием, дают точные результаты и просты в обращении. Для успешного проведения анализа достаточно иметь очень небольшие количества материала. В методе инфракрасной спектроскопии излучение проходит через образец. Часть энергии излучения поглощается образцом, а часть проходит насквозь. Результирующие спектры позволяют отдельно проанализировать поглощенное и прошедшее излучение, что и является отражением структуры материала.

На рис. 7.24 представлена схема прибора и принцип измерения.



Рис. 7.24. Принципиальная схема инфракрасного спектрометра (с разрешения *Nicolet Instruments*)

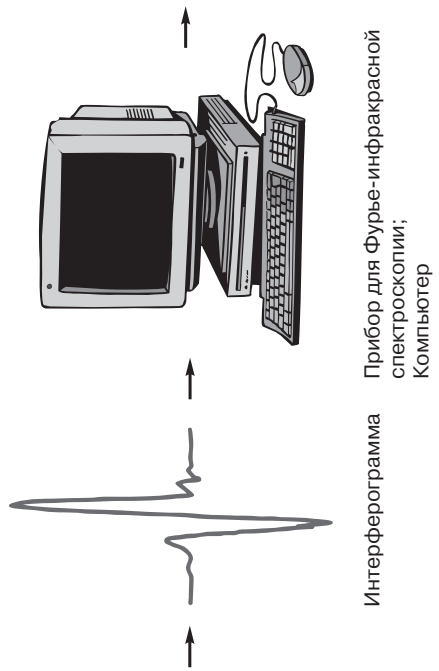
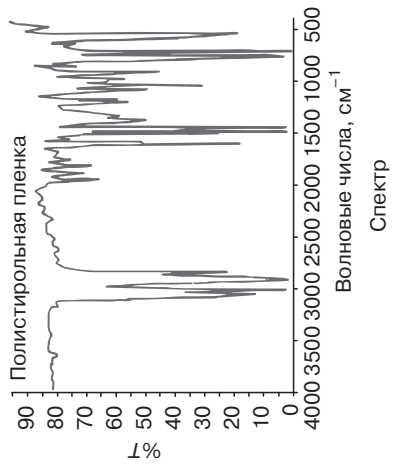
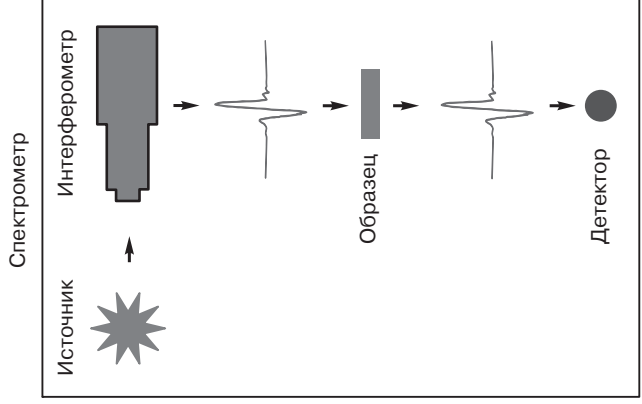


Рис. 7.25. Процедура анализа образца (с разрешения *Nicolet Instruments*)



Рис. 7.26. Спектрометр (с разрешения *Nicolet Instruments*)

Методика измерений, выполняемых на современном приборе, который дополнен мощным компьютером, чрезвычайно проста. Энергия в инфракрасном диапазоне эмитируется от источника, представляющего собой светящееся черное тело. Пучок излучения проходит через интерферометр, где происходит разложение света на составляющие. Таким образом, направляемый на образец луч представляет собой интерферограмму.

Далее луч направляется в камеру, в котором находится образец. Здесь луч либо проходит через образец, либо отражается от его поверхности. Именно на этой стадии поглощается энергия, отвечающая индивидуальным частотам, которые характерны для исследуемого образца. В конечном счете, луч попадает в детектор, из которого сигнал направляется в компьютер, где и происходит его математическая обработка методом фурье-преобразования. Инфракрасный спектр изображается самописцем в виде непрерывной линии, далее анализируется и интерпретируется [16].

В памяти компьютера содержится информация об инфракрасных спектрах тысяч полимеров и добавок, что позволяет идентифицировать исследуемый образец путем сравнения с существующими данными. Имеющаяся библиотека данных позволяет определить тип полимера, добавки или загрязнения за считанные минуты, что делает процесс измерений быстрым и эффективным.

На рис. 7.25 показана процедура измерений с помощью фурье-инфракрасного спектрометра, а на 7.26 показан имеющийся на рынке прибор для соответствующих измерений.

7.8. Испытания термореактивных смол

Термореактивные смолы обычно поставляются в форме, готовой для дальнейшей переработки. Большинство термореактивных полимеров не нуждаются в дальнейших операциях типа смешения или компаундирования, за исключением добавления

красителя. Предполагается, что поставщик материала обеспечивает потребителя вполне качественным товаром, так что требуется выполнение лишь очень небольшого количества испытаний для того, чтобы убедиться в однородности поставок, как об это говорилось выше в настоящей главе.

Термореактивные смолы, в отличие от термопластов, поставляются в промежуточном химическом состоянии и требуют осуществления дальнейшей полимеризации. Завершение процесса полимеризации происходит непосредственно при переработке. Для того чтобы убедиться в качестве материала, до начала его переработки выполняется ряд рутинных испытаний.

7.8.1. Эффективная (насыпная) плотность, коэффициент заполнения и сыпучесть (*ASTM D1895*)

Технологу-переработчику до начала процесса литья очень важно знать значения насыпной плотности (или коэффициента заполнения). Коэффициент заполнения определяет объем камеры, в которую засыпается сырье, и размеры каналов, по которым оно перемещается. Любые изменения насыпной плотности приводят к серьезным затруднениям при литье, таким как образование пор или неполное заполнение формы, поскольку в технологическом процессе чаще измеряется объем, а не вес загрузки. Коэффициент заполнения определяется как отношение объема любой порции свободно лежащего материала к объему того же количества материала после литья или формования. Коэффициент заполнения также равен отношению плотностей материала после завершения литья или формования к эффективной плотности материала при его поставке потребителю. Коэффициент заполнения характеризует изменение объема данного количества материала, которое происходит в технологическом процессе формования изделия.

Под кажущейся плотностью понимают отношение веса материала к его объему, причем этот объем включает поры, имеющиеся в исходном материале. Кажущаяся плотность есть мера сплошности материала.

А. Определение кажущейся плотности

Это простой метод испытаний, для выполнения которого требуется иметь измерительную емкость и воронку подходящих размеров. Воронка прикрывается с узкого конца ладонью или подходящей плоской дощечкой. Материал засыпается в воронку. Затем горловина воронки быстро открывается, и материал пересыпается в измерительный цилиндр. Избыток материала, попавший в измерительный сосуд, незамедлительно удаляется острым скребком, но так, чтобы при этом избежать встряхивания сосуда. Материал, попавший в измерительный сосуд, взвешивается с точностью до десятых долей грамма. Значения кажущейся плотности выражаются в граммах на кубический сантиметр или в фунтах на кубический фут. Этот метод применяется преимущественно для определения эффективной плотности свободно перемещающегося порошка или мелких гранул.

В альтернативном методе измерений используется воронка с широким нижним отверстием, так чтобы через нее свободно проходили крупные гранулы в форме цилиндров или дисков. Методика эксперимента и расчета остается той же самой.

Другие варианты того же самого метода используются для определения эффективной плотности грубых хлопьев, чипсов, нарезанных волокон и стрендов. Такие материалы не могут засыпаться в измерительную емкость через воронку, как это было описано для двух рассмотренных выше методов. Такие материалы, будучи в свободном состоянии, занимают большой объем. Поэтому перед началом измерений их слегка подрессовывают вручную, так что измерения кажущейся плотности проводят при небольшом сжатии.

Аппаратура, используемая для всех трех методов испытаний, показана на рис. 7.27.

Б. Определение коэффициента заполнения

Плотность материала в сформованной или отлитой детали определяется так, как описано в разделе 10.3. Расчет коэффициента заполнения производится по следующей формуле:

$$\text{Коэффициент заполнения} = \frac{\text{Средняя плотность материала в отливке}}{\text{Средняя кажущаяся плотность до литья}}.$$

В. Сыпучесть

Под сыпучестью твердых частиц материалов понимают время, за которое стандартизованное количество полимера проходит через воронку оговоренных размеров. В этом отношении сыпучесть характеризует подвижность частиц материалов. Процедура измерений очень проста: сыпучий материал пересыпается через стандартную воронку и измеряется время.

7.8.2. Испытания на текучесть

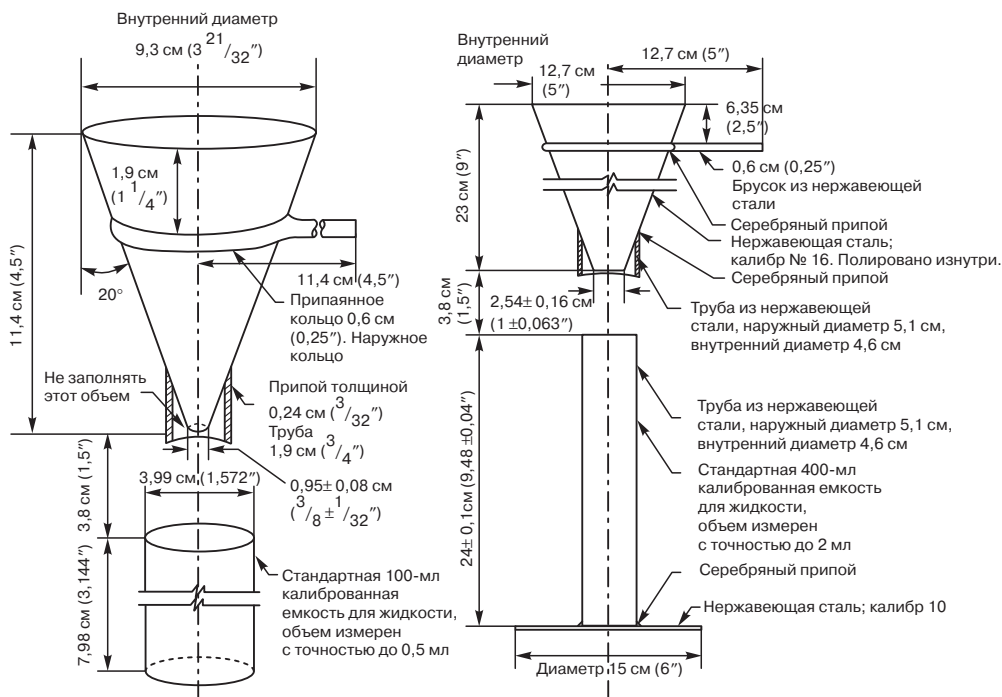
Способность материала течь оценивается путем заполнения формы конкретного объема полимером при фиксированных условиях по температуре и давлению. Испытания на текучесть проводят для контроля качества материала и как оценку поступающего сырья на его пригодность.

А. Факторы, влияющие на текучесть

Тип материала. Все смолы текут по-разному в зависимости от особенностей химического строения полимера. Например, для меламиноформальдегидных смол характерна большая длины течения в форме, чем для мочевиноформальдегидных смол. Для фенольных смол типично большое разнообразие марок, что позволяет технологю выбрать материал, наиболее подходящий для формования конкретного изделия.

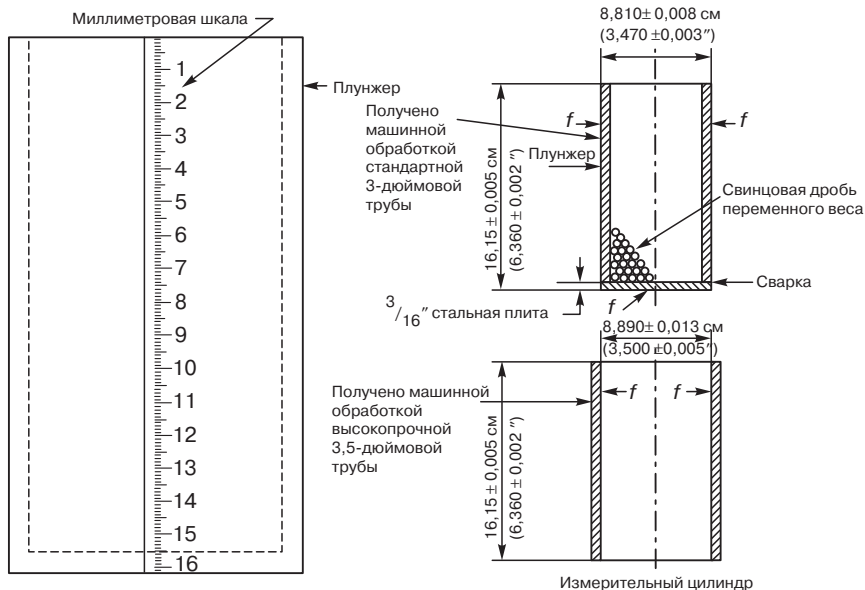
Тип наполнителя. Небольшие частички древесных опилок, слюды и минералов, вводимые в смолу в качестве наполнителей, способствуют подавлению турбулентности и уменьшению потерь на трение при заполнении формы. При использовании стеклянных волокон важное значение имеет их длина, влияющая на текучесть смолы.

Степень структурирования смолы. Степень предварительного сшивания смолы обычно контролируется производителем. При заполнении формы скорость



Аппарат для измерения кажущейся плотности. Метод А

Аппарат для измерения кажущейся плотности. Метод В



Аппарат для измерения кажущейся плотности. Метод С

Рис. 7.27. Аппараты для измерений кажущейся плотности (по ASTM)

структурирования может увеличиваться путем обогрева излучением или путем электронного предварительного подогрева.

Длительность хранения. Все смолы естественным образом склонны полимеризоваться при их хранении, что приводит к предварительному подшиванию, способствующему снижению текучести. Исключением является полиэфир, в котором каталитическое разложение замедляет сшивание и тем самым увеличивает продолжительность течения [17].

Б. Течение в спиральной форме термореактивных компаундов под низким давлением (ASTM D3123)

Длина затекания термореактивной композиции в спиральную форму служит комбинированной мерой плавления под давлением, текучести расплава, скорости гелеобразования в стандартизованных условиях испытаний. Для выполнения измерений необходимо иметь пресс для трансферного литья, стандартную спиральную форму и саму испытываемую композицию. Согласно заранее оговоренным условиям выбираются температура литья, давление прессования, массу образца, время отверждения под давлением и скорость перемещения плунжера. Заранее выдержанная в требуемых условиях композиция протекает по спиральной форме. По завершении структурирования форма раскрывается, и длина затекшей спирали определяется непосредственно по шкале, нанесенной на форму. Исследуемые композиции различаются по текучести как низко- (1–10 ед.), средне- (11–22 ед.) и высокотекучие (23–40 ед.).

Типичные образцы, отлитые в спиральной форме, показаны на рис. 7.28.

В. Испытания «по чаше» (ASTM D 731)

Индекс текучести порошкообразных литевых композиций. Этот метод оценки текучести используют для определения минимального давления, которое необходимо для формования изделия типа стандартной чаши, и времени, необходимого для полного

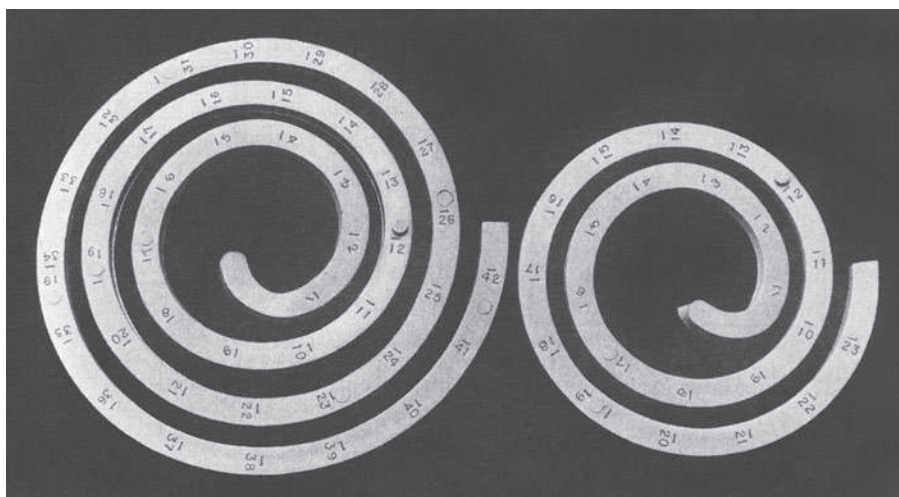
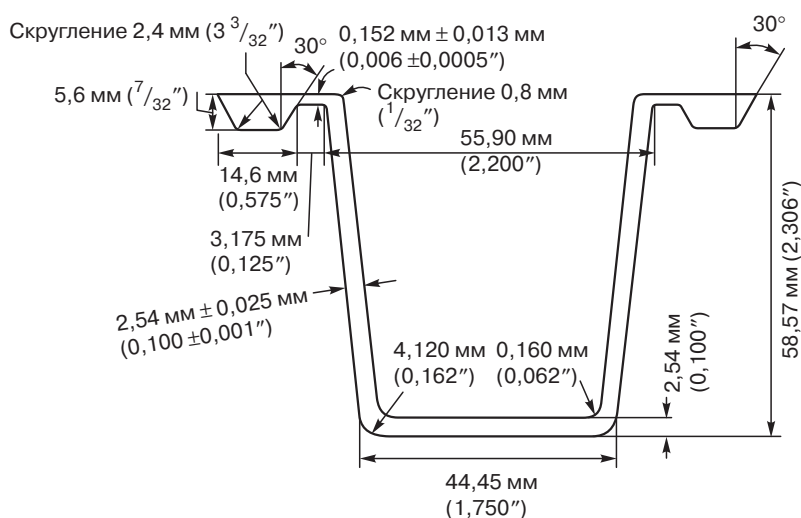


Рис. 7.28. Образцы полимеров, отлитые в спиральной форме



Примечание.

Все поверхности должны быть отполированы до микрофиниширования № 2*.
Сталь твердостью С-58 по Роквеллу.

Допуски на размеры $\pm 0,025$ мм (0,001 дюйма), если иное не указано на чертеже.

* Согласно требованиям стандарта SPI-SPE на литейные формы

Рис. 7.29. Стандартная форма для литья чаши (с разрешения ASTM)

заполнения формы. Предварительно выдержанная в требуемых условиях навеска материала загружается в форму. Затем форма закрывается под давлением, требуемым для формования чаши. Давление снижается ступенчато до тех пор, пока не будет достигнуто такое низкое давление, при котором не удастся закрыть форму. Предшествующее более высокое давление и время, необходимое для закрывания формы, принимаются за характеристики, определяющие индекс текучести материала.

На рис. 7.29 показана стандартная форма чаши, используемая для испытаний.

7.8.3. Оценка вязкости термореактивных смол

Определение вязкости представляется важным методом входных испытаний поступающих партий термореактивных смол. Изменения вязкости могут быть обусловлены условиями хранения, отклонения технологического режима получения материала и присутствием загрязнений. Сохранение вязкости в определенных пределах важно для обеспечения однородной пропитки и смачивания при производстве материалов, армированных волокнами или тканью, а также для осуществления технологических операций заполнения формы и структурирования. Измерения вязкости позволяют оценить жизнеспособность термореактивных систем, содержащих катализаторы. Рост вязкости указывает на то, что началась интенсивная реакция полимеризации или же испарился растворитель.



Рис. 7.30. Пузырьковый вискозиметр (с разрешения *Вук-Gardner USA*)

Пузырьковый вискозиметр

В пузырьковом вискозиметре жидкость стекает вниз в кольцевом зазоре между стеклянными стенками закрытой трубки, а пузырьки поднимаются вверх. Скорость движения пузырьков служит мерой кинематической вязкости. Измеряемая скорость подъема пузырьков сравнивается со скоростью движения пузырьков в калиброванных трубках, в которых залиты жидкости с известной вязкостью.

Пузырьковый вискозиметр показан на рис. 7.30.

7.8.4. Время желатинизации и температура экзотермического пика при отверждении термореактивных смол (ASTM D2471)

Время желатинизации и положение экзотермического пика по температурной шкале являются двумя основными характеристиками для технологии переработки термореактивных смол. Время желатинизации — это время, за которое образуется гель после введения в систему катализатора. Информация, касающаяся кинетики изменения вязкости во времени в термореактивных системах, содержащих катализатор, помогает определить время жизни композиции. Максимальная температура, которая достигается в процессе отверждения, называется температурой экзотермического типа. Материалы, при отверждении которых выделяются большие количества тепла, более опасны с точки зрения усадки и образования трещин. Это обусловлено термическим расширением, обусловленным интенсивными тепловыделениями, и усадкой,

связанной с образованием трехмерной сетки химических связей. При формовании ламинированных материалов избыточные тепловыделения при структурировании способствуют сохранению слабых связей между слоями армирующего материала и тем самым ухудшению физических свойств композиции. Для того чтобы избежать влияния изменений свойств при хранении и колебаний характеристик поставляемых партий сырья, технолог должен проконтролировать параметры материала, ответственные за его желатинизацию, прежде чем использовать полимер в производстве.

Для проведения испытаний необходимо иметь емкость с образцами, пробник, баню для поддержания постоянной температуры, часы и устройство для определения температуры. Все элементы измерительного устройства помещаются в баню с заданной температурой на определенное время. Когда температура всех реагирующих компонент достигнет заданного уровня, они смешиваются в рекомендуемых соотношениях. За начальную точку отсчета принимается момент запуска мешалки. Одновременно измеряется и записывается ход температуры реакционной смеси. Через каждые 15 с экспериментатор прикасается пробником к центру поверхности образца. Когда реакционная масса перестает прилипать к кончику чистого пробника, этот момент принимается за время желатинизации. При этом продолжает измеряться изменение температуры. Максимальная достигнутая в таком эксперименте температура трактуется как «температура экзотермического пика». Определяется также время, прошедшее от начала смешения, до достижения этой температуры.

Вместо ручного метода измерения характеристик гелеобразования могут использоваться серийные приборы, имеющиеся на рынке. Известны различные типы приборов такого типа. Один из таких приборов для определения времени желатинизации основан на методе падения груза определенного веса на образец через каждую

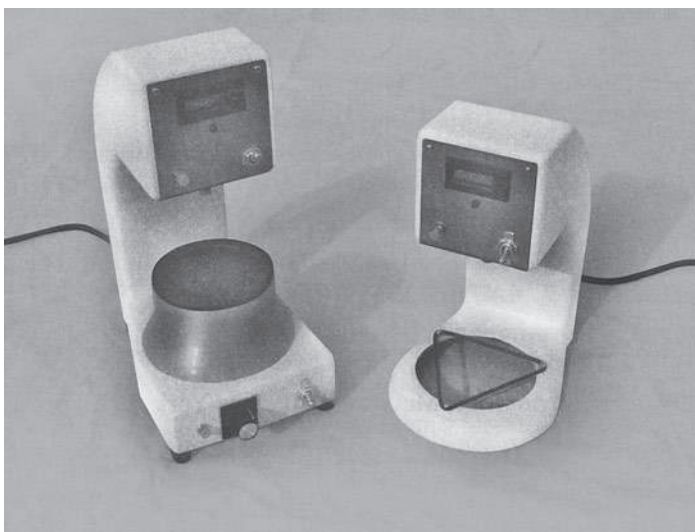


Рис. 7.31. Прибор для определения времени желатинизации (с разрешения *Shyodu Instruments Inc.*)

минуту. В момент достижения точки желатинизации груз перестает тонуть в образце. Этот момент фиксируется автоматически и время, прошедшее от начала процесса до этой точки, принимается за время желатинизации.

Другой вариант прибора для определения времени желатинизации показан на рис. 7.31. Он состоит из мешалки, приводимой во вращение электродвигателем. В момент желатинизации сопротивление образца превысит развиваемый крутящий момент двигателя, и вращение прекращается. За время желатинизации принимается отсчет времени, отстоящий на 0,1 мин от момента прекращения вращения.

Для определения времени отверждения термореактивных смол при повышенных температурах может использоваться емкость с нагреванием, осуществляемым от термостата, вместо обычной необогреваемой емкости.

Литература

1. Brookfield Engineering Labs, Inc. «More Solutions to Sticky Problems» Technical Bulletin, Stoughton, MA.
2. Lobo H., Bonilla J., and Riley D. «Plastics Analysis—Improved Characterization of Polymer Behavior and Composition» *Plastics Engineering*, Nov. 96.
3. Delaney D. and Houlston S. «The Capillary Rheometer: Applications in Plastics Industry» *Materials World*, Sept. 1996.
4. Dynisco-Kayeness Polymers Test Systems, Technical Bulletin, Sept. 1996.
5. Delaney, Reference 3.
6. Slysh R. and Guyler K.E. «Prediction of Diallyl Phthalate Molding Performance from Laboratory Tests» *SPE ANTEC*, 23 (1977), p. 4.
7. Gardner Laboratories, *Tech. Bull.: Rheology*, Silver Spring, MD, Sept. 1976.
8. Parks R.A. «Re-evaluation of Dilute Solution Viscosity Test Methods Proves Boon to PVC Quality Control» *Plast. Design and Processing* (Aug. 1974), p. 24–25.
9. McKinney P.V., *J. Polym. Sci.*, 9 (1965), p. 583–587.
10. Parks, Reference 8, p. 26.
11. May W.P. «New Test Methods for Plastisol Foams» *Plast. Tech.* (June 1977), p. 97.
12. Breakey D. and Cassel B. «What Foam Processors Should Know about Thermal Analysis Techniques» *Plast. Tech.* (Nov. 1979), p. 75.
13. Abofalia O.R. «Application of DSC to Epoxy Curing Studies» *SPE ANTEC*, 15 (1969), p. 610.
14. Prime R.B. «DSC of Epoxy Cure Reaction» *SPE ANTEC*, 19 (1973), p. 205.
15. Jaegers G. and Gedmer T.J. «The Use of TGA in Determining Track Resistance of Epoxy Compounds» *SPE ANTEC*, 16 (1970), p. 450.
16. Nicolet Instruments Corporation «Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry» Technical Bulletin, 1996.
17. Milby R.V., *Plastics Technology*, McGraw-Hill, New York, 1973, p. 457–474.

Ссылки на описание приборной техники

1. Waters Associates, *Tech. Bull.: Gel Permeation Chromatography*.
2. Instron, *Tech. Bull.: Rheological Instruments*.
3. Perkin-Elmer, *Tech. Bull.: Thermal Analysis*.
4. Nicolet Instrument Corporation, *Tech. Bull.: FT-IR*.

Рекомендуемые источники

1. Sward G.G. (Ed.), *Paint Testing Manual*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1970.
2. Shida M. and Cancino L.V. «Prediction of High Density Polyethylene Resin Processibility from Rheological Measurements» *SPE ANTEC*, 16 (1970), p. 620–624.
3. Macosko C. and Starita J.M. «Polymer Characterization with a New Rheometer» *SPE ANTEC*, 17 (1971), p. 595–600.
4. Terry B.W. and Yang K. «A New Method for Determining Melt Density as a Function of Pressure and Temperature» *S.P.E.J.*, 20(6), p. 37 (June 1964).
5. Merz E.H. and Colwell R.E. «A High Shear Rate Capillary Rheometer for Polymer Melts» *ASTM Bull.* No. 232 (Sept. 1958).
6. Mendelson R.A. «Melt Viscosity» *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, Vol. 8, John Wiley & Sons, New York, 1970, p. 587–619.
7. Bernhardt E.C. *Processing of Thermoplastic Materials*, Reinhold, New York, 1959.
8. McKelvey J.M. *Polymer Processing*. John Wiley & Sons, New York, 1960.
9. Van Wurzer J.R., Lyons J.W., Kim K.Y. and Colwell R.E. *Viscosity, and Flow Measurement, A Laboratory Handbook of Rheology*. John Wiley & Sons, New York, 1963.
10. Hertel D.L. and Oliver C.K. «Versatile Capillary Rheometer» *Rubber Age* (May 1975).
11. Miller B. «Why Good Resin Makes Bab Parts—and What you Can Do About It» *Plast. World* (Feb. 1976), p. 44.
12. Ekmanis J. and Church S. «Simple Test of Incoming Resins Rates Batch to Batch Quality Level» *Plast. Design and Processing* (March 1977), p. 30–34.
13. Willard P.E. «Determination of Cure of DAP Using DSC» *SPE ANTEC*, 17 (1971), p. 464–468.
14. Perkin-Elmer, Thermal Analysis Literature, *TA Application Studies Bulletin*: TAAS-19. «Characterization of Thermosets»; TAAS-20. «Polymer Testing by TMA»; TAAS-22. «Characterization and Quality Control of Engineering Thermoplastics by Thermal Analysis»; TAAS-25. «Applications of TA in the Electrical and Electronic Industries»; TAAS-26. «Applications of TA in the Automotive Industries»; TAAS-29. «Use of Thermal Analysis Method in Foam Research and Development».
15. Cassel B. and Gray A.P. «Thermal Analysis Simplifies Accelerated Life Testing of Plastics» *Plast. Eng.* (May 1977), p. 56–58.
16. Cassel B. and Breakey D. «What Foam Processors Should Know About Thermal Analysis Techniques» *Plast. Tech.* (Nov. 1979), p. 75–78.
17. Slade P.E. and Jenkins L.T. (Eds.), *Techniques and Methods of Polymer Evaluation*, Vol. 1, *Thermal Analysis*, 1966; Vol. 2, *Thermal Characterization Techniques*, 1970, Marcel Dekker, New York.

8. Горючесть

8.1. Введение

Расширяющееся применение пластмасс в домашнем хозяйстве, строительстве, автомобильной и авиационной промышленности приводит к тому, что эти материалы могут оказаться в ситуации, когда им угрожает огонь. Значительное время и большие деньги были затрачены на исследования, направленные на более глубокое понимание поведения полимерных материалов при воздействии на них открытого пламени. Был предложен ряд методик для предварительного отбора материалов и моделирования горения. Прежде чем перейти к более детальному обсуждению испытаний на горение, необходимо понять, с чем связана горючесть полимеров.

Когда полимер начинает гореть, он разлагается, и при этом с поверхности изделия выделяются летучие продукты деструкции. Пламя распространяется по материалу, а окисление на фронте горения приводит к выделению дополнительных тепловыделений, что усиливает разложение материала. Такой циклический процесс стабилизируется — твердый материал горит и разлагается, образуя большее количество тепла, которое способствует дальнейшему разложению [1].

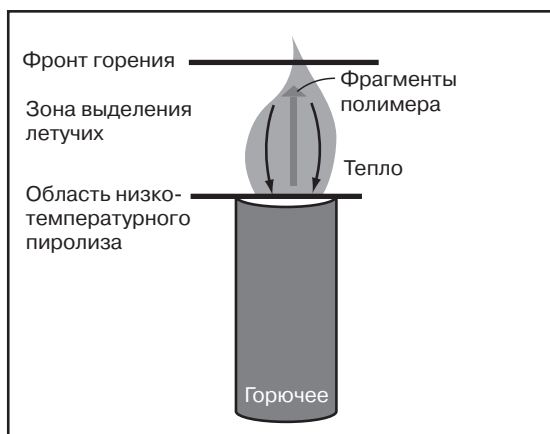
Этот процесс иллюстрируется на рис. 8.1.

Для того чтобы прервать циклическое развитие горения, необходимо воздействовать на процесс либо в газовой фазе, либо на поверхности твердого материала. Что касается газовой фазы, то здесь горение может быть ингибировано введением в полимер определенных добавок, которые влияют на химический процесс взаимодействия летучих компонент. В качестве таких добавок могут использоваться бром- или хлорпроизводные в сочетании с окисью сурьмы. Именно такие вещества добавляют к полистиролу или структурным пенам на основе АБС-пластика.

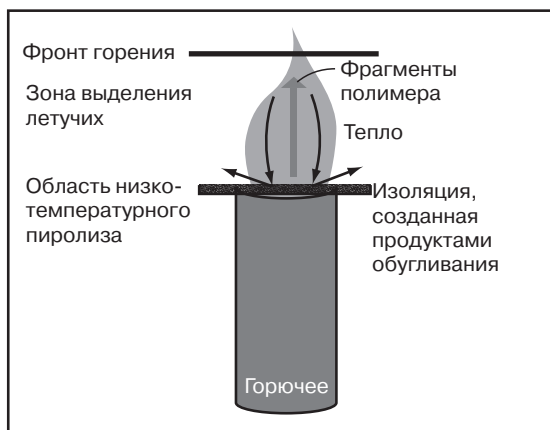
Ингибирование в твердой фазе достигается введением таких добавок в полимер, которые препятствуют горению. Это могут быть углеродсодержащие шлаки, которые образуют защитный изолирующий слой, препятствующий дальнейшему распространению горения. Этот метод эффективен для таких полимеров, как структурные пены на основе поликарбоната и полифениленоксида.

Другой метод воздействия на твердую фазу состоит в использовании соединений, активно поглощающих тепло, например, гидратов алюминия, которые, поглощая тепло, реагируют с выделением гидратированной влаги. Такие добавки также могут

Горение полимера происходит в непрерывных циклах. Выделяющееся тепло способствует выделению летучих и фрагментации полимера. Полимер разлагается и сгорает в области низкотемпературного пиролиза. При этом происходит взаимодействие свободных радикалов в зоне, где диффундируют летучие компоненты и образуется пламя



Твердая фаза отделена от области горения. Интенсивный процесс структурирования на поверхности полимера приводит к образованию продуктов обугливания, которые изолируют остальной полимер от зоны горения, и препятствует дальнейшему горению



В газовой фазе происходит ингибирование процессов взаимодействия свободных радикалов, которые образовались при горении, что препятствует разветвлению радикальных реакций и прерывает цикл горения

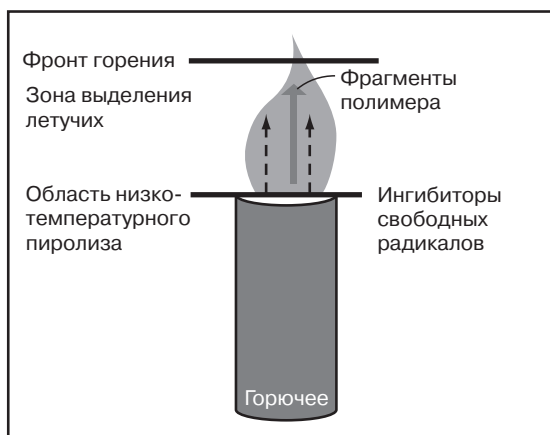


Рис. 8.1. Процесс разложение полимера (с разрешения Chemistry)

изменять характер процесса разложения, инициируя такие реакции, которые протекают с поглощением тепла [2].

Полимеры по их склонности к горению могут быть разделены на основные классы, перечисленные в табл. 8.1.

Первая группа состоит из полимеров, которые обладают высоким внутренним сопротивлением горению. Это достигается тем, что в их структуру входят галогены или ароматические группы, которые обладают высокой термической стабильностью, а также способностью образовывать при горении шлаки. Ко второй группе относятся полимеры, менее стойкие к горению. Их способность противостоять пламени может быть заметно улучшена введением подходящих антипиреновых добавок. К третьей группе относятся полимеры, которые легко горят и стойкость которых к горению трудно улучшить путем введения добавок, поскольку они легко разлагаются, образуя при этом горючие вещества [3].

Обсуждение проблем горючести полимеров не может быть сколько-нибудь полным, если не принимать во внимание образование при горении дыма и токсичных газов. Задымление препятствует эвакуации людей из зоны пожара, равно как и пожарным в проведении спасательных операций. Все полимеры в той или иной мере при горении образуют дым и горючие газы, хотя одни полимеры гораздо более опасны в этом отношении, чем другие. Для оценки дымообразования и появления токсичных газов предложен ряд методов испытаний.

Способность материала загореться зависит от конкретных условий, а также от природы полимера. Довольно трудно моделировать реальные условия образования огня. Поэтому приходится ограничиваться мало- и крупномасштабными лабораторными

Таблица 8.1. Полимеры и их горючесть

Полимеры с высоким внутренним сопротивлением горению

Политетрафторэтилен
Ароматический полиэфирсульфон
Ароматические полиамиды
Ароматические полиимиды
Ароматические простые полиэфиры
Ароматические сложные полиэфиры
Поливинилидендихлорид

Полимеры с умеренным внутренним сопротивлением горению

Кремнийорганические смолы
Поликарбонаты
Полисульфон

Горючие полимеры

Полистирол
Полиацетали
Полиакрилаты
Полиэтилентерефталат
Полипропилен
Полиэтилен
Целлюлоза
Полиуретан

Источник: *Chemistry*, June 1978, p. 23.

испытаниями, которые позволяют предсказать склонность к возгоранию, плотность дымообразования и токсичность газов.

Склонность материала к возгоранию определяется рядом факторов [4]:

легкость воспламенения — насколько легко материал загорается;

распространение пламени — насколько быстро пламя распространяется по поверхности материала;

огнезащитные свойств — насколько быстро огонь преодолевает стенки или барьеры;

скорость тепловыделений — какое количество тепла и с какой скоростью выделяется при горении;

легкость угасания — насколько быстро особенности химического процесса горения приводят к угасанию пламени;

дымообразование;

образование токсичных газов.

В табл. 8.2 собраны методы испытаний на горючесть и дана другая информация, имеющая отношение к обсуждаемому вопросу.

8.2. Испытания на горючесть.

Нежесткие твердые пластмассы (ASTM D4804)

Этот метод испытаний предназначен для нежестких пластмасс, образцы приготовленные из которых могут деформироваться или прогнуться, если испытывать их в горизонтальном положении в соответствии со стандартами *ASTM D3801* или *ASTM D635*. Рассматриваемый метод основан на испытаниях небольших лабораторных образцов, предназначенных для скрининга полимерных материалов путем сравнения таких их характеристик, как скорость угасания пламени, а также относительной скорости горения. Метод был изначально разработан для первичного скрининга, сравнительных испытаний и контроля качества. Результаты испытаний представляются в терминах горючести пластмассы.

Предлагается использовать две методики испытаний. Согласно процедуре А, используется лабораторная горелка, зажим для крепления образцов, камера, в которой проводятся испытания и подходящий таймер. Испытываются образцы размером 2×8×толщина. На образец на расстоянии 5 дюймов от дна наносится метка. После кондиционирования в требуемых условиях образец устанавливается в зажиме вертикально. Зажигается лабораторная горелка и регулируется длина язычка пламени. Далее кончик пламени горелки подносится к образцу снизу и выдерживается в течение 3 с. Затем пламя убирается. Измеряется время до прекращения горения. После того, как горение прекратилось, пламя горелки сразу же вновь подносится к образцу и контакт продолжается опять в течение 3 с. Продолжительность горения и свечения измеряются в секундах. В отчете о выполненном эксперименте также указывается, имело ли место каплепадения от образца, и догорел ли образец до нанесенной на него отметки.

Таблица 8.2. Испытания на горючесть

Организация, разрабатывавшая метод	Методы испытаний	Обозначение стандарта/ метода	Размеры образца (в дюймах)	Количество образцов, подлежащих испытаниям	Расположение образца	Источник возгорания	Измеряемые характеристики
ASTM	Скорость горения, нежесткие твердые пластмассы	D4804 Метод А	2×8×толщина	10	Ветикальное	Лабораторная горелка	Длительность горения и свечения до погасания
ASTM	Скорость горения самоподдерживающихся образцов пластмасс, находящихся в горизонтальном положении	D4804 Метод Б D-635	$1\frac{1}{2} \times 5 \times \text{толщина}$ $1\frac{1}{2} \times 5 \times \text{толщина}$	10	Горизонтальное Горизонтальное	Лабораторная горелка Горелка Бунзена	Скорость горения Скорость горения, среднее время и площадь возгорания
ASTM	Скорость горения самоподдерживающихся образцов пластмасс, находящихся в вертикальном положении	D-3801	$1\frac{1}{2} \times 5 \times \text{толщина}$	10	Ветикальное	Лабораторная горелка	Время, после угасания пламени и свечения
ASTM	Сопротивление горению жестких пластмасс при контакте с раскаленным объектом	D-757	—	—	—	—	Прерывание горения
ASTM	Сопротивление пластмасс возгоранию. Процедура В	D-1729	$3\frac{3}{4} \times \text{толщина}$ Лист $3\frac{3}{4} \times \frac{3}{4} \times t$	14	Горизонтальное	Горячий воздух в печи	Температуры вспышки и самовозгорания Визуальная оценка

Окончание табл. 8.2

Организация, разрабатывавшая метод	Методы испытаний	Обозначение стандарта/метода	Размеры образца (в дюймах)	Количество образцов, подлежащих испытаниям	Расположение образца	Источник возгорания	Измеряемые характеристики
ASTM	Кислородный индекс. Испытания на горючесть	D-2863	$3/4 \times 1/8 \times 5$	10	Ветикальное	Пламя при горении водорода или пропана в атмосфере кислорода или азота	Кислородный индекс
ASTM	Поверхностное сопротивление возгоранию строительных материалов	E-84	20×300	1	Горизонтальное	Смесь горючего газа с воздухом	Выделение дыма
ASTM	Высота пламени, продолжительность горения и потери веса пенопластов, находящихся в вертикальном положении	D-3014	$10 \times 3/4 \times 3/4$	6	Ветикальное	Газовая горелка	Потери веса и время до угасания пламени
ASTM	Скорость горения пенопластов, находящихся в вертикальном положении	D-1692	—	—	—	—	Прерывание горения
ASTM	Скорость, продолжительность и площадь горения гибких тонких пластмассовых листов	D-1433	3×9	10	45°	Бутановая горелка	Скорость горения, площадь и время горения, визуальная оценка

Федеральный стандарт	Сопротивление горению трудно воспламеняемых пластмасс	FTMS 406 Метод 2023	$5 \times 1/2 \times 1/2$	5	Ветикальное	Электрическая спираль или искра	Время до поджигания, длительность горения и скорость распространения пламени
UL (Underwriters laboratories)	Горючесть полимерных материалов	UL V-O	$1/2 \times 5 \times \text{толщина}$	5	Ветикальное	Лабораторная горелка	Время до угасания пламени
UL (Underwriters laboratories)	Горючесть полимерных материалов	UL HB	$1/2 \times 5 \times \text{толщина}$	3	Горизонтальное	Лабораторная горелка	Время до угасания пламени
ASTM	Плотность дыма, образующегося при горении пластмасс	D-2843	$1 \times 1 \times 1/4$	3	Горизонтальное	Пропановая горелка	Процент поглощенного света
ASTM	Испытания на дымообразование	ASTM E662/NFPA 258	3x3	6	Ветикальное	Электрическая печ	Плотность образующегося дыма
ASTM	Особенности дыма, образующегося при горении пластмасс	ASTM D-4100	$1/2 \times 1/2 \times 1/8$	6	Горизонтальное	Микрогорелка Бузена	Процент дыма
ASTM	Испытания на воспламеняемость от панели, излучающей тепло	E-162	6x18xтолщина	4 минимум	60°	Ацетилен	Индекс распространения пламени
Метод университета Огайо (OSU)	Тест по методу OSU на угасание пламени	—	—	—	Горизонтальное или вертикальное	Панель, нагреваемая горящим газом	Максимальная скорость дымообразования

На рис. 8.2, *a* показана типичная схема испытаний.

При выполнении испытаний по процедуре *B* требуется изготовление специального держателя для образца, который позволил бы устанавливать образец под углом 45 град к горизонтали. Свободный конец образца подвергается воздействию пламени в течение 30 с. Измеряется время, за которое пламя распространяется от отметки, сделанной на высоте 1,0 дюйм, до отметки на высоте 3,9 дюйма.

Типичная установка для испытаний по процедуре *B* показана на рис. 8.2, *б*.

Этот метод используется для скрининга полимеров, выполнения исследовательских работ, контроля продукции, включения получаемых данных в спецификацию на материал и входного контроля качества. Результаты испытания не могут быть использованы для оценки пожарной опасности того или иного материала. В целом ряде публикаций [5, 6] указывалось на плохую корреляцию между результатами испытаний малых лабораторных образцов и крупных образцов, процесс горения которых ближе в реальной жизни.

8.3. Испытания на горючесть самоподдерживающихся образцов, находящихся в горизонтальном положении (*ASTM D635*)

Этот метод испытаний предназначен для определения относительной скорости горения и/или размеров области и длительности горения горизонтально расположенных образцов, которые являются достаточно жесткими, чтобы сохранять свою форму. Такие материалы характеризуются тем, что, будучи установлены в зажим с одной стороны и помещены в горизонтальном положении на высоте 0,4 дюйма над горизонтальным экраном, вначале не прогибаются, а свободный конец касается экрана.

Метод испытаний очень похож на процедуру *A* испытаний на горючесть нежестких пластмасс, за исключением способа крепления образца. В отличие от ранее описанного метода образец закрепляется с одной стороны и устанавливается горизонтально. К свободному концу подносится горелка, которая поджигает образец в течение 30 с. Измеряется время, величина области горения и скорость распространения пламени; в отчете об испытаниях также дается визуальная оценка процесса горения.

Этот метод испытаний используется в основном для контроля качества полимера, сравнительных испытаний и получения данных для спецификации материала. Между результатами этих испытаний и горючестью материала в реальных условиях испытаний существует плохая корреляция, так что этот метод не может использоваться для выработки критериев пожарной опасности.

На рис. 8.3 показан схема типичной установки для испытаний, описанных выше.

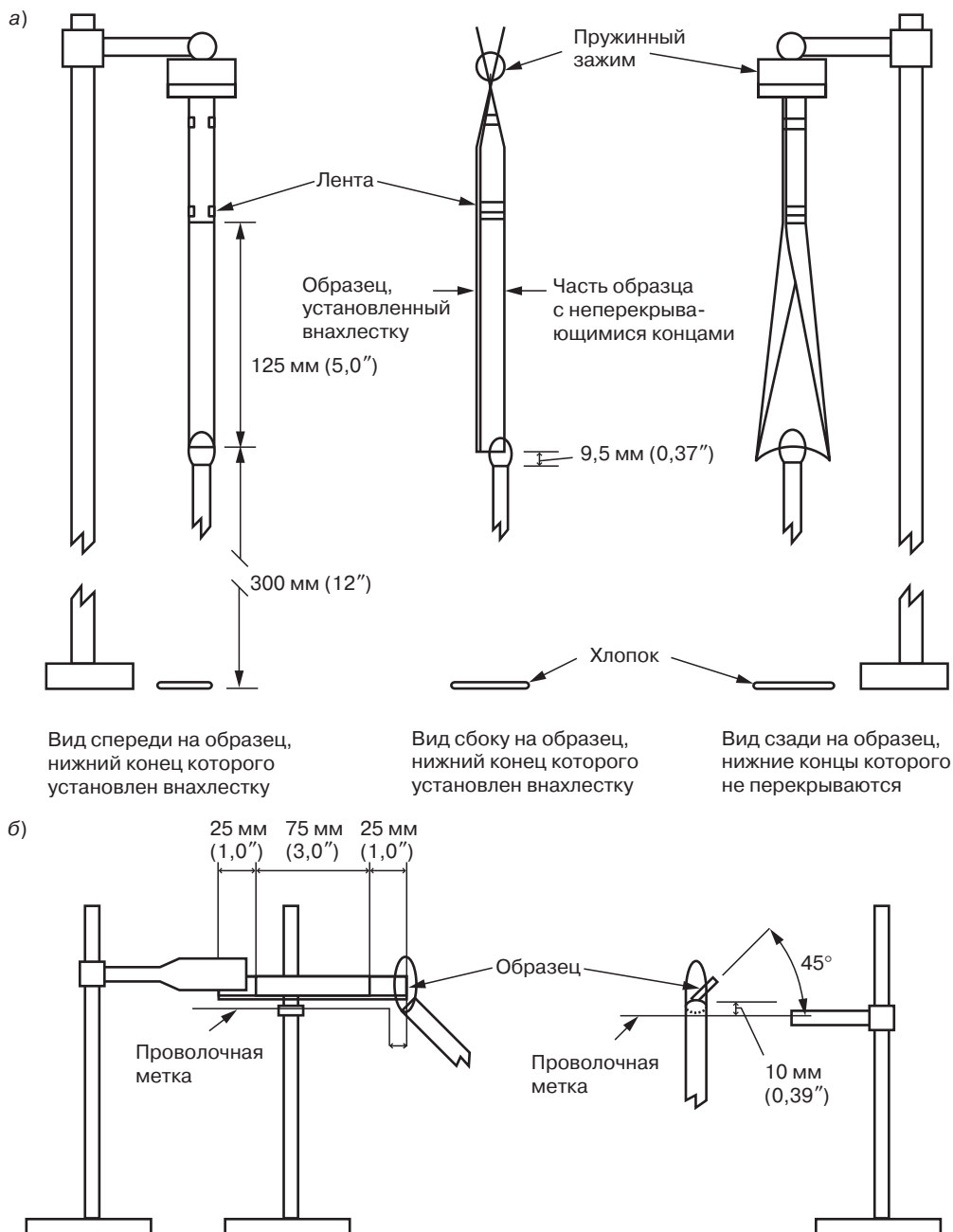


Рис. 8.2. Схемы экспериментальных установок для испытаний на горючесть по процедурам А-а и В-б (воспроизведено с разрешения ASTM)

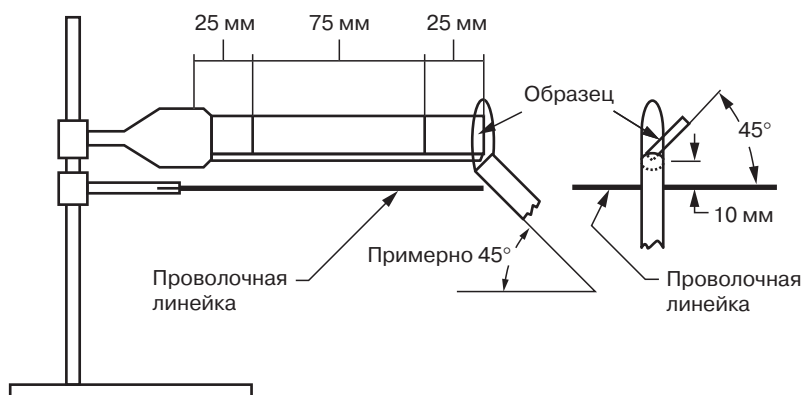


Рис. 8.3. Схема установки для испытаний на горючесть самоподдерживающихся образцов (воспроизведено с разрешения ASTM)

8.4. Испытания на горючесть твердых пластмасс при установке образцов в вертикальном положении (ASTM D3801)

По этому методу испытаний дается сравнительная оценка горючести образцов, установленных в вертикальном положении. Метод был разработан для полимерных материалов, используемых для изготовления различных устройств и приборов. Получаемые результаты могут использоваться для предварительного сравнения стойкости к горению различных материалов, предназначенных для конкретного применения. Система классификации полимеров для их сравнения разработана для контроля качества и предварительного отбора материала, предназначенного для изготовления той или иной детали. Этот вопрос далее подробно рассмотрен в разделе 8.12, где речь идет об испытаниях на горючесть по *UL*.

Методика измерений проста. Она состоит в том, что образец закрепляют в зажиме и устанавливают вертикально. Далее к образцу дважды подносят пламя, которое обжигает образец в течение 10 с. Измеряют длительность последующего горения (т. е. времени, в течение которого образец продолжает гореть после того, как убран источник возгорания) после первого контакта материала с пламенем горелки. Затем повторяют измерения после повторного поднесения горелки. В отчете об испытаниях также необходимо указать, имело ли место падение капель с горящего образца, которые бы подожгли лежащую кучку хлопка.

На рис. 8.4 показана типичная схема испытаний, а на рис. 8.5 представлен образец прибора для оценки горючести.

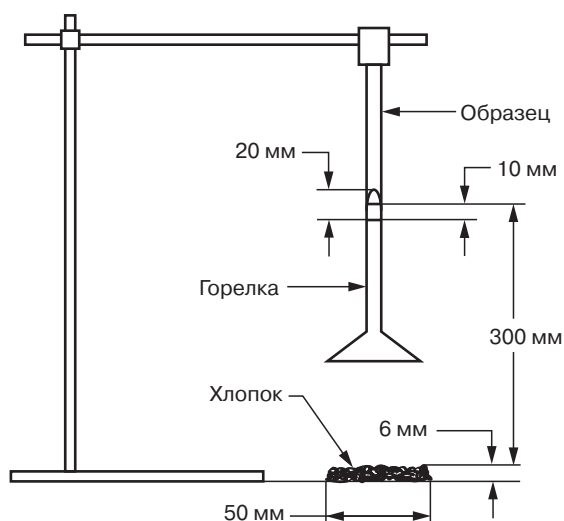


Рис. 8.4. Схема установки для испытаний на горючесть (воспроизведено с разрешения *ASTM*)

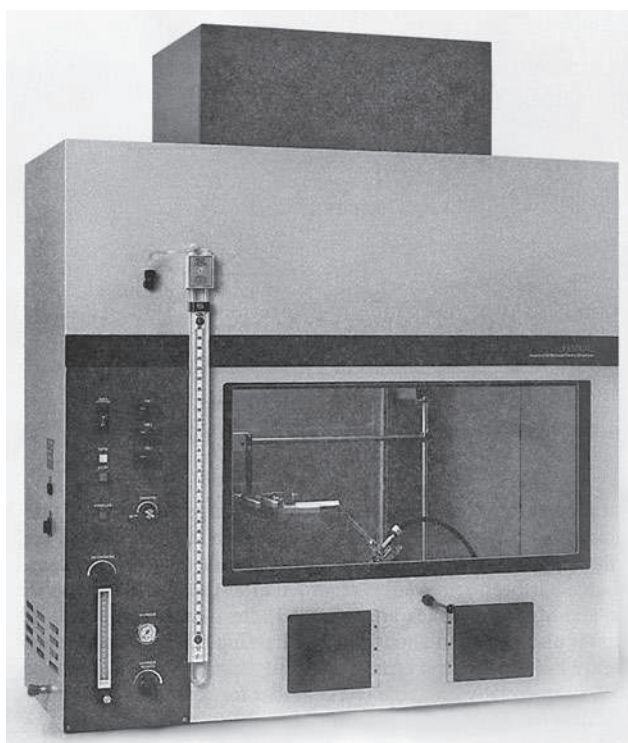


Рис. 8.5. Камера для испытаний на горючесть (с разрешения *Atlas Material Testing Technology LLC.*)

8.5. Воспламенение пластмасс

8.5.1. Введение

Стойкость пластмасс к воспламенению (возгоранию) очень важна, поскольку без возгорания нет огня и нет необходимости защиты от пожара. Возгораемость определяется как способность к возникновению первоначального горения материала [7]. *Температура вспышки* — это минимальная начальная температура воздуха, циркулирующего вокруг образца, при которой выделяющиеся газообразные продукты воспламеняются от небольшого стороннего источника огня. *Температура самовоспламенения* — это минимальная начальная температура воздуха, циркулирующего вокруг испытуемого образца, при которой (в отсутствие внешнего источника огня) происходит воспламенение газов, выделяющихся из образца, что проявляется в виде взрыва, открытого пламени или самоподдерживающегося свечения.

Разработаны несколько основных методов для оценки возможности воспламенения. Согласно первому из них (*ASTM D1929*) определяется температура, при которой происходит достаточно глубокое разложение полимера, чтобы выделяющиеся газы могли загореться самопроизвольно или от стороннего источника огня. По второму методу оценки возгораемости предлагается использовать горелку Бунзена, которая на короткое время подносится к образцу. Далее определяется, будет ли продолжаться устойчивое горение после устранения источника огня.

8.5.2. Определение температуры воспламенения (*ASTM D1929*)

Этот метод представляет собой лабораторный способ определения температур вспышки и самовоспламенения с использованием камеры с нагретым воздухом. Оборудование, известное под названием прибора Сечкина, показано на рис. 8.6. Схематическое

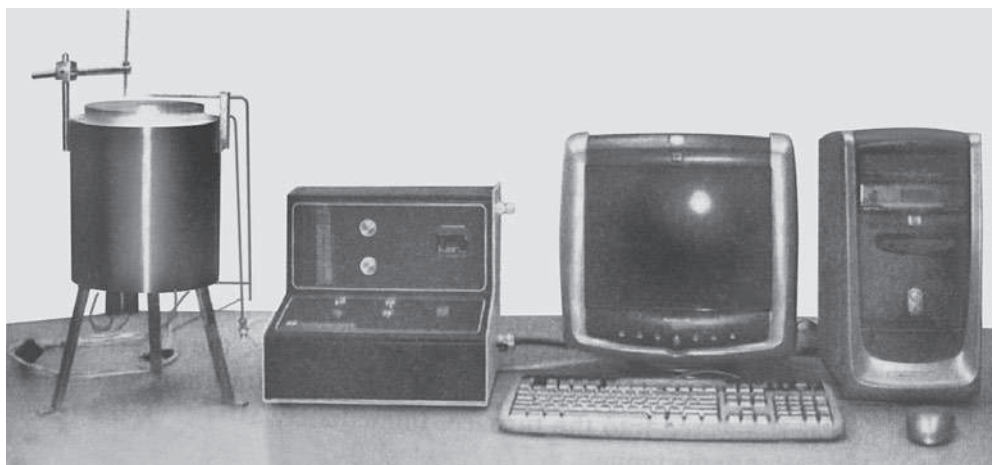


Рис. 8.6. Прибор Сечкина для измерения температуры самовоспламенения (с разрешения *Custom Scientific Instruments, Inc.*)

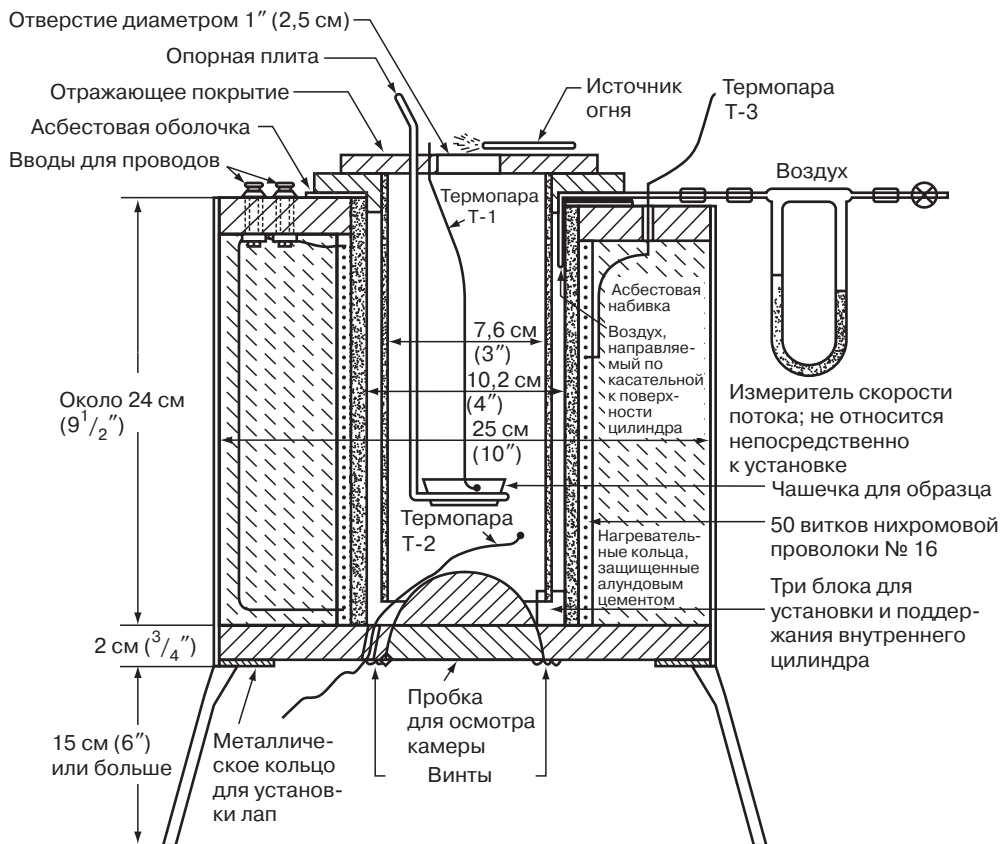


Рис. 8.7. Изображение разреза камеры для испытаний на воспламенение горячим воздухом (воспроизведено с разрешения ASTM)

изображение разреза камеры, в которой подогревается воздух, используемый для воспламенения, показано на рис. 8.7.

Эта экспериментальная установка состоит из трубы (печки) и внутренней керамической трубы-вкладыша, установленной внутри камеры. Внутренняя трубка способна выдержать нагрев до 750°C . В установке использован чистый воздух, скорость подачи которого измеряется отдельно. Этот воздух подается по касательной к верхней части установки в зазор между трубами. Воздух нагревается от электрического нагревателя, циркулирует в кольцевом зазоре между трубами и входит во внутреннюю трубу вблизи дна камеры. Для создания источника огня используется медная трубка, через которую подается воспламеняемый газ. Эта трубка располагается горизонтально и размещается над верхней поверхностью разрезанного диска.

Образец помещается в специальную чашечку внутри камеры. Для измерения температуры используют две термопары. Одна из них помещается непосредственно около испытуемого образца, а другая — ниже держателя образца. Они измеряют температуру образца и воздуха соответственно.

Испытуемый термопластичный материал обычно используется в виде гранул, используемых для литья. Можно также использовать образцы в виде листов размером 0,75×0,75 дюйма. Перед началом испытаний образцы кондиционируют по стандартной методике. Для определения температуры воспламенения используют две методики. Процедура *A* более продолжительная, и поэтому применяется реже. Процедура *B* позволяет получать аналогичные результаты за более короткое время.

Для проведения испытаний используют воздушный поток со скоростью 5 футов/мин при температуре 400 °С. По достижении заданной температуры воздуха держатель чашечки с образцом опускают в камеру. Немедленно после этого включают таймер и поджигается горелка. Слабый взрыв выделяющихся газов или вспышка сигнализирует о воспламенении. За этим обычно следует непрерывное горение образца. Если воспламенение образца происходит до истечения 5-минутного периода, испытания повторяют при более низкой температуре, используя при этом свежий образец. Если воспламенение не происходит по истечении 5 мин, то эксперимент повторяют при более высокой температуре. Наименьшая температура, при которой происходит вспышка, принимается за минимальную температуру вспышки.

Температура самовоспламенения определяется аналогичным образом, но без применения внешнего источника огня. Наименьшая температура воздуха, при которой образец воспламеняется, принимается за минимальную температуру самовоспламенения. При описании результатов испытаний также отмечают такие явления, как плавление полимера, образование пузырей и дыма.

Этот метод испытаний полезен для сравнительной оценки воспламеняемости различных материалов. Однако результаты этих испытаний не могут трактоваться как единственный критерий пожарной опасности. Предлагались и другие методы скрининга и сравнения материалов по их отношению к воспламеняемости [8].

8.5.3. Реакция материала на поджигание (ASTM D3713)

Этот метод испытаний пластмасс используется, прежде всего, для определения реакции материала на поджигание, причем источником огня служит небольшое пламя контролируемой эффективности, воздействующее на образец, установленный в вертикальном положении.

Образец подвергается воздействию пламени в строго стандартизованных условиях. Огонь касается образца через каждые 5 с, причем максимальная продолжительность испытания составляет 60 с. Для каждого нового шага поджигания используется новый образец. Если достигается конечная точка эксперимента, то длительность воздействия огня сокращается до тех пор, пока 10 образцов, поджигаемых последовательно, не пройдут испытания. Такая продолжительность воздействия пламени для образцов фиксированной толщины называется индексом отклика на поджигание. Под этим понимается реакция образца определенной толщины и формы на воздействие термической энергии, создаваемой слабым пламенем. Указанный индекс представляет собой максимальное время, которое выдерживает данный образец без полного сгорания, горения или свечения или нескольких эффектов сразу в течение более чем 30 с после устранения источника возгорания, и при этом не образуются капли, которые поджигают лежащую снизу кучку хлопка.

Область применения испытаний данного типа состоит в оценке стойкости материала, изготовленного из него изделия или некоторой конструкции воздействию тепла и пламени в строго контролируемых условиях. Результаты таких испытаний не должны использоваться для оценки пожарной опасности испытанного образца в реальных условиях эксплуатации.

8.6. Определение кислородного индекса (ASTM D2863, ИСО 4589)

8.6.1. Введение

Под кислородным индексом понимают минимальную концентрацию кислорода, выраженную в процентах, которая в смеси с азотом способна поддерживать горения материала при комнатной температуре в стандартизованных условиях эксперимента. Измерение кислородного индекса считается одним из наиболее важных испытаний полимера на воспламеняемость, поскольку этот показатель является количественной оценкой материала, позволяющей производить отбор полимерных материалов по их горючести. Измерения кислородного индекса позволяет преодолеть серьезные недостатки других традиционных испытаний на возгораемость. К числу таких недостатков относится возможность варьирования технологии поджигания образцов, неоднозначная оценка критической точки при повторных испытаниях и проведение испытаний в неравновесных условиях [9]. В табл. 8.4 дается сравнение кислородных индексов ряда материалов. Обратите внимание, что дерево красного дуба обладает значением кислородного индекса (наименьшей воспламеняемостью) большим, чем у полистирола, но много меньшим, чем у поликарбоната и поливинилхлорида.

8.6.2. Процедура испытаний

Определение кислородного индекса производится при варьировании соотношения кислорода и азота в газовом потоке, направляемом вверх через стандартную колон-

Таблица 8.4. Ранжирование по кислородному индексу ряда материалов

Материал	Кислородный индекс, %
Красный дуб	24,6
Полиацетали	16,2
Полиэтилен	17,4
Полипропилен	17,4
Полистирол	18,3
Поликарбонат	27,0
Полиамид-66	28,0
Поликарбонат с 40% стекла	30,5
Поливинилхлорид	47,0
Поливинилиденхлорид	60,0
Политетрафторэтилен	95,0

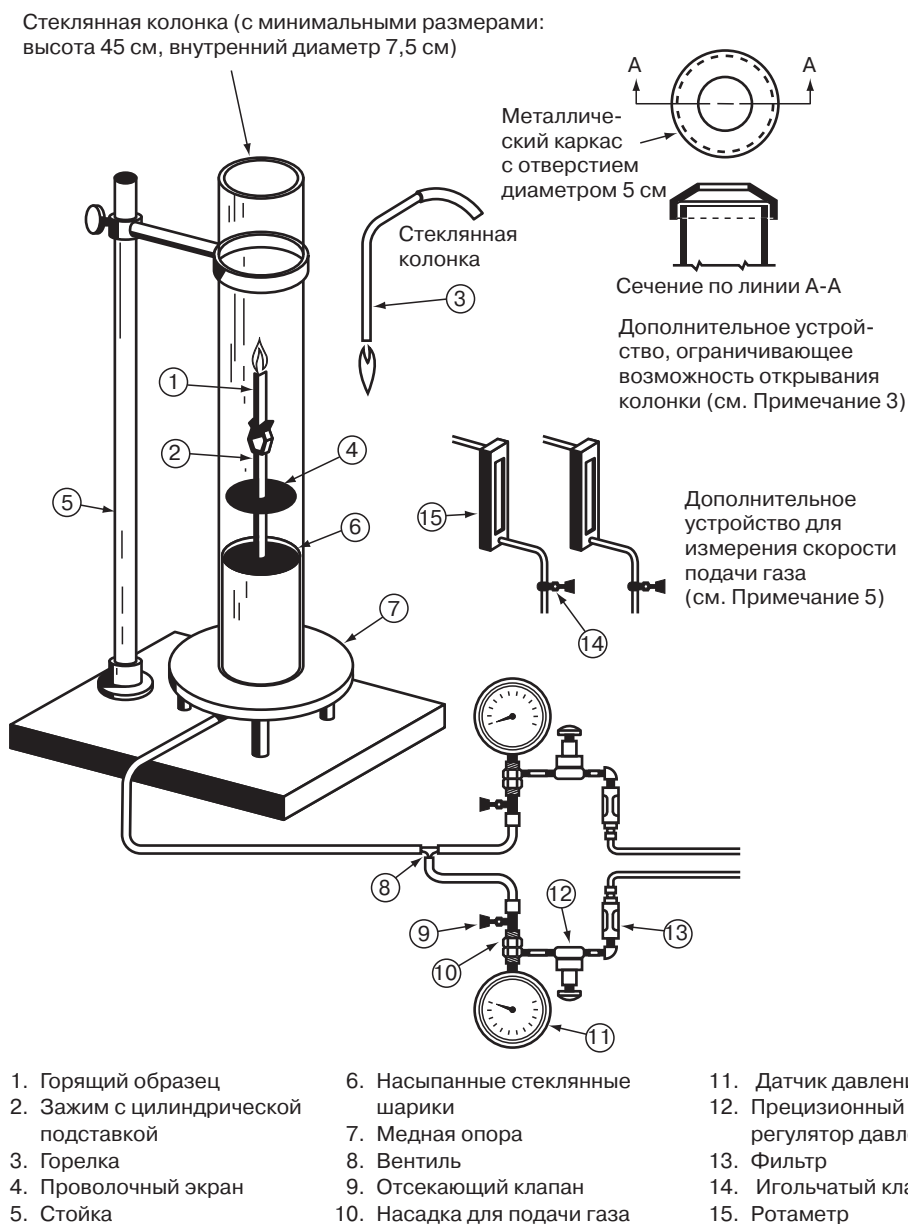


Рис. 8.8. Схема установки для определения кислородного индекса (воспроизведено с разрешения ASTM)

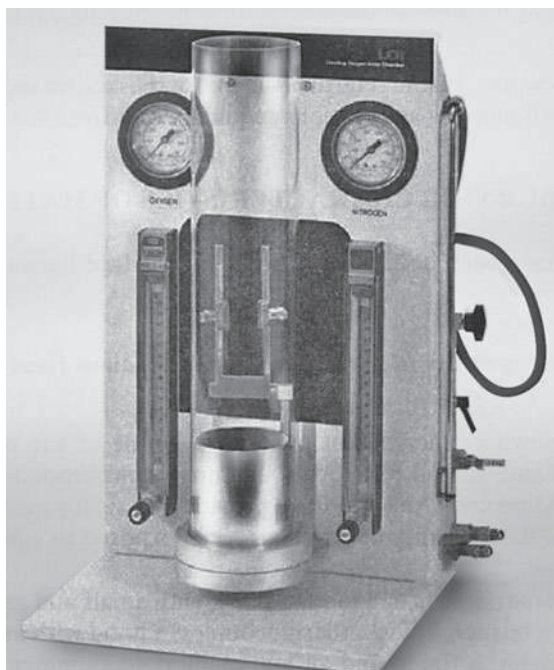


Рис. 8.9. Прибор для определения кислородного индекса

ку, в которой производятся испытания на возгораемость. Концентрация кислорода, поддерживающая горение, определяется в равновесных условиях, а источником огня является поджигающая свеча. Равновесие достигается при равенстве тепловых потоков – тепла, уносимого газовым потоком, и тепла, выделяющегося при горении. Равновесие достигается только тогда, когда гарантируются надежные условия поджигания, а концентрация кислорода в смеси близка к предельной, или критической [10].

Оборудование, используемое для определения кислородного индекса, состоит из стеклянной трубки, изготовленной из огнеупорного стекла, которая устанавливается на медном основании. На дне колонки помещаются стеклянные шарики. Проходя через них, газовый поток перемешивается и подается более равномерно. Специальный держатель, в котором закреплен испытуемый образец, позволяет установить его вертикально в центре колонки. Через трубочку с небольшим выходным отверстием подается пропан, водород или другой горючий газ. Трубочка вводится через открытый конец колонки, и газ поджигается, служа источником возгорания. В экспериментальную установку входят также таймер, устройство для измерения скорости подачи газа и контрольные приборы.

Схема установки для измерения кислородного индекса показана на рис. 8.8, а на рис. 8.9 показан внешний вид прибора для определения кислородного индекса.

Испытуемый образец должен быть сухим, поскольку наличие влаги влияет на кислородный индекс. В стандарте оговорены размеры и форма образцов четырех типов. Они представляют собой жесткие образцы пластмассы, способные поддерживать

свою форму, гибкую пластмассу, пенопласт и пленку (или тонкие листы). Размеры образцов каждого типа различны.

Образцы устанавливаются в зажиме вертикально в центре колонки. Для установления требуемой скорости подачи кислорода используют регулирующий клапан. Образец поджигается сверху с помощью горелки таким образом, чтобы обеспечить надежное возгорание. Характеристики горения определяются стандартными критериями, которые устанавливают время горения или длину сгоревшей части образца. Определяется концентрация кислорода, при которой выполняются эти критерии. Эксперимент повторяют, варьируя концентрацию кислорода до тех пор, пока не будет найдена минимальная концентрация, при которой выполняются упомянутые критерии горения.

Кислородный индекс рассчитывается по формуле

$$\text{Кислородный индекс (в \%)} = \frac{100 \times O_2}{O_2 + N_2},$$

где O_2 — объемный расход кислорода в точке возгорания; N_2 — объемный расход азота в той же точке.

8.6.3. Факторы, влияющие на результаты испытаний

1. *Толщина образца.* Кислородный индекс увеличивается по мере возрастания толщины образца.
2. *Наполнители.* Введение в полимер таких наполнителей, как стекло, способствует возрастанию кислородного индекса, но только до определенного предела наполнения. В случае поликарбоната кислородный индекс достигает максимального значения при содержании наполнителя порядка 25%. При дальнейшем увеличении содержания наполнителя кислородный индекс снижается.
3. *Пламягасители.* Введение в полимер специальных добавок, препятствующих горению, приводит к возрастанию кислородного индекса. Это обстоятельство важно для полимеров, которые предназначены для использования в условиях, требующих пониженной горючести материала.

8.7. Горючесть поверхности полимерных материалов

Для оценки горючести поверхности полимерных материалов используют два основных метода испытаний.

8.7.1. Горючесть поверхности пластмасс, определяемая с помощью источника излучения (ASTM E162)

Этот метод испытаний, известный под названием испытания на возгорание поверхности вследствие лучистого теплообмена, наиболее широко распространен при лабораторных исследованиях различных материалов. Хотя этот метод не рекомендован для ранжирования полимеров, используемых в строительстве, по их горючести, он,

тем не менее, может использоваться как основа для сопоставления возгораемости различных материалов, подвергаемых воздействию энергии лучистого тепла.

Установка для испытаний состоит из панели, излучающей тепло, к которой подается воздух или газ, держателя для установки образцов, горелки, стеллажа, термопар, колпака с выхлопной трубой, радиационного пирометра, таймера и автоматического потенциометра-самописца.

На рис. 8.10 представлена схема экспериментальной установки.

Для испытаний используются образцы размером 6×18 дюймов. Желательно, чтобы толщина образца не превышала 1 дюйм. Перед началом испытаний образец необходимо высушить в течение 24 ч при 140 °F, а затем кондиционировать до достижения равновесного содержания влаги при 73 °F и влажности окружающей среды 50%.

Образец крепится на специальной подставке так, чтобы он был наклонен под углом 30 град к вертикально установленной излучающей панели. Размер панели 12×18 дюймов. Температура ее поверхности должна поддерживаться на уровне 1238 °F. Небольшая горелка помещается у верхней части образца с тем, чтобы поджигать образующиеся горючие газы. После того как произойдет возгорание, пламя распространяется вниз по образцу. Определяется время, за которое пламя достигнет каждой из отметок на образце, расположенном на расстоянии 3 дюйма друг от друга. В отчете об испытаниях также отмечается образование капель.

Индекс распространения пламени определяется по скорости продвижения огня вниз по образцу. Кроме того, измеряется тепловой поток, возникающий при горении образца, для чего используется стеллаж с термопарами. Для расчета индекса используется формула

$$I_s = F_s \times Q,$$

где I_s — индекс распространения пламени; F_s — фактор, характеризующий распространение пламени по образцу; Q — фактор, представляющий собой оценку тепловыделений.

Оказалось, что воспроизводимость результатов испытаний термопластов по этому методу, выполненных в различных лабораториях, очень плохая.

Кроме описанного выше, стандарт *ASTM D3675* предлагает использовать схожий метод оценки воспламеняемости под действием лучистого тепла.

8.7.2. Определение характеристик воспламеняемости поверхности строительных материалов (*ASTM E84*)

Этот метод испытаний на воспламеняемость поверхности строительных материалов, известный под названием «E-84 туннельные испытания», применим к материалам, используемым в строительстве, всех типов, включая как материалы, которые обладают определенной жесткостью, так и материалы, нуждающиеся в установке на опоры. Эти материалы помещают в туннельную печь, причем толщина образцов должна примерно соответствовать толщине реальных изделий. Целью этих испытаний является установление сравнительной стойкости различных материалов к воспламеняемости, а также определение плотности выделяющегося при горении дыма.

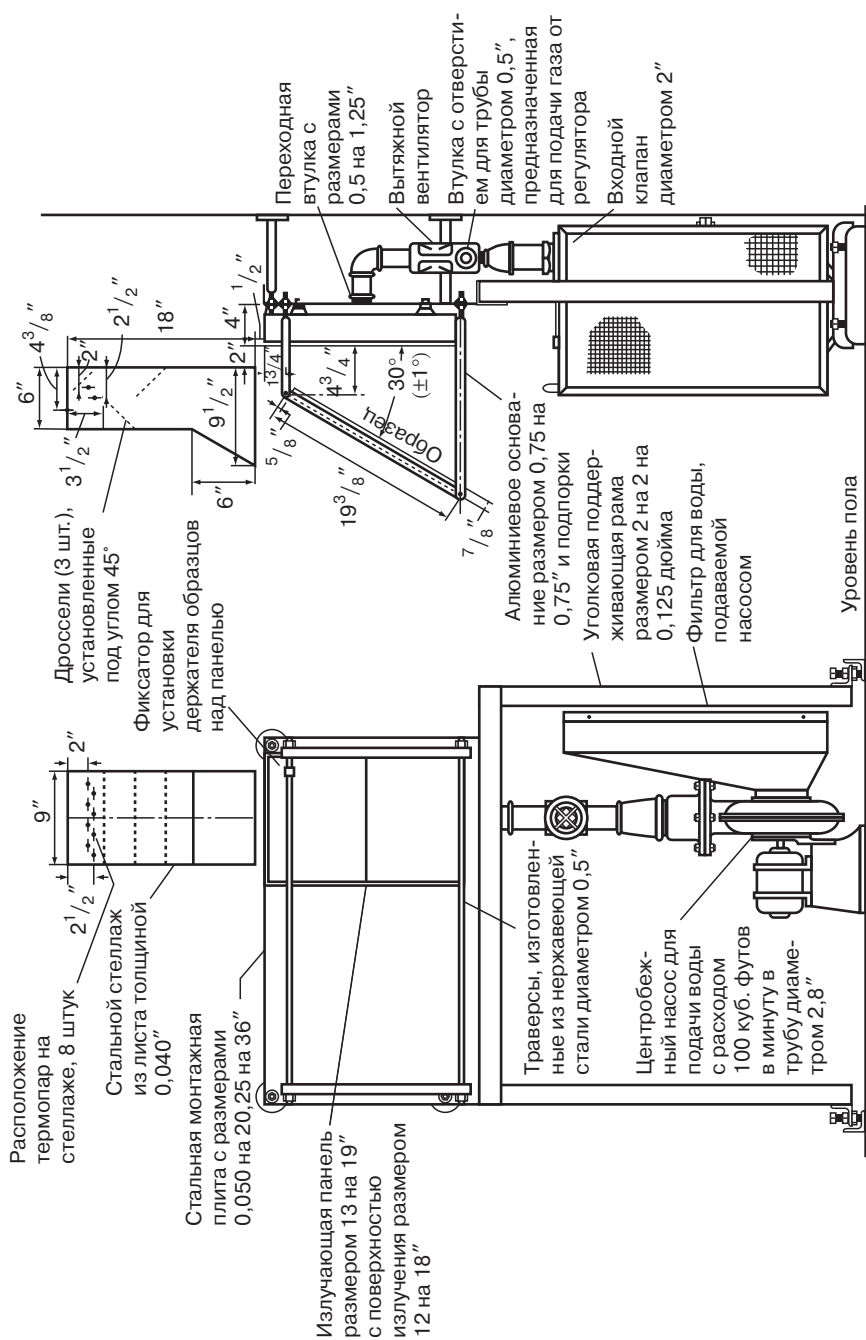


Рис. 8.10. Схема экспериментальной установки для исследования горючести поверхности (воспроизведено с разрешения ASTM)

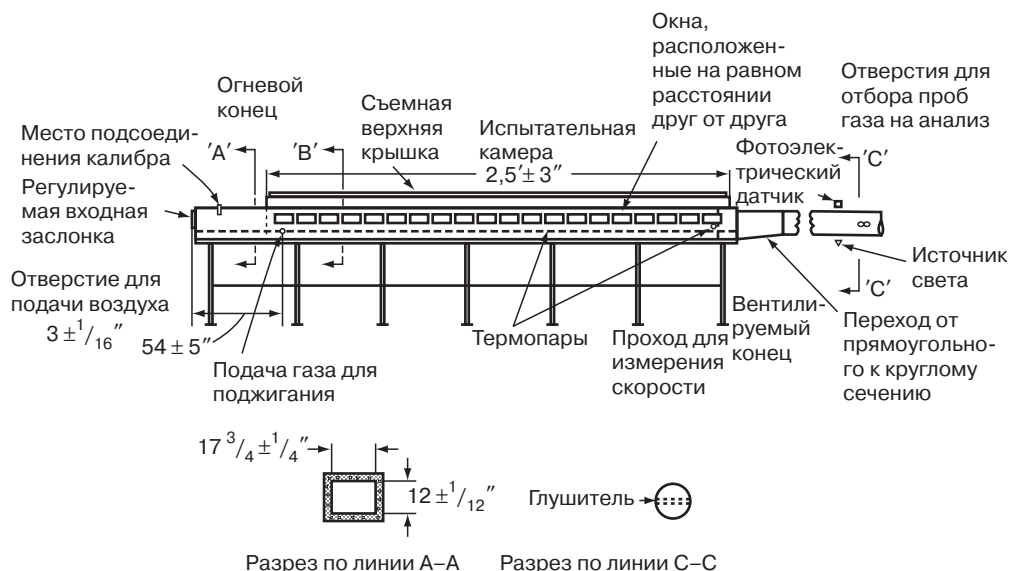


Рис. 8.11. Схема эксперимента, выполняемого по методу «туннельных испытаний» (воспроизведено с разрешения ASTM)

Испытания состоят в том, что образец шириной 2 дюйма и длиной 24 фута помещают в испытательную огневую камеру. Образец может быть как сплошным, так и состоящим из соединенных между собой секций.

На рис. 8.11 показано схематическое изображение типичной экспериментальной установки.

Одну сторону испытательной камеры называют огневым концом, поскольку здесь располагаются две газовые горелки, которые способны поджечь образец с тем, чтобы создать пламя, распространяющееся вдоль поверхности образца. Другую сторону камеры называют вентиляционной; она снабжена системой удаления газов.

Скорость распространения пламени измеряют, поджигая образец, находящийся в камере длиной 25 футов, с одного конца в течение 10 мин. Скорость распространения пламени по поверхности образца оценивают по шкале в пределах от 0 до 100 единиц. При этом за нуль принимают скорость распространения пламени по блоку армированного бетона, а за 100 — по поверхности красного дуба. Плотность образующегося при горении дыма измеряется с помощью фотоэлектрического датчика.

8.8. Горючесть пенопластов при вертикальном расположении образцов (ASTM D3014)

Этот метод относится к лабораторным мелкомасштабным испытаниям образцов, проводимым в целях скрининга полимерных пенопластов. Испытания позволяют определить время горения, площадь распространения пламени и потерю веса жестких

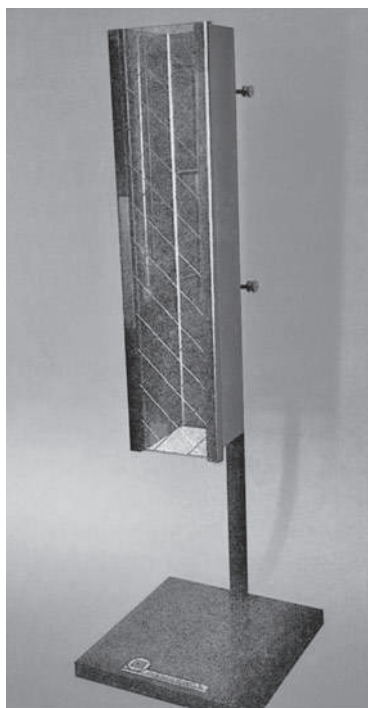


Рис. 8.12. Установка для оценки горючести жестких пенопластов

пенопластов, полученных на основе термореактивных смол. Эксперимент состоит в том, что образец устанавливается вертикально на опорных шпильках и помещается в вертикальную трубу со стеклянной передней поверхностью. Образец поджигается с помощью горелки Бунзена в течение 10 с. Определяются высота пламени, продолжительность горения и вес остатка после завершения процесса.

Установка для испытаний по описанной методика, предлагаемая на рынке, показана на рис. 8.12.

Этот метод обычно используют для сравнительных испытаний пенопластов, причем он не дает оснований для суждения о поведении этих материалов в реальных условиях эксплуатации.

8.9. Горючесть пенопластов при горизонтальном расположении образцов (ASTM D1692)

Этот метод относится к лабораторным мелкомасштабным испытаниям образцов в целях отбора полимерных пенопластов. Эксперимент состоит в оценке скорости горения и/или площади распространения пламени и длительности горения жестких пенопластов. Стандарт действовал до 1978 года и впоследствии не был возобновлен.

8.10. Сопротивление возгораемости трудногорючих пластмасс (Федеральный стандарт № 406, метод 203)

Этот метод изначально был разработан для оценки времени загорания, длительности горения и скорости распространения пламени для пластмасс, которые трудно поджечь. Прибор для реализации этого метода, называемый «Тестером для оценки возгораемости», показан на рис. 8.13.

Прибор состоит из закрытой емкости, в которую помещают нагревательную спираль, устройство для создания искры, держатель образцов и линейку для оценки скорости распространения пламени. Образцы устанавливают в держателе вертикально. Для создания искры используют два штекера. Электроды располагаются на расстоянии 0,125 дюйма от поверхности образца. Задача этого приспособления состоит в поджигании горючих газов, отходящих от образца при его предварительном подогреве. Электрическая схема обеспечивает непрерывное искрение между электродами в течение заданного времени. Наблюдение за процессами, развивающимися в испытательной камере, и защита наблюдателя обеспечивается использованием ударопрочного стекла.

Эксперимент начинается с установки образца размером 3×0,5×0,5 дюйма в держатель и подачи постоянного тока силой 55 А в нагревательную спираль. Одновременно

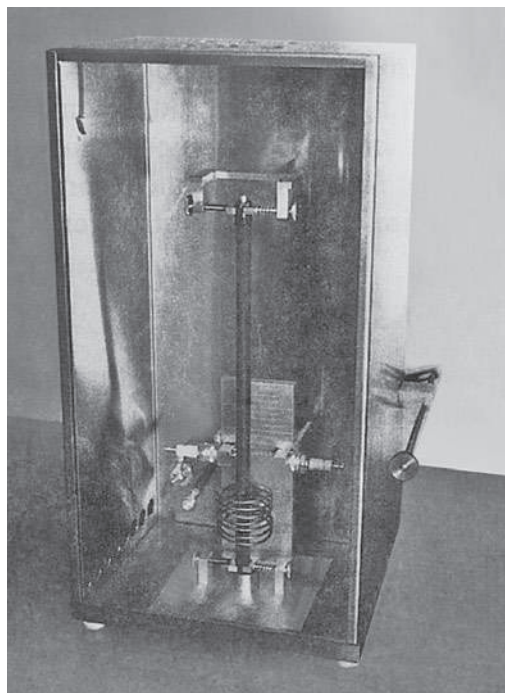


Рис. 8.13. Тестер для оценки возгораемости

приводится в действие устройство для создания искры и включается таймер. В момент начала возгорания таймер отключается и тем самым определяется время, необходимое для начала возгорания образца. За условие возгорания принимается момент, когда пламя от горящих газов перекидывается на поверхность образца, и он продолжает гореть. Нагревание прекращается через 30 с после начала горения. Если возгорание не происходит в течение 600 с, то эксперимент прерывается. При этом тут же прекращается подача тока на устройство для создания искры, и штекер убирается из области горения.

Максимальное расстояние, на которое пламя распространяется по поверхности образца, измеряется от верхнего края нагревательной спирали до прекращения горения. Продолжительность горения — это общее время, в течение которого образец продолжает гореть после того, как была выключена нагревательная спираль.

8.11. Испытания на дымообразование

Интерес к исследованию процесса дымообразования при горении и к созданию реалистичных методик оценки этого явления постоянно возрастает, и необходимость решения соответствующих задач становится весьма актуальной. Образование дыма при горении пластмасс оказывается важнейшей проблемой, поскольку задымление ограничивает видимость и препятствует эвакуации людей из опасной зоны пожара.

Предложен целый ряд мало- и крупномасштабных лабораторных методик оценки этого явления. Однако существуют серьезные опасения насчет того, насколько эти методики имеют практическое значение, полезны и надежны для оценки реальных ситуаций. Некоторые из предлагаемых методик требуют большого количества образцов, другие слишком сложны и испытания занимают много времени. Некоторые из них слишком дорогостоящие, другие приводят к ложным заключениям, а некоторые просто не коррелируют с реальной практикой. Ниже предпринята попытка вкратце рассмотреть существующие методы испытаний, используемое оборудование, преимущества и недостатки различных методов.

В приведенной выше табл. 8.3 перечислены методы испытаний на дымообразование.

8.11.1. Испытания на плотность дыма (ASTM D2843)

Согласно этому методу измеряются потери интенсивности света, проходящего через определенный объем, в котором собирается дым, образованный при определенных стандартизованных условиях. Для испытаний берется алюминиевая камера размером 12×12×31 дюйм, снабженная окном, изготовленным из огнеупорного стекла. Камера плотно закрывается за исключением четырех отверстий размером 1×9 дюймов, сделанных на дне камеры. Образец устанавливается в держателе в горизонтальном положении. Для измерений поглощения света используется фотоэлектрический датчик и источник света. Образец размером 1×1×0,25 дюйма устанавливается в держателе, и на него направляется пламя от горения пропан-воздушной смеси, расположенное так,

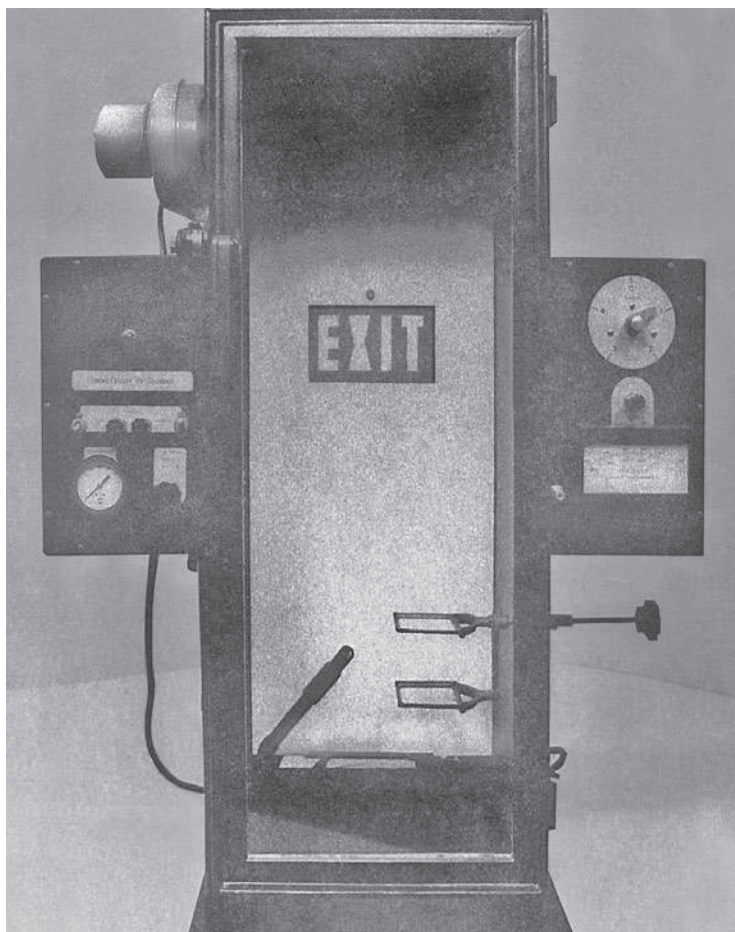


Рис. 8.14. Камера для измерения плотности дыма (с разрешения *Testing Machines, Inc.*)

чтобы пламя находилось непосредственно под образцом. Процент поглощенного света измеряется фотоэлектрическим датчиком через каждые 15 с; интервалы в течение 4 мин. Параллельно дается визуальная оценки плотности дымовой завесы по тому, насколько четко различается освещенная надпись «ВЫХОД».

Данные по поглощению света (процент поглощения) наносятся на график в зависимости от времени. Суммарная величина дымообразования находится по площади под этим графиком. Эта площадь характеризует скорость дымообразования. Максимальная плотность дыма отвечает пику на графике.

На рис. 8.14 показана представленная на рынке дымовая камера.

8.11.2. Испытания на горение поверхности (ASTM E84)

Этот метод испытаний был подробно обсужден в разделе 8.7.

8.11.3. Удельная оптическая плотность при образовании дыма (ASTM E662)

Согласно этому методу, измеряется удельная оптическая плотность дыма, образовавшегося при горении вертикально расположенного образца в дымовой камере. Для определения накопления дыма при выдержке образца в условиях горения и после его завершения по изменяющему светопропусканию используют фотометрическую систему измерений.

Для испытаний используют образец размером 3×3 дюйма, закрепляемый в специальном держателе, который устанавливается под определенным углом и так, чтобы была сохранена заданная площадь, подвергаемая воздействию облучения. Далее на образец направляется точно отрегулированный поток лучистой энергии от источника, но при этом горения не происходит. Для того чтобы образец загорелся, его подвергают воздействию многофорсуночной горелки с тщательно регулируемым соотношением подачи как горючего газа, так и воздуха.

Измерения ослабления светового потока вследствие появления дыма осуществляются с помощью источника света и фотодатчика. Вертикальное положение фотодетектора и источника света минимизируют различия при стратификации дыма, которая может возникнуть, если фотометр и источник света располагаются горизонтально на некоторой определенной высоте [11].

Данные, получаемые при измерении поглощения света, пересчитываются в удельную плотность дыма, который выделяется при горении до точки максимума.

Результаты испытаний в сильной степени зависят от небольших колебаний геометрической формы образца, его положения и ориентации, толщины образца и небольших различий в условиях кондиционирования.

Имеющийся на рынке прибор *NBS (NIST)*, основой которого является дымовая камера, показан на рис. 8.15.

8.11.4. Гравиметрический метод оценки частичек дыма, образующихся при горении пластмасс (ASTM D4100)

Этот метод разработан для гравиметрического анализа частичек дыма, которые образуются в результате горения или пиролиза полимерных материалов. Этот подход к оценке дымообразования противоположен определению оптической плотности в том смысле, что он основан на взвешивании частиц, образующих дым, а не на данных оптических измерений [12]. Этот метод был предложен для того, чтобы дать промышленности быстрый простой и воспроизводимый способ оценки количества дыма, образующегося при горении пластмасс.

Оборудование для измерений показано на рис. 8.16. Оно состоит из дымовой трубы, выходящей из камеры сгорания, системы фильтрации, установленная наверху трубы и соединенной с линией глубокого вакуума, микрогорелки Бунзена, укрепленной под углом 10 град по отношению к горизонтали и системы крепления образцов, расположенной горизонтально.

Испытания состоят в том, что образец подвергается воздействию пламени в течение 30 с. После этого горелка выключается и образец гаснет. Образовавшийся

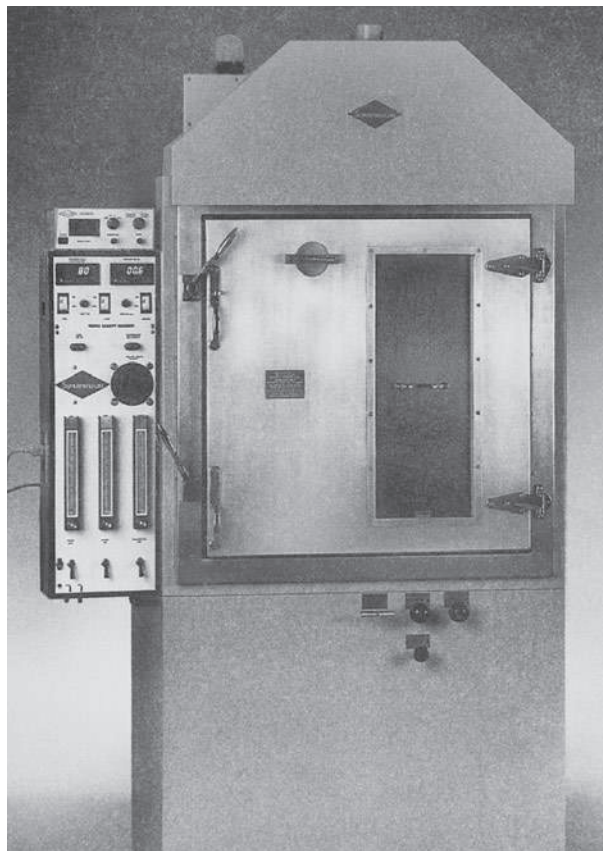


Рис. 8.15. Дымовая камера NBS (с разрешения Newport Scientific, Inc.)

дым вытягивается вакуумом через дымовую трубу, а твердые частички собираются фильтровальной бумагой. Вес частичек дыма измеряется взвешиванием этой бумаги. Результат измерений выражается в процентах от веса сгоревшего образца пластмассы.

Этот метод испытаний был отозван *ASTM*, и замена ему предложена не была.

8.11.5. Испытания излучающей панелью (*ASTM E163*)

Этот метод основан на использовании источника лучевой энергии в виде панели, нагретой до 1238 °F. В качестве источника излучения служит устанавливаемая вертикально пористая панель. Образец размером 6×18 дюймов устанавливается напротив этой панели. Образец поджигается сверху с помощью небольшой горелки так, чтобы пламя распространялось сверху вниз вдоль образца, на который попадает тепло, излучаемое нагретой панелью. Сверху трубы монтируется фильтровальная бумага, изготовленная из стеклянных волокон. Частички дыма собираются на поверхности этого фильтра, увлекаемые воздушным потоком, проходящим через фильтр. Фильтровальная бумага

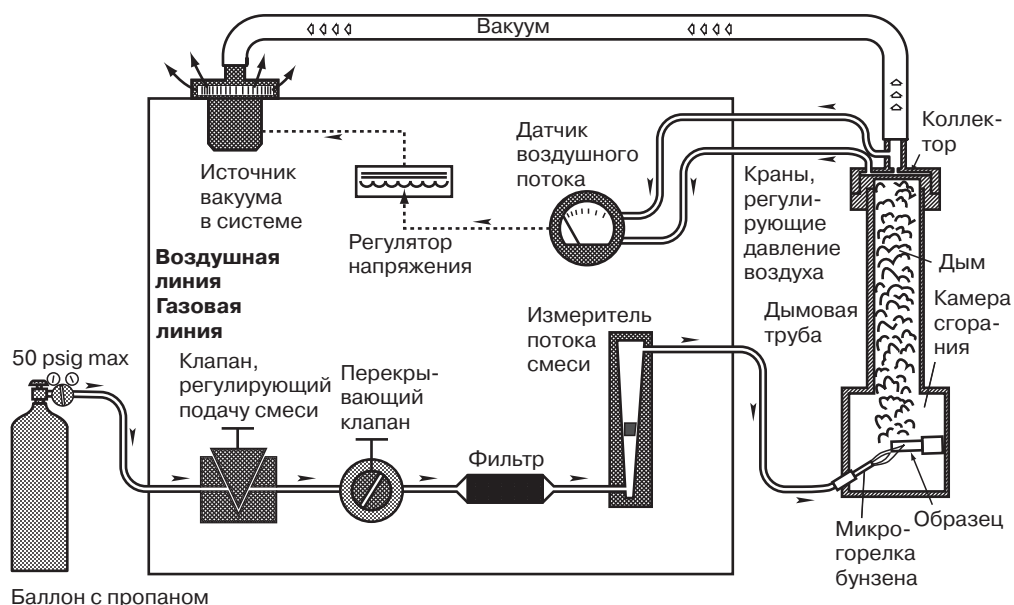


Рис. 8.16. Схема измерений дымообразования гравиметрическим методом

взвешивается до и после эксперимента, и разность представляет собой вес частишек дыма (в миллиграммах).

На рис. 8.17 показан прибор для таких испытаний, представленный на рынке.

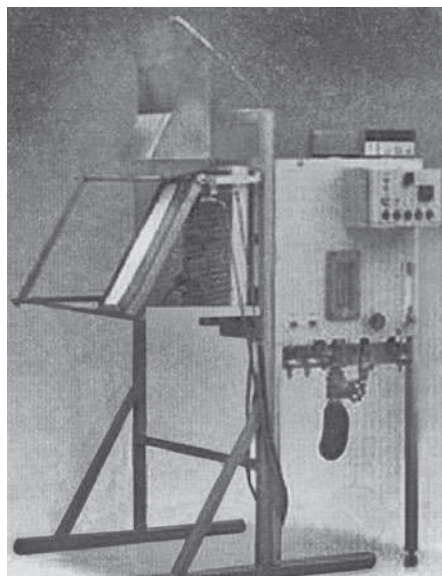


Рис. 8.17. Прибор для измерений веса частишек дыма при испытаниях с помощью излучающей панели

8.11.6. Испытания по методу Университета штата Огайо (OSU)

Этот метод испытаний предусматривает использование камеры размером 35×16×8 дюймов, на верху которой устанавливается секция в форме пирамиды, соединенная с выхлопной трубой. В камере имеется электрически разогреваемая излучающая панель, панель, нагреваемая горящими газами или электрически нагреваемые элементы. Предусмотрены различные возможности ориентации образца, который может монтироваться либо вертикально, либо горизонтально, что моделирует нагревание либо стены, либо пола [13]. Фотодатчик и источник света, используемые для измерения поглощения света, установлены над выхлопной трубой.

8.12. Испытания на горючесть по методу UL 94

Метод *UL 94*, разработанный *Underwriters Laboratories*, представляет собой один из наиболее часто используемых и обычно цитируемый набор методик испытаний полимерных материалов на возгораемость. Этот метод распространяется на испытания пластмасс, используемых в различных приспособлениях и приборах. Получаемые при испытаниях результаты служат в качестве предварительной оценки материала с точки зрения его стойкости к возгоранию при конкретных условиях применения. Метод *UL 94* включает в себя стандартные испытания горизонтально или вертикально расположенных образцов, которые позволяют сопоставить горючесть различных материалов.

UL 94 состоит из пяти базовых методик для классификации материалов по различным категориям пожарной опасности. К их числу относятся:

- испытания горизонтально расположенных образцов на горючесть для определения их класса — система *HB*;
- испытания вертикально расположенных образцов на горючесть для определения классов *V-0*, *V-1* и *V-2*;
- испытания вертикально расположенных образцов для определения классов *5-V*, *A* или *B*;
- испытания вертикально расположенных образцов;
- для определения классов *VTM-0*, *VTM-1* или *VTM-2*;
- испытания горизонтально расположенных образцов из пенопластов для определения классов *HBF-1* или *-2*.

8.12.1. Метод испытания горизонтально расположенных образцов для их классификации (*HB*)

Горизонтально установленные образцы имеют толщину от 0,120 до 0,500 дюйма. Материалы отвечают классу *HB*, если они горят со скоростью не выше 3 дюйма в минуту при толщине 0,120 дюйма или вообще не загораются, пока пламя не достигнет отметки в 4 дюйма.

Прибор, используемый для проведения этих испытаний, состоит из закрытой испытательной камеры, проволоочной линейки, источника метана технического класса,

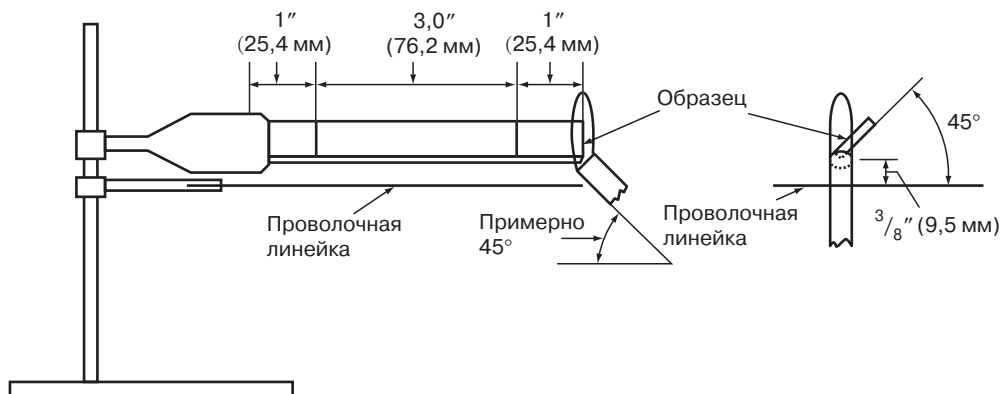


Рис. 8.18. Испытания образцов для установления класса горючести материала *HB* (воспроизведено с разрешения *Underwriters laboratories*)

фланца и часов. Испытания проводят в помещении с контролируемой температурой и влажностью. Обычно размер образцов составляет 0,5×5 дюймов; края образца должны быть гладкими. Прежде чем начать испытания, на образец наносят две отметки по ширине на расстоянии 1,0 и 4,0 дюйма от одного конца. Образец устанавливают на фланце на расстоянии 3 дюйма от стойки (рис. 8.18).

Горелка регулируется так, чтобы язычок пламени был голубого цвета, и его высота составляла 1 дюйм. Пламя подносится таким образом, чтобы оно опаляло образец с лицевой стороны на глубину 0,25 дюйма. Пламя должно быть неподвижным по отношению к образцу. Контакт образца с пламенем продолжается в течение 30 с, после чего горелка убирается. Если образец догорает до отметки 1 дюйм до истечения этих 30 с, горелка убирается. Если образец продолжает гореть после устранения пламени, то измеряется время распространения пламени до отметки 4,0 дюйма со свободной стороны образца и рассчитывается скорость горения.

8.12.2. Испытания вертикально расположенных образцов на горючесть для определения классов V-0, V-1 и V-2

Согласно этой методике испытаний, образцы закрепляются вертикально. Класс V-2 соответствуют наименьшему, а класс V-0 — наибольшему сопротивлению возгорания.

В табл. 8.5 собраны показатели, отвечающие этим классам горючести.

Установка для испытания на возгорание образцов, устанавливаемых в вертикальном положении, практически такая же, как и используемая для испытаний горизонтальных образцов, кроме добавления сушилки, камеры для кондиционирования образцов и кучки сухого хирургического хлопка. Испытания проводят с образцами размером 0,5×5 дюймов. Небольшой язычок пламени голубого цвета длиной 0,75 дюйма подносят к нижнему концу образца. Контакт продолжается 10 с, после чего горелку убирают. Затем повторяют поджигание еще в течение 10 с. Измеряют длительность горения и свечения после того, как горение прекратится. Кучка хлопка помещается под образцом с целью установить, смогут ли капли, падающие с горящего образца, поджечь хлопок за период испытаний или нет.

Таблица 8.5. Сводка показателей, отвечающих классификации по типам V-0, V-1 и V-2.

Критерий	Классификация		
	V-2	V-1	V-0
Количество испытываемых образцов	5	5	5
Число повторных поджиганий	2	2	2
Минимальное время горения для одного образца и одного поджигания, с	30	30	10
Общее время горения для 5 образцов и двукратного поджигания, с	250	250	50
Загорается ли хлопок от падающих капель	Да	Нет	Нет
Максимальное время горения для одного образца, с	60	60	30
Продолжается ли горение до зажима	Нет	Нет	Нет

Источник: *Plastics Compounding*, May/June 1978.

8.12.3. Испытания вертикально расположенных образцов на горючесть для определения класса 5V

Любой материал для того чтобы отвечать этой весьма жесткой классификации, должен не загореться и не светиться при нагревании в течение, по крайней мере, 60 с после пятикратного поджигания. Кроме того, должно отсутствовать падение горящих капель.

Аппаратура для проведения испытаний состоит из камеры, лабораторной горелки, регулируемого фланца для установки образцов в вертикальном положении, источника газа, монтажного блока, который позволяет изменять направление огня горелки на угол до 20 град от вертикального положения, таймера, сушилки, кучки сухого хирургического хлопка и камеры для кондиционирования образцов. Используют образцы двух типоразмеров: стержни размером 0,5 на 5 дюймов в длину и пластины размером 6×6 дюймов.

Процедура 1 испытания стержней состоит в том, что образец закрепляют во фланце в вертикальном положении, и затем к образцу придвигают горелку, которая устанавливается в монтажном блоке под углом 20 град к вертикали.

Схема испытаний показана на рис. 8.19.

Горелка зажигается на некотором расстоянии от образца и регулируется таким образом, чтобы полная высота язычка пламени составляла 5 дюймов, а длина части пламени голубого цвета была равна 1,5 дюйма. Пламя подносится к одному концу образца под углом 20 град к вертикали так, чтобы верхушка конуса этой части пламени касалась образца. Процесс поджигания длится 5 с, после чего пламя убирается на 5 с, затем эта операция повторяется четыре раза. Фиксируются такие параметры, как продолжительность горения и свечения, расстояние, на котором горит образец, каплепадение, деформация образца.

Процедура 2, в которой испытывается образец в форме пластины, аналогична процедуре 1. Единственное различие состоит в выборе положения образца. Предлагается использовать одну из следующих пяти позиций:

- 1) пластина располагается вертикально, а пламя подносится к нижнему углу образца;

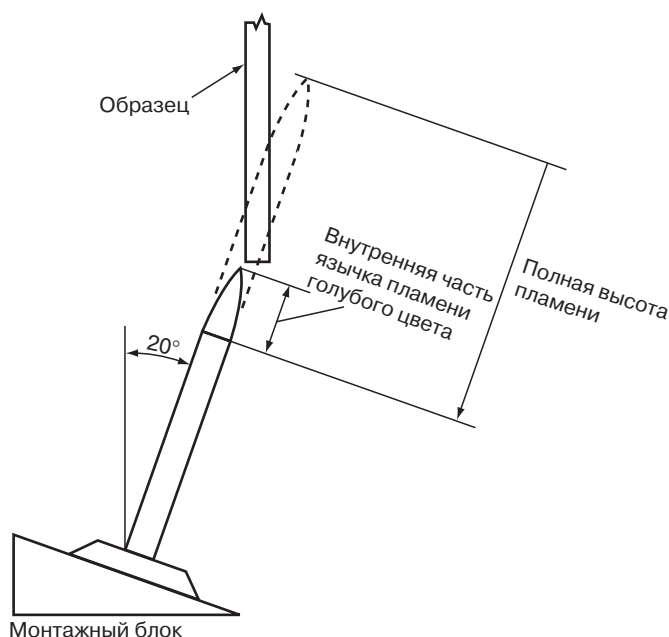


Рис. 8.19. Схема испытаний вертикально расположенных образцов на горючесть для определения класса 5V (воспроизведено с разрешения *Underwriters Laboratories*)

- 2) пластина располагается вертикально, а пламя подносится к нижнему краю образца;
- 3) пластина располагается вертикально, а пламя подносится к центру одной из сторон образца;
- 4) пластина располагается горизонтально, а пламя подносится к центру нижней поверхности образца;
- 5) пластина располагается горизонтально, а пламя подносится сверху к середине верхней поверхности образца.

Эти испытания также могут проводиться с реальными изделиями, полученными литьем под давлением. В этом случае пламя подносится к наиболее уязвимой поверхности изделия [14].

8.12.4. Испытания вертикально расположенных образцов для определения классов VTM-0, VTM-1 или VTM-2

Этот метод испытаний предложен для определения возгораемости очень тонких образцов, которые могут деформироваться, усаживаться или сгорать вплоть до места крепления в зажиме, если для оценки их горючести использовать вышеописанные методики. Такие материалы могут обладать определенными физическими свойствами, которые позволят образцам длиной 8 дюймов и шириной 2 дюйма сворачиваться в продольном направлении вокруг сердечника диаметром 0,5 дюйма. Требования,

Таблица 8.6. Сводка показателей, отвечающих классификации по типам *VTM-0*, *VTM-1* или *VTM-2*

Критерий	Классификация		
	<i>VTM-0</i>	<i>VTM-1</i>	<i>VTM-2</i>
Количество испытываемых образцов	5	5	5
Число повторных поджиганий	2	2	2
Минимальное время горения для одного образца и одного поджигания, с	10	30	30
Общее время горения для 5 образцов и двукратного поджигания, с	50	250	250
Загорается ли хлопок от падающих капель	Нет	Нет	Да
Максимальное время горения для одного образца, с	30	60	60
Продолжается ли горение до зажима	Нет	Нет	Нет

Источник: *Plastics Compounding*, May/June 1978.

которым должен отвечать материал, принадлежащий к одному из трех классов, приведены в табл. 8.6.

Образцы установленных размеров вырезают из листовой заготовки и кондиционируют до начала испытаний. По ширине образца делается метка на расстоянии 5 дюймов. Образец обертывают вокруг сердечника диаметром 0,5 дюйма. Испытания состоят в том, что к образцу подносят язычок пламени голубого цвета длиной 0,75 дюйма и поджигают полимер в течение 3 с и затем убирают пламя до тех пор, пока не прекратилось горение. Далее цикл немедленно повторяется. Результатом испытаний являются такие показатели, как продолжительность горения после второго поджигания, сгорел ли образец до отметки в 5 дюймов, наблюдается ли падение горящих капель, которые могут поджечь кучку хлопка.

8.12.5. Испытания горизонтально расположенных образцов из пенопластов для определения классов *HBF-1* или *-2*

Этот метод совершенно аналогичен методике испытаний горизонтально расположенных образцов, который используется для классификации обычных материалов по типу *HB*, как это описано в разделе 8.12.1.

8.12.6. Факторы, влияющие на результаты испытаний по методу испытаний на воспламеняемость по *UL 94*

Обычно полагают, что испытания по методу *UL 94* дают очень субъективные результаты. Даже если используются идентичные образцы, испытанные различными операторами на одинаковом оборудовании, сравнительная оценка горючести различных материалов может оказаться разной. Такое различие связывают с разницей в оценке критической точки, различиями техники наблюдений и особенностями операторов.

Критическую роль играет также способ поджигания образцов. Если не принять особых мер предосторожности, то возможен и перегрев и недогрев образцов, неоднородность их нагревания, что в итоге дает несовпадающие результаты. Другие факторы, влияющие на получаемые данные, — это особенности технологии литья образцов,

различия в процедуре калибровки, специфика примененного оборудования, особенности используемых горелок и влияние окружающей среды [15].

8.13. Требования к пожарной безопасности

Сегодня в век требований всевозможных стандартов и регулирующих документов, невозможно представить себе инженера-конструктора, который мог бы пренебречь или не обратить внимания на требования правительственных учреждений, частных организаций, занимающихся защитой прав потребителей, а также условиями пожарной безопасности. Сегодня, вне зависимости от того, что именно проектируется — корпус телевизионного приемника, коробка для установки аппаратуры, мебель, детали бизнес-машин, или строительные детали — совершенно невероятно, чтобы используемые для этих целей полимерные материалы не были испытаны в отношении их возгораемости и противопожарных характеристик. Просто удовлетворить требованиям горючести еще недостаточно, необходимо помнить о дымообразовании и выделении токсичных газов, которые также влияют на общую картину пожарной безопасности.

В табл. 8.7 приведены взаимно согласующиеся требования различных стандартов, используемых в промышленности, которые устанавливают методы оценки пожарной безопасности полимерных материалов.

8.13.1. Агентства, устанавливающие требования по возгораемости

А. Правительственные агентства

Национальное бюро стандартов (*National Bureau of Standards, NBS*). Эта организация разрабатывает и выпускает большое количество стандартов и требований к испытательному оборудованию. Метод *NBS* оценки дымообразования является одним из наиболее часто используемых методов определения плотности дыма.

Таблица 8.7. Взаимно согласующие требования стандартов

<i>ASTM</i>	<i>FM</i>	<i>IEC</i>	<i>ISO</i>	<i>NFPA</i>	<i>UBC</i>	<i>UL</i>
<i>D 635</i>	—	707	1,210	—	—	94
<i>D 1929</i>	—	—	871	—	—	—
<i>D 2863</i>	—	—	4,589	—	—	—
<i>D 3801</i>	—	707	1,210	—	—	94
<i>D 4804</i>	—	—	9,773	—	—	94
<i>D 4986</i>	—	—	—	—	—	94
<i>D 5048</i>	—	707	10,351	—	—	94
<i>E 84</i>	—	—	—	255	—	723
<i>E 108</i>	—	—	—	256	—	790
<i>E 119</i>	—	—	—	251	—	263
<i>E 603</i>	—	—	—	—	17-5	1,715
	4,880	—	—	—	—	1,040
	4,450	—	—	—	—	1,258

Департамент домостроительства и городского хозяйства (*The department of housing and Urban Development, HUD*). Это агентство выпускает стандарты на изделия, используемые в строительстве и промышленности стройматериалов.

Комиссия по безопасности потребляемых товаров (*Consumer Product safety Commission*). Эта организация выпускает стандарты, являющиеся как добровольными, так и обязательными для исполнения в областях, относящихся к безопасности товаров массового потребления.

Департамент транспорта (*Department of transportation, DOT*). Стандарты, выпускаемые этой организацией, относятся, главным образом, к требованиям безопасности людей на транспорте. Были предложены многочисленные стандарты, устанавливающие методы испытаний для моделирования пожарной безопасности интерьеров.

Федеральная авиационная администрация (*Federal Aviation Administration, FAA*). В компетенцию этой организации входит разработка стандартов и спецификаций, касающихся оценки горючести материалов, которые используются для отделки интерьеров воздушных судов.

Б. Промышленные ассоциации

Общество инженеров, работающих в промышленности пластмасс (*Society of Plastics Industry, SPI*). Эта ассоциация представляет промышленность пластмасс. Она активно участвует в разработке реалистичных методов испытаний на горючесть и соответствующих стандартов. Ассоциация работает в тесном контакте со многими промышленными и частными организациями, занимающимися разработкой новых стандартов.

Общество инженеров, работающих в автомобильной промышленности (*Society of Automotive Engineers, SAE*), Институт домостроения (*Manufactured Housing Institute*), Ассоциация производителей химической продукции (*Manufacturing Chemical Association*). Все эти организации активно участвуют в создании новых стандартов по оценке возгораемости.

В. Частные организации

Гарантийные лаборатории¹ (*Underwriters laboratories, UL*). «Лаборатории, гарантирующие качество, являются независимыми некоммерческими организациями, представляющими собой третью сторону в проведении испытаний и сертификации организаций, изделий, приборов и устройств, а также в создании стандартов в интересах общественной безопасности».

Американское общество испытаний и материалов (*American Society for testing and Materials, ASTM*). Эта организация представляет собой научное и техническое объединение, первичной задачей которого является разработка стандартов на характеристики и свойства материалов, продуктов, изделий и устройств, а также на системы обслуживания. Эта организация разработала многочисленные стандарты, касающиеся оценки горючести пластмасс.

¹ В тексте перевода настоящей книги название *Underwriters laboratories* дается в оригинальном варианте без перевода, хотя формально точным переводом было бы «Гарантийная лаборатория». — *Примеч. науч. ред.*

Г. Организации, занимающиеся обеспечением безопасности

Существуют различные довольно многочисленные организации, которые занимаются обеспечением безопасности. Так, *FM Global* в последнее время начинает участвовать в работах по обеспечению пожарной безопасности полимерных материалов. Ряд реалистичных методов оценки горючести были предложены *FM Global Research*.

Д. Другие агентства

К их числу относятся национальная ассоциация защиты от пожаров (*National Fire Protection Association, NFPA*), Южная ассоциация производителей мебели (*Southern Furniture Manufactures Association*), Администрация по строительству офисных зданий (*Building Official and Code Administration, BOCA*), Национальная ассоциация производителей электрооборудования (*National Electric Manufacturers Association, NEMA*) и Южный Конгресс, объединяющий строителей (*Southern building Code Congress, SBCC*).

8.13.2 Меры, которые необходимо предпринять для обеспечения требований к пожарной безопасности

1. Первым шагом в обеспечении пожарной безопасности является детальное выяснение условий применения интересующего Вас изделия. Это позволит сузить список требований, которые должны предъявляться в конкретном случае.
2. Выбрать агентство, которое ответственно за данную область применения изделий. Например, если предполагается применение конкретного изделия в строительстве, то необходимо обратиться к одной из строительных или конструкторской организаций. Если ставится задача получения коробов и корпусов для установки электрического оборудования, то следует вступить в контакты с *UL*. Важным источником информации является также Общество инженеров, работающих в промышленности пластмасс (*Society of Plastics Industry, SPI*).
3. После того как определена область применения и установлено Агентство, ответственное за пожарную безопасность в этой области, можно приступить к конструированию изделия и подбору материала. Важным моментом здесь является выбор материала применительно к вашим задачам, а не наоборот. Выбор материала должен основываться на многочисленных опубликованных данных, например на издаваемом *UL* Указателе по свойствам полимерных материалов (*UL Plastics Recognized Component Directory*), в котором приведен обширный список полимерных материалов и их производителей, а также дана классификация материалов по принятым в США стандартам. Другим источником информации для предварительного скрининга материалов являются таблицы воспламеняемости, приводимые в «Современной энциклопедии полимеров» (*Modern Plastics Encyclopedia*).
4. После того как вами сделан предварительный выбор материала, который удовлетворяет предъявляемым требованиям по пожарной безопасности, необходимо обратиться за консультацией по подбору конкретной марки материала к производителю или организации, занимающейся компаундированием сырья.

5. Если для вашего конкретного применения необходимо проведение дополнительных испытаний, то следует проконсультироваться с независимой лабораторией.

Литература

1. Nelson G.L. «Flame Tests for Structural Foam Parts» *Plast. Tech.* (Nov. 1977), p. 88.
2. *Ibid.*, p. 89.
3. Nelson G.L. «Fire and Polymers» *Chemistry* 51 (June 1978), p. 23.
4. *Ibid.*, p. 26.
5. Hill B.J. «How Predictive Are Small-Scale Flame Tests?» *SPE ANTEC* 24 (1978), p. 587.
6. Fang J.B., NBS Technical Note 879, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, D.C, June 1976.
7. Hilado C.J. and Murphy R.M. «Screening Materials for Ignitability» *Mod. Plast.* (Oct. 1978), p. 52.
8. *Ibid.*, p. 52.
9. Goldblum K.B. «Oxygen Index: Key to Precise Flammability Rating» *S.P.E.J.*, 25(2) (Feb. 1969), p. 50.
10. *Ibid.*, p. 51.
11. Hilado C.J., Cumming H.J. and Machdo A.M. «Screening Materials for Smoke Evolution, *Mod. Plast.* (July 1978), p. 62.
12. Kracklauer J., Sparkes C. and Legg R. «New Smoke Test—Fast, Simple, Repeat-able» *Plast. Tech.* (Mar. 1976), p. 46–49.
13. Hilado C.J., Reference 7, p. 62.
14. Nelson G.L., Reference 3, p. 89.
15. Howard J.M. «Factors Affecting UL 94 Flammability Testing» *SPE ANTEC*, 25 (1979), p 942.

Рекомендуемые источники

1. Hilado C.J. *Flammability Test Methods Handbook*, Technomic, West Port, 1973.
2. Hilado C.J. *Flammability Handbook for Plastics*, Technomic, West Port, 1969.
3. Zabetakis J.M. «Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors» *U.S. Bureau of Mines Bull.*, 627 (1965).
4. Bradley J.N. *Flame and Combustion Phenomena*, Methuen and Co., London, England, 1969.
5. Lyons J.W. *The Chemistry and Uses of Fire Retardants*, John Wiley, New York, 1970.
6. Hilado C.J. *Fire and Flammability Series*, Technomic, West Port, 1973. Vol. 1. «Flammability of Cellulosic Materials»; Vol. 2. «Smoke and Products of Combustion»; Vol. 3. «Flammability of Consumer Products»; Vol. 4. «Oxygen Index of Materials»; Vol. 5. «Surface Flame Spread»; Vol. 6 «Flame Retardants».
7. Troirzsch J. *Plastics Flammability Handbook*, Hanser Gardner, Cincinnati, 1990.

9. Химические свойства

9.1. Введение

Соппротивление полимера химическому воздействию представляет собой комплексное понятие. Результаты соответствующих испытаний часто трактуются инженерами и дизайнерами неверно. Поэтому выбор материала делается без правильного понимания того, как на самом деле были получены экспериментальные результаты и каковы ограничения при их применении. Высокопрочные и жесткие пластмассы, такие как поликарбонат, имеют ограниченное применение именно из-за их низкого сопротивления химическим воздействиям. Напротив, полипропилен обладает невысокими механическими свойствами, но стоек к воздействию большинства химических соединений и растворителей. Понимание особенностей сопротивления полимеров химическому воздействию лучше всего достигается исходя из особенностей строения полимера. Наиболее важными факторами, влияющими на химическую стойкость полимерных материалов, являются тип связей в полимерной цепочке, кристалличность, разветвленность, расстояние между связями и величина энергии, необходимой для разрыва связей [1].

В качестве примера можно привести политетрафторэтилен. Высокая степень кристалличности, отсутствие боковых ответвлений, наличие сильных ковалентных связей между атомами углерода и фтора делает этот материал очень стойким к воздействию практически всех химических соединений и растворителей. Аналогичным образом (в случае полиамидов (найлонов) наличие регулярной симметричной химической структуры) гибкость макромолекул и высокая степень кристалличности в присутствии сильных внутримолекулярных связей приводит к тому, что эти полимеры оказываются жесткими, высокопрочными и стойкими к воздействию различных химических соединений [2]. Поликарбонат легко поддается химическому воздействию из-за его невысокой полярности и отсутствия сильного внутримолекулярного взаимодействия [3]. Сравнительно невысокая гибкость молекулярной цепи и низкое молекулярное взаимодействие приводят к тому, что полистирол, являясь довольно жестким материалом, плохо противостоит воздействию на его поверхность поверхностно-активных веществ и растворителей [4].

Еще одним важным аспектом, который следует принимать во внимание при обсуждении химической стойкости полимерных материалов, является присутствие в их составе различных добавок, таких как пластификаторы, наполнители, стабилизаторы и красители.

Существуют четыре основных метода оценки химического сопротивления пластмасс:

- испытания путем погружения в жидкость;
- сопротивление образованию пятен;
- сопротивление образованию трещин в растворителе;
- сопротивление образованию трещин под действием окружающей среды.

Выбор полимерных материалов для тех или иных конкретных применений не может основываться только на основе опубликованных справочных данных по химическому сопротивлению материала. Необходимо учесть тип выполненных испытаний, температуру, при которой проводились испытания, концентрацию активного элемента в среде, длительность экспозиции, характер деформированного состояния, наличие добавок. Любой из этих факторов может оказать существенное влияние на химическое сопротивление материала. Риск неожиданного разрушения изделия может быть минимизирован только в том случае, если испытания проводились в условиях, близких в реальной ситуации, в которой используется данное изделие [5].

9.2. Испытания методом погружения (ASTM D543, ИСО 155)

Метод измерения сопротивления полимера путем погружения образцов в химический реагент — это стандартная процедура испытаний, используемая в химической промышленности. Этот метод может быть использован только для сравнительной оценки химического сопротивления различных материалов в ряде типичных реагентов. Результаты, получаемые этим методом, не дают прямой оценки возможности применения данного материала для того или иного изделия, используемого в контакте с различными химическими средами. Необходимо иметь в виду такие ограничения используемых результатов испытаний, как продолжительность воздействия среды, температуру, концентрацию реагента в среде. Если предполагается применение в условиях, когда изделие непрерывно взаимодействует с жидкостью, то результаты кратковременных испытаний могут использоваться только для отсеивания наименее подходящих материалов.

Оборудование для испытаний состоит из прецизионных химических весов, микрометра, контейнера для иммерсионной среды, термостата для задания и поддержания необходимой температуры и приборов для измерений физических свойств. Размеры и тип испытываемого образца определяются формой материала, который предназначен для испытаний. При испытаниях в каждом реагенте требуются, по крайней мере, три образца. Для каждого образца измеряются изменения размеров и веса. Образец помещается в контейнер на семь суток в стандартной лабораторной атмосфере, причем он не должен касаться дна или стенок контейнера. После семидневной выдержки в жидкости образец вынимается из контейнера и взвешивается. Также измеряются его размеры. Этот же порядок испытаний сохраняется и в том случае, если проводятся измерения изменений механических свойств после пребывания в реагенте. Механические свойства исходных образцов и образцов после испытаний погружением в

среду измеряются по стандартной процедуре, которая описана в соответствующей спецификации. К результатам испытаний относятся также наблюдения потери отражательной способности поверхности, набухание, образование мути, появление крейзов и пузырей.

9.3. Сопротивление образованию пятен

В течение последних 20 лет полимерные материалы глубоко проникли в различные области применения и повседневно находятся в контакте с самыми различными химическими соединениями. Поэтому очень важно оценить, не оставляют ли эти соединения пятен на изделии, что особенно существенно в условиях домашнего применения. Методы испытаний, предложенные для оценки возможности образования пятен, относятся к случайному контакту с различными пачкающими агентами. Оценка влияния длительного контакта должна проводиться по другим методикам. Некоторые типы добавок могут оказывать существенное влияние на эффект образования пятен.

Для проведения испытаний необходимо иметь камеру, аппликатор, замкнутый контейнер для хранения маловязкой жидкости. Для испытаний используют разнообразные загрязняющие реагенты. К числу наиболее популярных относятся: пищевые продукты, предметы косметики, растворители, моющие вещества, фармацевтические изделия, прохладительные напитки, чистящие средства, желе, чай, кровь, кофе, отбеливающие вещества, крем для обуви, цветные мелки, губная помада, лак для удаления краски с ногтей и многие другие.

Для проведения испытаний могут использоваться любые образцы, лишь бы они имели достаточно большую гладкую ровную поверхность, чтобы можно было провести испытания и визуально наблюдать за его результатами.

Перед началом испытаний любых декоративных ламинатов с термореактивным связующим рекомендуется, чтобы они были протерты шероховатой влажной тряпкой или пемзой с тем, чтобы поверхность не была блестящей. Затем поверхность необходимо промыть мягким мылом. Испытуемый реагент наносится на образец с помощью аппликатора, при этом образуется тонкое покрытие. Если испытывается маловязкая жидкость, то образец следует погрузить в стеклянный контейнер, в который налита эта жидкость. Затем контейнер плотно закрывается, и образец выдерживается в жидкости в течение 16 ч при температуре 50 ± 2 °C.

После завершения опыта избыточные количества химического реагента удаляются с образца, и результаты изучаются визуально. В зависимости от конкретных требований остаточные загрязнения (пятна) могут быть допустимыми или нет. Цвет пластмассы играет существенную роль в оценке пятна загрязнения. Поэтому при проведении эксперимента необходимо учитывать цвет изделия, для которого проводятся испытания.

9.3.1. Загрязнения соединениями серы (ASTM D1712)

Во многие композиции на основе полимеров входят соли различных металлов — свинца, меди, сурьмы, которые используются в виде пигментов, стабилизаторов, наполнителей

и добавок иного назначения. Когда они входят в контакт с посторонними материалами, содержащими серу, например сероводородом, легко образуются пятна загрязнения. Так, например, если композицией на основе поливинилхлорида, содержащая в качестве стабилизатора свинец, смешивается с композицией, стабилизированной соединениями олова, в которые входит сера, то появляются совершенно отчетливо видимые пятна. К числу наиболее часто встречающихся посторонних агентов, содержащих серу, относятся также выбросы промышленных предприятий и резины.

Испытания, в которых определяется стойкость пластмассы к образованию пятен под действием серосодержащих веществ, очень просты. Для этого достаточно иметь свежеприготовленный раствор сероводорода и испытуемый образец, который может быть любых размеров и формы. Часть образца погружается в насыщенный раствор сероводорода на 15 мин. Для сравнения используется контрольный образец из другого материала, который обладает известным сопротивлением к образованию пятен под влиянием соединений серы. Через 15 мин испытуемый образец вынимается из раствора и сопоставляется с исходным и контрольным образцами на предмет сопоставления образованию пятен загрязнения.

9.4. Сопротивление образованию трещин в растворителях

Наиболее важный и трудный вопрос для инженера-конструктора — это правильно подобрать материал для конкретных условий его применения. В этом отношении сопротивление воздействию химических веществ должно рассматриваться как одно из основных свойств для правильного выбора материала. Первичным и удобным источником информации относительно химического сопротивления полимера являются данные, публикуемые поставщиком материала. Такие данные обычно получают на основании простейших испытаний методом погружения, описанным выше в настоящей главе. Для большинства полимеров, испытываемых под нагрузкой, характерно образование трещин в условиях длительного воздействия на них определенных жидкостей. Этот эффект имеет место даже в том случае, когда те же жидкости не вызывают образование трещин в ненапряженных образцах, так что простые испытания на погружения не дают адекватных результатов [6].

Важно понять природу воздействия полимеров, вызывающих образование трещин. Вначале происходит замещение связей полимер–полимер на связи полимер–растворитель вследствие понижения когезионной энергии поверхностных слоев материала, на который воздействует жидкость. Эти вновь образовавшиеся связи полимер–растворитель не вносят вклада в прочность полимера. Если приложенные напряжения превысят когезионную прочность такого ослабленного слоя полимера, то происходит разрыв. Тип и количество разрывов зависят от характера распределения напряжений в материале. Далее растворитель проникает вглубь полимера, и трещина становится более резко выраженной [7].

Эффект образования трещин в напряженных образцах в той или иной мере присущ всем полимерам. Однако при этом существенно, чтобы действовали либо внешние, либо внутренние напряжения. Наибольшую сложность здесь представляют

внутренние напряжения, возникшие при литье, поскольку практически невозможно полностью избавиться от этих напряжений. Можно лишь минимизировать их влияние путем правильного конструирования формы, оптимизации технологического режима и отжига изделий после его изготовления. При одновременном воздействии напряжений и химического агента можно установить такое «критическое напряжение», ниже которого растворитель не оказывает воздействия на полимер. Под критическим напряжением понимают такое минимальное напряжение, при котором обнаруживаются первые признаки образования трещин в образце, находящимся под воздействием химического агента.

Для определения уровня критического напряжения предложены два способа испытаний. Согласно первому из них, часто рассматриваемому как тест на оценку растворителя, используют обычную испытательную машину, с помощью которой осуществляется растяжение, и стандартный образец. Испытания состоят в том, что создаются растягивающие напряжения, и после этого образец немедленно подвергается воздействию растворителя. Это воздействие осуществляется либо разбрызгиванием жидкости по поверхности образца, либо протиранием поверхности тампоном, смоченным этой жидкостью. Это воздействие продолжается в течение 1 мин, после чего образец рассматривается невооруженным глазом на предмет обнаружения следов образовавшихся трещин. Если трещины отсутствуют, то уровень напряжений повышается, и эксперимент повторяется. Полагается, что материал стоек в данной среде, если следов образования трещин не наблюдается вплоть до предела текучести.

Одним из недостатков этого метода является необходимость использования большого количества образцов для того, чтобы определить критическое напряжение. Другой фактор — это насколько долго полимер подвергается действию химического агента. Вполне вероятно, что воздействие растворителя на полимер проявится только при достаточно длительной экспозиции. Поскольку на практике не представляется целесообразным проводить длительные эксперименты, необходимой оказалась разработка ускоренного метода испытаний. Такой метод основывается на выполнении измерений либо при повышенной температуре, либо при более высоких напряжениях.

Как всегда, не существует адекватной альтернативы испытанию изделия в реальных условиях применения. Однако лабораторные измерения могут дать полезную информацию относительно поведения материала, контактирующего с жидкостью, под действием различных напряжений. Значения критических напряжений, установленных для различных пар полимер–растворитель, весьма полезны для оценки уровня остаточных напряжений в изделии (подробнее см. в главе 15).

Альтернативный метод оценки стойкости полимера, находящегося под действием напряжений, к образованию трещин обладает определенными преимуществами по сравнению с описанным выше методом [8]. Согласно этому методу, образец размером $4 \times 1 \times 0,03$ дюйма прижимается к поверхности лекала, имеющей эллиптическую форму. Схема установки образца показана на рис. 9.1

Образец, закрепленный на лекале, погружается в жидкость. В силу особенностей формы лекала напряжения у верхнего конца образца очень малы, а у нижнего конца — максимальны. Таким образом, существует распределение напряжений по

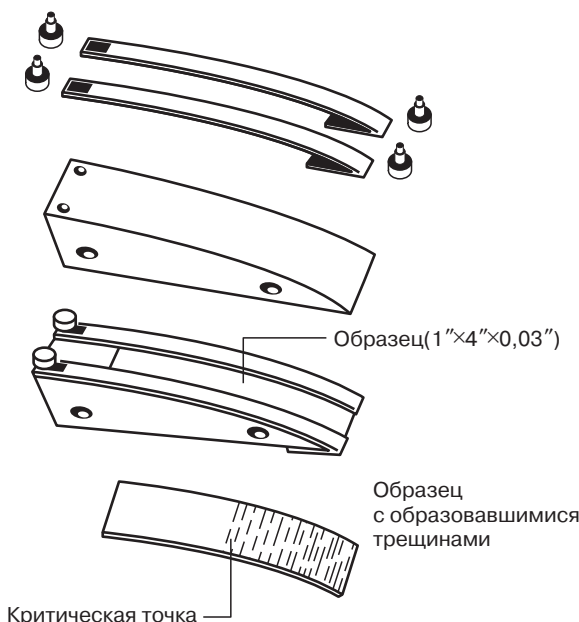


Рис. 9.1. Схема испытаний образца на стойкость к образованию трещин (с разрешения *Wiley Interscience*)

длине, в соответствии с которым проводится калибровка лекала. После выдержки в растворителе в течение 1 мин, образец вынимается и рассматривается. Трещины возникают на определенной части образца, и точка, в которой трещины отсутствуют, отвечает критическому напряжению. Конкретное значение напряжения в этой точке предварительно рассчитывается. Если по истечении 1 мин трещины вообще не образуются, то эксперимент повторяется при продолжительности погружения в жидкость, составляющей до нескольких часов. Испытания могут проводиться при повышенных температурах, что ускоряет процесс образования трещин. Важнейшее преимущество этого метода испытаний состоит в том, что в одном опыте на одном образце оценивается действие напряжений в широком диапазоне из значений.

9.5. Образование трещин под воздействием окружающей среды (ASTM D1693, ISO 4599)

Растрескивание под воздействием окружающей среды относится к испытаниям на хрупкое разрушение полиэтиленовых образцов, начинающееся с образования трещин на поверхности, или же разрушение изделий под воздействием многоосного напряжения, при контакте с внешней средой, в условиях, когда при отсутствии этой среды разрушение вообще бы не происходило. При таких испытаниях может происходить наложение внутренних и внешних напряжений, а в качестве внешней среды могут быть различные газообразные, жидкие, полутвердые и твердые вещества.

Для того чтобы произошло разрушение под воздействием окружающей среды, необходимо выполнение нескольких условий. Во-первых, важнейшим фактором является присутствие концентрации напряжений или надреза. Необходимо также, чтобы имелись напряжения — внутренние, сохранившиеся после изготовления изделия, или внешние. И наконец, разрушения не происходит, если отсутствует внешний агент, под воздействием которого образуются трещины [9].

Образование трещин под действием окружающей среды не следует смешивать с иными случаями образования трещин, например, под влиянием растворителя и высокой температуры.

Образование трещин в изделиях из полиэтилена приводит к преждевременному разрушению, что обусловлено присутствием моющих веществ, воды, солнечного света, масел или иных активных компонент, встречающихся на практике, обычно в условиях, когда имели место сильные деформации изделия. Это явление имеет чисто физическую природу, причем набухание или иные явления, приводящие к ослаблению материала, отсутствуют.

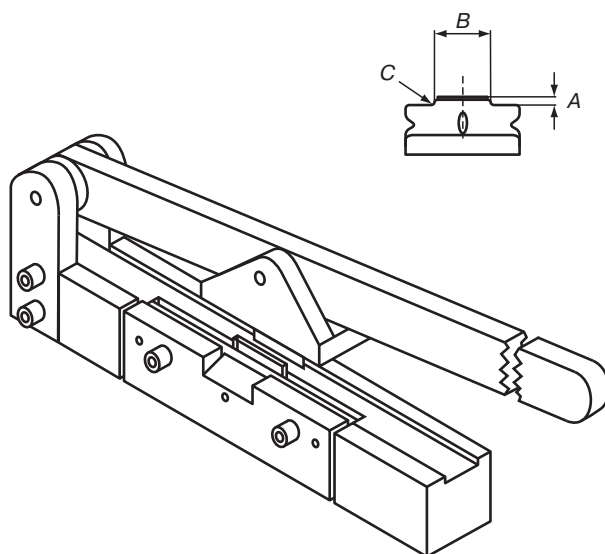
Именно полиэтилен в наибольшей степени чувствителен к воздействиям такого рода, образуя крейзы или трещины под воздействием внешней среды. Рассматриваемое явление особенно характерно для полиэтиленовой изоляции кабелей, на которую часто наносят смазку, содержащую поверхностно-активные вещества, облегчающие сборку электрических схем. В этих случаях в полиэтилене, который в лабораторных условиях демонстрирует прекрасную стойкость к воздействию химических агентов, образуются глубокие трещины, проникающие вплоть до проводника [10].

Соппротивление полиэтилена воздействию химических реагентов может быть повышено увеличением его молекулярного веса, снижением напряжений путем выбора правильного технологического режима формования изделий и введением в состав композиций эластомеров. Кроме того, наблюдалось, что сужение молекулярно-весового распределения заметным образом улучшало сопротивление полиэтилена образованию трещин по сравнению с материалами с теми же средними молекулярными весами и той же плотностью. Образование крупных кристаллических элементов структуры и ориентация материала усугубляют проблему [11].

9.5.1. Процедура испытаний

Очень аккуратно вырезается образец размером 1,5×1 дюйм. Образец получается с помощью острого лезвия и устройства гильотинного типа (рис. 9.2), что позволяет точно соблюсти заданные размеры. Затем образец перегибается на 180 град с тем, чтобы сторона, по которой производился надрез, оказалась наружной и была под прямым углом к линии перегиба.

Образец устанавливается на держателе, который монтируется в испытательной трубке. Немедленно после этого в трубку заливается химический реагент, с которым проводятся испытания. Этим реагентом может быть моющее вещество, мыльный раствор или любое органическое вещество. Одним из наиболее популярных реагентов является *Igetal CO-630*, производимый фирмой *Rhone-Poulenc* (*Cranbury*, Нью-Джерси).



	мм	дюйм
A	3	0,125
B	18,9–19,2	0,745–0,755
C (радиус)	не более 1,5	не более 0,0625

Рис. 9.2. Устройство для обрезания образцов (воспроизведено с разрешения ASTM)

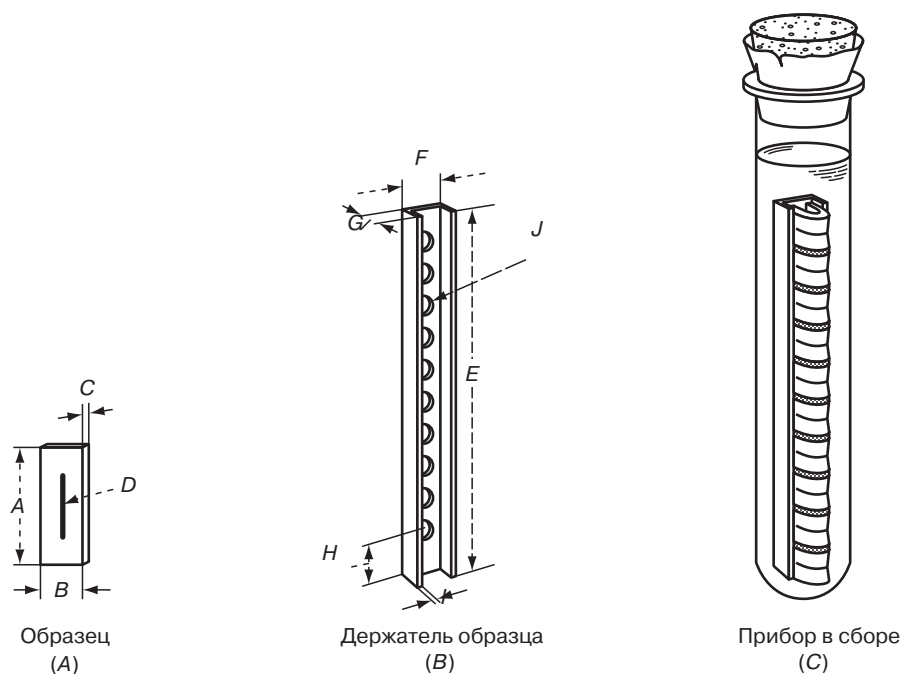
Трубка помещается в термостат, в котором поддерживается постоянная температура $50 \pm 0,5$ или $100 \pm 0,5$ °C в зависимости от выбора условий испытания. После заданного времени образец вынимается из трубки, и визуально определяется образование трещин.

На рис. 9.3 показан внешний вид образца, держателя и испытательной трубки в сборе.

9.5.2. Альтернативный метод испытаний при постоянной деформации

Проведение испытаний при поддержании постоянной деформации представляет собой относительно дешевый метод испытаний полимеров на сопротивление образованию трещин под действием окружающей среды без использования дорогостоящего оборудования. Принцип метода виден из рис. 9.4.

Образцы для испытаний готовят путем токарной обработки заготовок, полученных литьем под давлением, или емкостей, предоставленных поставщиком сырья. Регулируя фиксирующее приспособление, можно создавать различные деформации образцов. Затем небольшое количество активного химического реагента наносят



	мм	дюйм
A	$38 \pm 2,5$	$1,5 \pm 0,1$
B	$13 \pm 0,8$	$0,5 \pm 0,03$
C	см. таблицу к рис. 9.2	
D	см. таблицу к рис. 9.2	
E	165	$6 \frac{1}{2}$
F (наружный размер)	16	$\frac{5}{8}$
F (внутренний размер)	$11,75 \pm 0,5$	$0,463 \pm 0,002$
G	10	$\frac{3}{8}$
H	15	$\frac{37}{64}$
I	2	0,0081 (12B&S)
J	10 отверстий диаметром 5 мм, расстояние по центру 15 мм	10 отверстий диаметром 3/16 дюйма, расстояние по центру 19/32 дюйма

Рис. 9.3. Образец, держатель и прибор для испытаний в сборе (воспроизведено с разрешения ASTM)

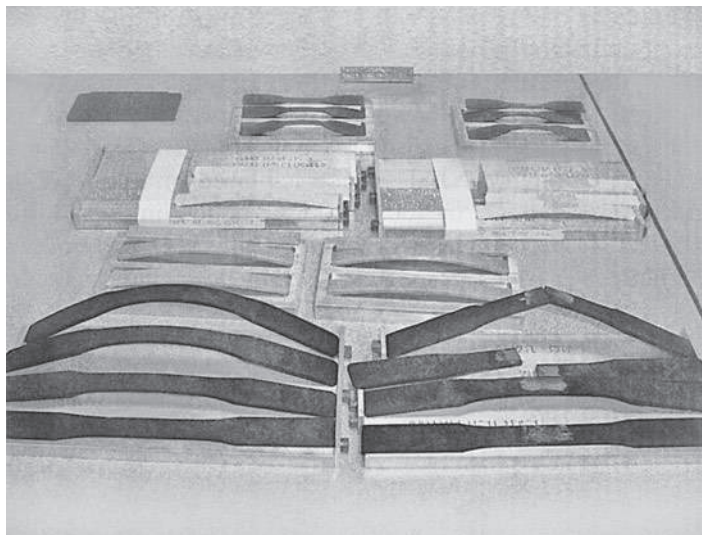


Рис. 9.4. Простой метод крепления образцов

на образец, и образец с нанесенной на него жидкостью выдерживают в течение заданного времени. Далее визуально изучают образование микротрещин и трещин. Можно также провести испытания образцов на растяжение или ударную прочность с тем, чтобы оценить, насколько воздействие реагента повлияло на механические характеристики материала.

Одним из недостатков этого метода является то, что начальные напряжения при заданной деформации уменьшаются вследствие процесса релаксации.

Литература

1. Richardson T.A. *Modern Industrial Plastics*, Howard W. Sams and Co., Indianapolis, IN, 1974, p. 112.
2. Deanin R.D. *Polymer Structure, Properties and Applications*. Cahners, Boston, MA, 1972, P. 455.
3. *Ibid.*, p. 449.
4. *Ibid.*, p. 427.
5. Borg-Warner Corporation «Chemical Resistance» *Tech. Bull. Design Tip No. 6*, Parkersburg, W. VA.
6. Smith W.M. *Manufacture of Plastics*, Vol. 1, Reinhold, New York, 1964, p. 443.
7. Baer E. *Engineering Design for Plastics*, Reinhold, New York, 1964, p. 778.
8. Bergen R.L., Jr. «Stress Cracking of Rigid Thermoplastics» *SPE ANTEC*, 8 (1962).
9. Baer, Reference 7, p. 772.
10. *Modern Plastics Encyclopedia*, McGraw-Hill, New York, 1967, p. 238.
11. Brydson J. *Plastics Materials*, Reinhold, New York, 1970, p. 117.

10. Аналитические испытания

10.1. Введение

Аналитические испытания важны как для поставщиков, так и для потребителей пластмасс. Эти испытания предоставляют базовую информацию, которая необходима для характеристики и классификации материала. Такие испытания, как измерения плотности или удельного веса позволяют оценить однородность материала. В настоящее время крайне редко полимеры поставляются без включения в их состав добавок и модификаторов. Добавки и модификаторы в зависимости от их свойств и содержания в различной степени изменяют физические свойства базового материала. Поэтому определение плотности композиций является важной составной частью характеристики материала.

В отличие от металлов и керамики, полимеры склонны к адсорбции воды. Количество адсорбируемой влаги зависит от особенностей строения полимера. Наличие влаги серьезнейшим образом влияет на основные — физические, механические, оптические — свойства полимера. Вода также играет роль пластификатора, способствуя размягчению полимера [1]. Кроме того, поглощение больших количеств влаги влияет на размерную стабильность изделий. При проектировании изделий из пластмасс необходимо учитывать возможность неожиданного разрушения изделий из-за адсорбции влаги.

Другой важный и часто используемый в промышленности тест — определение влажности. Эта простая, но весьма эффективная оценка качества материала, поскольку влажность в сильной степени влияет на технологические свойства полимеров при их переработке. Избыточное содержание влаги может привести к различным технологическим трудностям и видимым дефектам. Результаты таких испытаний, как определение плотности и рассеивания порошка могут помочь при оценке поведения материала при смешении, компаундировании и переработке.

Некоторые часто используемые в промышленности аналитические методы были обсуждены в главе 7.

10.2. Определение удельного веса (*ASTM D792*)

Удельный вес определяется как отношение веса данного объема материала к весу эквивалентного объема воды при выбранной температуре испытаний. Обычно такие измерения проводят при 23 °С.

Величина удельного веса представляет собой важнейшее преимущество полимеров перед другими материалами, поскольку полимеры — это легкие вещества. Цена всех полимерных материалов на рынке сегодня устанавливается в расчете на фунт, а не на единицу объема. Такая практика подчеркивает значение измерений удельного веса как при продажах, так и при производственном контроле.

Для определения удельного веса пластмасс разработаны два основных метода, выбор которых зависит от формы материала. Метод *A* предназначен для образцов в форме листов, брусков, труб или отливок. Метод *B* применяется для материалов в форме порошков, чешуек и гранул.

10.2.1. Метод *A*

Для выполнения измерений по этому методу необходимо иметь прецизионные аналитические весы, оборудованные стационарной подставкой для установки сосуда с иммерсионной жидкостью. Для подвески образцов используются проволока, изготовленная из нержавеющей стали, и дополнительный груз, который используется при испытаниях легких образцов с удельным весом, меньшим 1,00. В качестве сосуда для иммерсионной жидкости используется лабораторный стакан.

Типичная установка для измерения удельного веса показана на рис. 10.1, *a*.

Эксперимент состоит в том, что образец любого подходящего размера взвешивается на воздухе. Затем этот же образец подвешивается на проволоке, прикрепленной к коромыслу весов, и полностью погружается в дистиллированную воду. Определяется вес образца (вместе с дополнительным грузом, если он был использован). Удельный вес материала рассчитывается по формуле

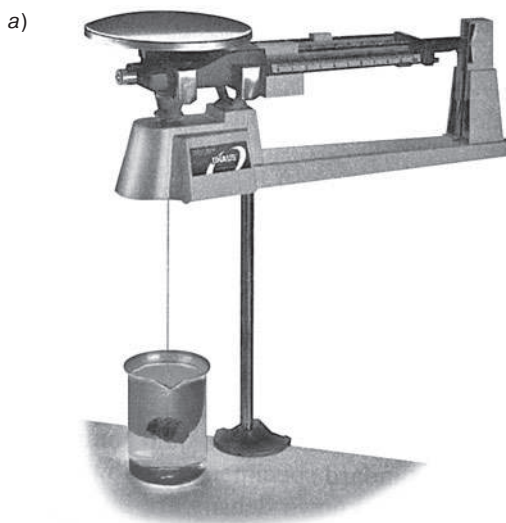


Рис. 10.1. Установки для измерения удельного веса:
a — весы (с разрешения *Ohaus Scale Corporation*)

$$\text{Удельный вес} = \frac{a}{(a + w) - b},$$

где a — вес образца на воздухе; b — вес образца (с дополнительным грузом, если он был использован, и проволокой) в воде; w — вес дополнительного груза (если он был использован) и части проволоки, погруженной в иммерсионную жидкость.

10.2.2. Метод В

Аппаратура, используемая для реализации этого метода, предназначенного для определения удельного веса материала в виде гранул, чешуек и порошка, состоит из аналитических весов, пикнометра, вакуумного насоса и вакуумного эксикатора. Первым шагом при выполнении измерений является взвешивание пустого пикнометра. Затем пикнометр заполняется водой и помещается в водяную баню, где он находится до тех пор, пока не будет достигнута равновесная температура. Измеряется вес пикнометра с водой. После того как пикнометр был вымыт и осушен, в него кладут 1–5 г исследуемого материала и вновь взвешивают. Далее пикнометр заполняют водой и помещают в вакуумный эксикатор. Целью вакуумирования является удаление всех следов воздуха, который мог остаться между частичками исследуемого материала. Наконец, измеряется вес заполненного водой пикнометра с исследуемым материалом.

Удельный вес рассчитывается по формуле

$$\text{Удельный вес} = \frac{a}{b + a - m},$$

где a — вес образца; b — вес пикнометра, заполненного водой; m — вес пикнометра с исследуемым образцом, заполненного водой.

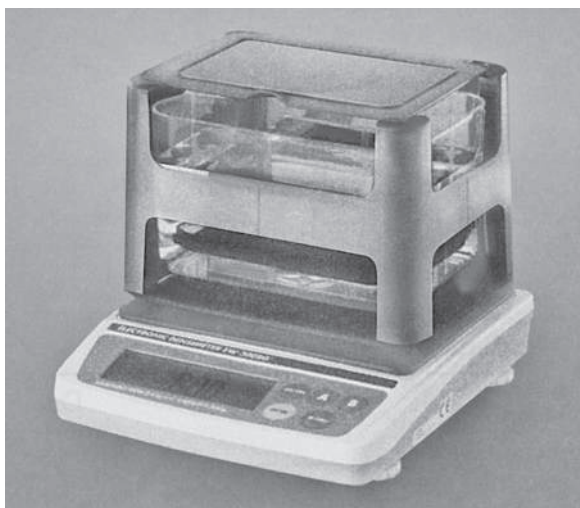
Вместо воды в качестве иммерсионной среды может использоваться иная жидкость. В этом случае необходимо заранее знать ее удельный вес и использовать эту величину в дальнейших расчетах.

На рис. 10, б представлен электронный вариант прибора для измерения удельного веса.

10.3. Измерение плотности с помощью градиентной колонки (ASTM D1505, ISO R1183)

Плотность полимерных материалов представляет собой отношение массы к единице объема и выражается в г/см³ или фунт/фут³. Был предложен очень точный метод определения плотности, основанный на измерении того уровня, на котором плавает исследуемый образец в колонке, в которой создан градиент плотности. Указанный уровень сравнивается с положением стандартных образцов с известной плотностью. В колонку помещается набор калиброванных стеклянных меток с различной плотностью, каждая из которых плавает на определенной высоте, соответствующей значению плотности жидкости на этом уровне. Набор таких поплавков с различной плотностью

б)

**Рис. 10.1.** Установки для измерения удельного веса:

б — электронная версия прибора для измерения плотности и удельного веса (с разрешения *Qualitest USA*)

служит для калибровки градиентной трубки [2]. Для калибровки используется достаточно крупный график, который представляет зависимость плотности от высоты, позволяющий производить отсчет с точностью не хуже ± 1 мм. Когда образец с неизвестной плотностью помещается в трубку, он достигает определенного положения, и соответствующая высота после достижения равновесия служит достаточно точной мерой плотности.

Альтернативный вариант этого метода основан на численных расчетах.

В табл. 10.1 приведен список типичных пар жидкостей, рекомендуемых для заполнения градиентных колонок.

Таблица 10.1. Пары жидкостей, рекомендуемые для использования при изготовлении градиентных колонок

Система	Диапазон плотностей, г/мл
Метанол–бензиловый спирт	0,80–0,92
Изопропанол–вода	0,79–1,00
Изопропанол–диэтиленгликоль	0,79–1,11
Этанол–четырёххлористый углерод	0,79–1,59
Этанол–вода	0,79–1,00
Толуол–четырёххлористый углерод	0,87–1,59
Вода–бромид натрия	1,00–1,41
Вода–нитрат кальция	1,00–1,60
Хлорид цинка–этанол–вода	0,80–1,70
Четырёххлористый углерод–1,3-дибромпропан	1,60–1,99
1,3-дибромпропан–этиленбромид	1,99–2,18
Этиленбромид–бромформ	2,18–2,89
Четырёххлористый углерод–бромформ	1,60–2,89
Тетрахлорэтилен–бромформ	1,55–2,70

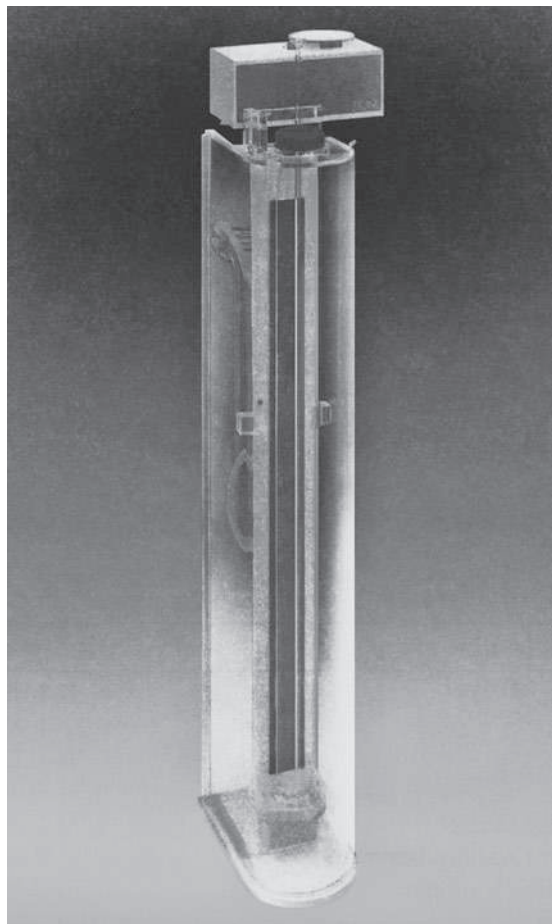


Рис. 10.2. Градиентная колонка для измерения плотности (с разрешения *Techne, Inc.*)

На рис. 10.2 показана имеющаяся в продаже градиентная колонка для определения плотности

10.4. Измерение объемной (кажущейся) плотности (ASTM D1895)

Объемная плотность характеризует степень заполнения объема материалом. Под объемной плотностью понимается отношение веса к занимаемому этим весом объему, причем объем включает в себя поры, имеющиеся в испытуемом образце. Измерения объемной плотности обычно проводят для порошкообразных материалов, используемых в качестве сырья при литье. Методика измерения объемной плотности подобно обсуждена в главе 7.

10.5. Адсорбция влаги (ASTM D570, ISO 62)

Нельзя не учитывать тенденцию полимерных материалов адсорбировать влагу, поскольку даже минимальные следы влаги могут в сильной степени повлиять на их основные физические, электрические и оптические свойства. Способность поглощать влагу зависит от типа полимера и состава композиции. Например, полимеры, в состав которых входят только углерод и водород, такие как полиэтилен и полипропилен, обладают исключительно высоким сопротивлением взаимодействию с водой, в то время как полимеры, содержащие кислородные и оксигруппы легко поглощают влагу. Пример последних — это ацетаты целлюлозы и полиамиды. Полимеры, в состав которых входят атомы хлора, брома или фтора, являются водоотталкивающими. Типичный их пример — это политетрафторэтилен [7]. Взаимодействие с водой изменяется в присутствии различных добавок, таких как наполнители, стеклянные волокна и пластификаторы. Эти вещества обладают высоким сродством к воде, в особенности если они выходят на поверхность полимерного изделия. Некоторые пластмассы слабо поглощают воду при комнатной температуре, но с ростом температуры водопоглощение заметно усиливается, и это приводит к резкому падению свойств материала. Низкое водопоглощение требуется у пластмасс, используемых для изготовления мешалок в стиральных машинах, пластиковой посуды, клапанов и разбрызгивателей в системах орошения.

В табл. 9.2 приведены типичные значения водопоглощения некоторых традиционных пластмасс.

Испытания полимеров на водопоглощение относительно просты. Для этого нужны только аналитические весы и камера, в которой поддерживается постоянная температура. Образец может представлять собой отливку в виде диска или кусочки, отрезанные от листа, стержня или трубы. Размеры образца зависят от его типа. До проведения испытаний необходимо кондиционировать полимер в определенных условиях. Образцы высушиваются в печи при определенной температуре в течение заданного времени, охлаждаются в эксикаторе и немедленно после этого взвешиваются.

В табл. 10.3 содержится список обычно применяемых для этой цели температур и длительностей сушки.

Таблица 10.2. Водопоглощение ряда пластмасс

Полимерный материал	Поглощение влаги, %
АБС-пластик	0,20–0,45
Полиацетали	0,22–0,45
Алкидные смолы	0,50–0,25
Полиакрилаты	0,30–0,48
Ацетат целлюлозы	2,00–7,00
Ацетат-бутират целлюлозы	0,90–2,20
Пропионат целлюлозы	1,20–2,80
Фторполимер <i>CTFE</i>	0,00
Ненаполненная эпоксидная смола	0,08–0,15
Фторполимер <i>FEP</i>	0,01

Окончание табл. 10.2

Полимерный материал	Поглощение влаги, %
Полиамид 6	1,30–1,90
Полиамид 66	1,50–2,0
Полиамид 610	0,40
Полиамид 612	1,5
Полиамид 11	1,10
Поликарбонат	0,15–0,35
Термопластичный полиэфир	0,8–0,38
Полиэтилен	0,010
Полифениленоксид (<i>Noril</i>)	0,06–0,07
Полипропилен	0,010
Полисульфон	0,22
Полистирол	0,03–0,6
Сополимер стирола с акрилонитрилом	0,2–0,3
Фторполимер <i>TFE (Fluon)</i>	0,01
Мочевиноформальдегидная смола	0,02–1,50
Поливинилхлорид	0,07–0,75

Из *R. Milby, Plastics Technology* (воспроизведено с разрешения *McGraw-Hill Book Company*).

Количество поглощенной влаги рассчитывается по увеличению веса с помощью следующей формулы:

$$\text{Увеличение веса, \%} = \frac{\text{Вес влажного образца} - \text{Вес исходного образца}}{\text{Вес исходного образца}} \times 100.$$

10.6. Анализ на влажность

Гигроскопичность полимерных материалов влияет как на технологические свойства при их переработке, так и на размерную стабильность изделий. Такие материалы, как АБС-пластики и поликарбонат необходимо тщательно высушивать перед началом переработки для того, чтобы исключить появления вздутий на поверхности изделий, снижения ударной прочности и ухудшения других свойств материала. Присутствие влаги также влияет на прочность линий спая и соединения потоков, что приводит к дальнейшему снижению прочности изделий.

Как правило, перед началом переработки проводят рутинные анализы на содержание влаги в материале.

Для этого наиболее часто используют пять основных методов.

10.6.1. Метод определения потерь влаги при сушке (метод *LOD*)

Этот метод позволяет определить уровень влажности полимеров за сравнительно короткое время. Испытания состоят в том, что образец нагревается до заданной температуры и выдерживается при этой температуре определенное время. Измеряется потеря веса образца. Эксперимент может проводиться с помощью простой лабораторной печки и простых весов или же для измерений можно использовать современное высококачественное оборудование.

Таблица 10.3. Условия предварительной сушки образцов перед испытаниями на водопоглощение

Продолжительность	Температура	Комментарии
24 ч	23 °C	В среднем для разных материалов
2 ч	23 °C	Материалы с относительно высокой скоростью адсорбции
Длительно	23 °C	Опыт продолжается до полного насыщения полимера
2 ч	100 °C (в кипящей воде)	Поглощение воды при повышенных температурах
0,5 ч	100 °C (в кипящей воде)	Материалы с относительно высокой скоростью адсорбции
Циклический режим	23–100 °C	Для специальных применений, например, обеденной посуды и мешалок в стиральных машинах

А. Использование лабораторной печи в методе *LOD*

Для проведения эксперимента необходимо иметь печку, чашечку для помещения в нее образца и очень чувствительные весы, которые позволяют проводить взвешивание с точностью до 0,00001. Эксперимент состоит в том, что небольшое количество материала помещается в чашечку и взвешивается. Чашечка с образцом устанавливается в печке, в которой поддерживается заданная температура, и выдерживается там до достижения постоянного веса. Затем чашечка вынимается и ставится в эксикатор на 30 мин; за это время образец остывает. Чашечка с образцом взвешивается с точностью до 0,0001г.

Процентное содержание влаги в образце вычисляется по формуле:

$$\text{Содержание влаги, \%} = \frac{A - C}{A - B} \times 100,$$

где *A* — вес чашечки с образцом; *B* — вес пустой чашечки; *C* — вес чашечки с образцом после сушки.

Б. Инструментальный метод *LOD* (*ASTM D6980*)

Для измерения влажности образцов был разработан современный прибор, в котором испытания типа *LOD* проводятся относительно быстро и с высокой точностью. Анализатор влажности запрограммирован таким образом, чтобы для данного материала были реализованы оптимальные параметры процесса взвешивания образца, выбора температуры и длительности сушки, а также оценки момента окончания эксперимента. Эксперимент начинается с предварительного выбора условий испытаний для данного материала. После этого образец помещается в чашечку, и прибор запускается в работу. Результаты измерений представляются численно на дисплее в единицах «частей на миллион» либо в процентах. Экспериментальные результаты также могут быть распечатаны или представлены графически на встроенном мониторе.

На рис. 10.3 показан имеющийся на рынке анализатор влажности.



Рис. 10.3. Анализатор влажности, в котором реализован метод *LOD* (с разрешения *Omnimark Instrument Corporation*)

10.6.2. Измерения влажности по методу Карла Фишера

Титрование по Фишеру является довольно сложным, но точным методом определения влажности. Эксперимент состоит в нагревании небольшого образца в пиролизной печи, отбора выделяющихся паров с переносом их в реакционный сосуд и кулонометрического определения содержания воды в парах. При этих испытаниях используются токсичные реагенты, так что следует предотвратить возможность любых утечек из измерительной системы.

Метод Фишера более пригоден для его использования в аналитической лаборатории, нежели в производственных условиях.

10.6.3. Технология, основанная на использовании сенсоров

Предполагается, что новая методика измерений влажности, основанная на использовании сенсоров, лишена недостатков как метода *LOD*, так и метода Фишера. Измерительная система состоит из цилиндрического нагревателя, в который помещается образец, устройства для подачи осушенного газа-носителя и датчика, прокаленного на содержание воды.

Предварительно взвешенный образец устанавливается в нагревателе, в котором сделана перегородка, и нагревается до заданной температуры. Выделяющиеся при этом летучие переносятся в аналитическую ячейку, где измеряется относительная влажность газообразных продуктов. Микропроцессор пересчитывает результаты измерений в интегральный сигнал, который высвечивается на экране дисплея в форме количества (микрограмм) воды, процентного содержания влаги или частей воды на миллион частей материала.

В большинстве случаев общая продолжительность измерений составляет от 3 до 10 мин. Итоговый результат измерений показывается на дисплее, представляется в виде графика, передается на компьютер или распечатывается на внешнем принтере.

Прибор для измерения влажности с помощью сенсоров, предлагаемый на рынке, показан на рис. 10.4.

10.6.4. Микроволновая техника измерений

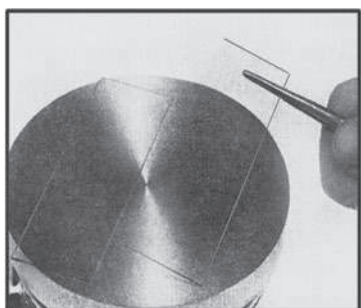
В этом методе измерения влажности осуществляются с помощью микроволновой технологии. Эксперимент состоит в том, что образец в виде гранул помещается в трубку, а трубка устанавливается в нагревательной камере. Через трубку с образцом прокачивается подсушенный воздух, который переносит летучие в ацетат целлюлозный адсорбер. На адсорбер направляется микроволновое излучение, причем содержащееся в материале количество влаги влияет на выход энергии микроволнового излучения. При этом измеряется исключительно содержание влаги в адсорбере. Результаты измерений показываются на дисплее в виде процентного содержания влаги.

10.6.5. Метод сушки по TVI

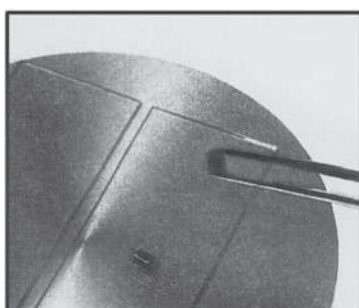
Этот метод был разработан инженером компании *General Electric* и называется методом определения летучих по Томазетти (*Thomasetti Volatile Indicator, TVI*). Это дешевый, простой в исполнении и быстрый метод оценки уровня содержания летучих в термопласте; этот уровень устанавливается, исходя из требования обеспечения возможности переработки материала. В этом методе не устанавливается количественно содержание влаги в материале, но определяется, присутствует ли влага в полимере или нет. Для проведения испытаний необходимо иметь горячую плитку, которая может нагреваться до $600 \pm 25^\circ\text{F}$, покровные стекла для микроскопа,



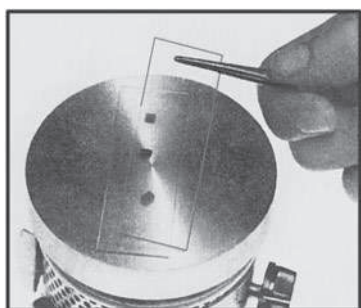
Рис. 10.4. Прибор сенсорного типа для измерения влажности (с разрешения *Arizona Instruments*)



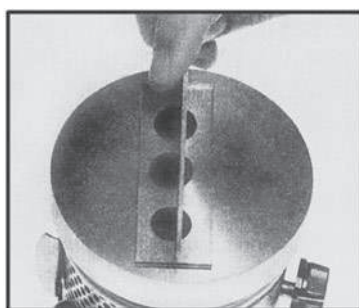
1. Температура поверхности нагреваемой плитки (необходимо убедиться, что поверхность плитки чистая) должна составлять 550 ± 25 °F (288 ± 10 °C). На ее поверхность на 1–2 мин помещают два покровных стекла



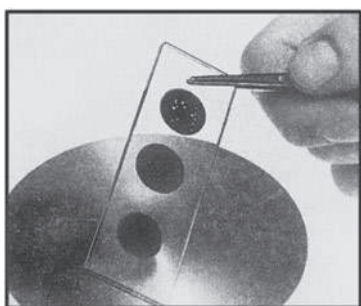
2. Через 1–2 мин температура поверхности плитки должна достичь 500 – 550 °F (260 – 280 °C). С помощью пинцета 4–5 гранулы исследуемого материала кладут на покровные стекла



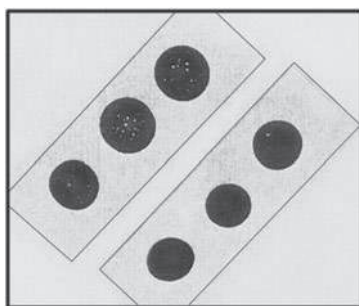
3. Второе покровное стекло помещается над первым с тем, чтобы оба стекла и образец между ними образовали сэндвич



4. Верхнее покровное стекло сверху при-
давливается лопаточкой так, чтобы гранулы расплющились до размера порядка 0,5 дюйма (12,7 мм) в диаметре



5. Сэндвич снимается с плитки и охлаждается. Количество и размер образовавшихся пузырей указывают на содержание влаги, поскольку образование пузырей связано с влагой в материале



6. Показаны типичные результаты. На правом нижнем слайде представлен образец, в котором влага отсутствует. Левый верхний слайд показывает наличие влаги в образце. Появление не более чем одного или двух пузырей может быть объяснено захваченным в них воздухом

Рис. 10.5. Метод фирмы *General Electric* для испытаний на влажность (с разрешения *GE Plastics*)

пинцет и деревянную лопаточку. На рис. 10.5 показаны основные этапы выполнения испытаний по этому методу.

Этот метод непригоден для определения наличия или отсутствия влаги в стекло-наполненных термопластах.

10.7. Ситевой анализ — определение размера части (ASTM D1921)

Средний размер частиц и распределение частиц по размерам имеют важное значение, поскольку эти две характеристики материала влияют на качество компаундирования, технологические свойства материала при его переработке и иных операциях, связанных с работой с сырьем. С более крупными и однородными по размеру частицами легче обращаться, и они более просто перерабатываются. С мелкодисперсными частицами труднее обращаться и их более сложно перерабатывать. При смешении мелкодисперсных и крупных частиц появляется тенденция к неодинаковому проплавлению и, как следствие этого, неоднородности заполнения формы, появлению поверхностной шероховатости и других поверхностных дефектов.

При переработке поливинилхлорида методом сухого смешения мелкие частицы препятствуют однородной адсорбции пластификатора по всему объему партии. С другой стороны, слишком крупные частицы не могут адсорбировать необходимые количества пластификатора, что приводит к неудовлетворительной плавкости материала и возможности появления гель-частиц в изделиях [9]. Размер частиц и их распределение по размерам влияют на вязкость и стабильность пластизолей и органозолой.

Более крупные частицы в пластизолях плавятся медленнее, что в итоге приводит к ухудшению физических свойств материала [9].

Частицы наполнителей, имеющих крупные размеры, например, частицы карбоната кальция, способствуют повышенному износу червяков и цилиндров экструдера, а также вызывают ухудшение физических характеристик изделий [10].

Определение размера частиц и их распределения по размерам основано на использовании набора сит с различным размером ячеек. Испытуемый материал засыпается сверху и проходит через серию сит с разными размерами отверстий, ссыпаясь в итоге на дно. Количество материала, остающегося на каждом сите, определяется взвешиванием по разности весов сита до и после эксперимента. Для ускорения разделения частиц по размерам сита встряхивают.

На рис. 10.6 показан типичный пример экспериментальной установки для ситевого анализа.

Литература

1. Levy S. and DuBois J.H. *Plastics Product Engineering Handbook*, Reinhold, New York, 1977, p. 211.

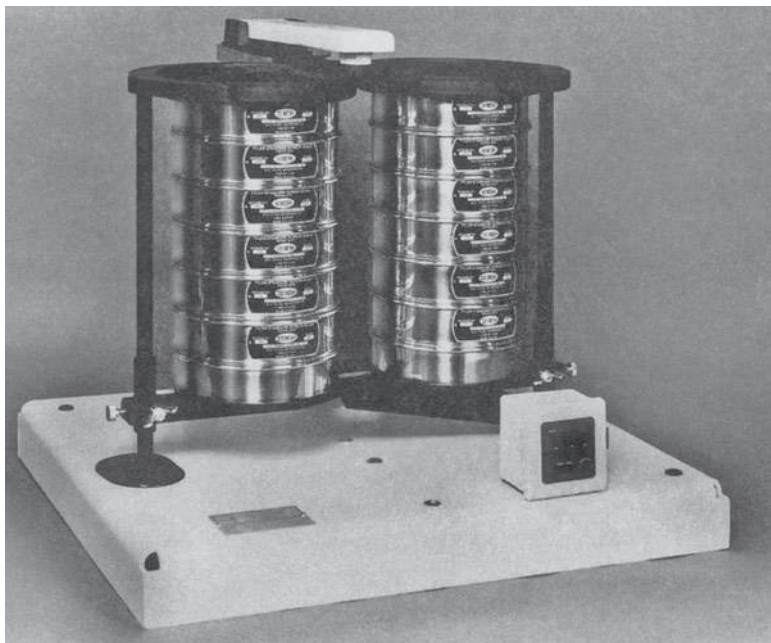


Рис. 10.6. Прибор для ситового анализа (с разрешения *Fischer Scientific Company*)

2. Techne Inc., Princeton, NJ, *Tech. Bull.: Density Gradient Column*, Techne Catalog No. 202.
3. Boyer R.E, Spencer, R. S., and Wiley, R. M. «Use of Density Gradient Tube in the Study of High Polymers» *J. Polym. Sci.*, 1 (1946), p. 249.
4. Tung L.H. and Taylor W.C. «An Improved Method of Preparing Density Gradient Tubes» *J. Polym. Sci.*, 21 (1956), p. 144.
5. Mills J.M. «A Rapid Method of Construction of Linear Density Gradient Columns» *J. Polym. Sci.*, 21 (1956), p. 585.
6. Wiley R.E. «Setting up Density Gradient Laboratory» *Plast. Tech.* 8(3) (1962), p. 31.
7. Milby R. *Plastics Technology*. McGraw-Hill, New York, 1973, pp. 534–536.
8. Schoengood A.A. «PVC Primer» *Plast. Eng.* (Dec. 1973), p. 29.
9. *Ibid.*, p. 30.
10. Prust R.S. «Quality Control in PVC Compounding» *Plast. Compounding* 1(3) (May-June 1978), p. 25.

11. Кондиционирование

11.1. Принципы кондиционирования (ASTM D612, ИСО 291)

Оценка истинных свойств материала возможна только тогда, когда испытания проводятся идентичными методами и в идентичных условиях [1]. В общем случае механические и электрические свойства полимеров и электроизоляционных материалов зависят от температуры и влажности. Если испытывать полимерные материалы при температурах выше комнатной, то они проявляют более высокую стойкость к удару и более низкие прочность и модуль упругости. Высокая влажность окружающей среды заметно влияет на результаты измерения электрических свойств полимеров. Совершенно очевидно, что для того чтобы сопоставлять результаты измерений, выполненных в различных лабораториях, необходимо соблюдать стандартные условия испытаний по температуре и влажности.

Кондиционирование определяется как процесс, в котором материал подвергается контролируемому воздействию различных факторов в течение оговоренного времени [2].

Можно привести три основных аргумента, объясняющие необходимость кондиционирования:

- 1) привести материал в состояние равновесия с нормальными или средними комнатными условиями;
- 2) получать воспроизводимые результаты независимо от предыстории материала;
- 3) подвергнуть материалы необычным воздействиям по температуре и влажности с тем, чтобы предсказать его поведение в реальных условиях эксплуатации.

Стандартная температура в лаборатории. Под такой температурой понимается 23 °C (73,4 °F) с допустимыми отклонениями, не превышающими ± 2 °C ($\pm 3,6$ °F).

Стандартная атмосфера лаборатории. Под этим понимается состояние воздуха при температуре 23 °C (73,4 °F) и относительной влажности 50% при допустимых отклонениях по температуре ± 2 °C ($\pm 3,6$ °F) и по влажности $\pm 5\%$.

11.2. Описание условий кондиционирования

Условия кондиционирования образцов описываются в символической форме как

$$A/B/C,$$

где A — число, указывающее на продолжительность кондиционирования (в часах); B — число, указывающее на температуру, при которой проводилось кондиционирование

Таблица 11.1. Условия кондиционирования

Метод	Толщина образца ^a , дюймы	Продолжитель- ность, ч	Температура, °C	Влажность, %	Особые требования	Применения	
A	X	40	23 ± 2	50 ± 5	Нет	Большинство случаев	
B	Y	88	23 ± 2	50 ± 5	Нет		Термореактивные полимеры
	X	48	50 ± 2	—	Охладить до комнатной температуры и выдержать 5 ч в эксикаторе над безводным хлористым кальцием		
C	Y	48	50 ± 2	—	Охладить до комнатной температуры и выдержать 15 ч в эксикаторе над безводным хлористым кальцием	Для исследования влияния очень высокой атмосферной влажности	
D	—	96 ± 3	35 ± 1	90 ± 2	—	Для определения электрических и механических свойств	
E	—	24 ± 1/2	23 ± 1	—	Погружение образцов в дистиллированную воду		
F	—	48 ± 1/2	50 ± 1	—	Охлаждение образцов до 23 °C путем погружения в дистиллированную воду		
F	—	—	23 ± 1	96 ± 1	Длительность определяется исходя из конкретных условий применения материала	—	

^a X = 0,250 и не более, чем 0,250 дюймов; Y = 0,250 дюймов и больше.

(в °C); C — число, указывающее на относительную влажность (в процентах или на словах) среды, в которой проводилось кондиционирование.

Порядок условий испытаний указывается знаком плюс между последовательными изменениями условий.

Пример. Обозначение 40/23/50 означает, что кондиционирование осуществлялось в течение 40 ч при 23 °C в помещении с относительной влажностью 50%.

Обозначение 48/50+Des указывает на то, что кондиционирование проводилось в течение 48 ч при температуре 50 °C с последующим помещением образцов в эксикатор.

В табл. 1.1. приведены рекомендуемые условия кондиционирования.

Литература

1. Borg-WarnerTech. Rept.: Measurement, Reporting and Interpretation of Thermoplastic Properties, Parkersburg, W VA, Report No: P-127.
2. Lever A.E. and Rhys J.A., *The Properties and Testing of Plastic Materials*, Temple Press, Feltham, England, 1968, p. 7.

Рекомендуемые источники

1. Schmitz J.V. (Ed.), *Testing of Polymers*, Vol. 1, Interscience, New York, 1965, p. 41–85.

12. Различные методы испытаний

12.1. Реометр крутящего момента

Реометр крутящего момента — это один из приборов, которые позволяют проводить самые разнообразные испытания полимерных материалов при исследовательских работах, оценке продукции и контроле качества. При эксплуатации этого прибора в лабораторных условиях он может быть полезен для предсказания технологических свойств материала и моделирования технологического процесса в условиях, наиболее близких к реальности. Некоторые типичные области применения реометра — это измерение вязкостных характеристик расплавов, определение стабильности материала и времени его деструкции при различных скоростях сдвига, исследование реологических свойств при диспергировании пигментов, оценка различных составов, а также наблюдение за изменением свойств ингредиентов и температуры во времени.

Измерение крутящего момента в реометре осуществляется по принципу динамометрических весов. Исследуемый образец материала помещается в камеру (сменительную головку), где он подвергается сдвиговому деформированию с помощью двух вращающихся ножей. При этом на образец также воздействует высокая температура. Динамометр подвешен между двумя опорными блоками. Скорость сдвига определяется по угловой скорости вращения, которая измеряется тахометром. При вращении ротора возникает крутящий момент, обусловленный сопротивлением исследуемого материала деформированию. Этот крутящий момент побуждает динамометр вращаться в противоположную сторону. Возникающий реактивный момент уравнивается через систему рычагов, его величина определяется по шкале и одновременно записывается на ленте самописца. Колебания в системе рычагов успокаиваются с помощью масляного демпфера. Перемещая груз по рычагу, можно расширять пределы измерений в несколько раз без потери чувствительности прибора. Измерительная головка обогревается либо электрическим током, либо с помощью масляного термостата.

На рис. 12.1 показана схема реометра крутящего момента.

В новых вариантах этого прибора параллельно с динамометром на стационарной жесткой плите дополнительно устанавливается высокоточная электронная измерительная система крутящего момента. Крутящий момент, возникающий на динамометре, измеряется непосредственно с помощью датчика усилия без включения в систему измерения каких-либо промежуточных элементов. Это позволяет повысить надежность результатов измерений.

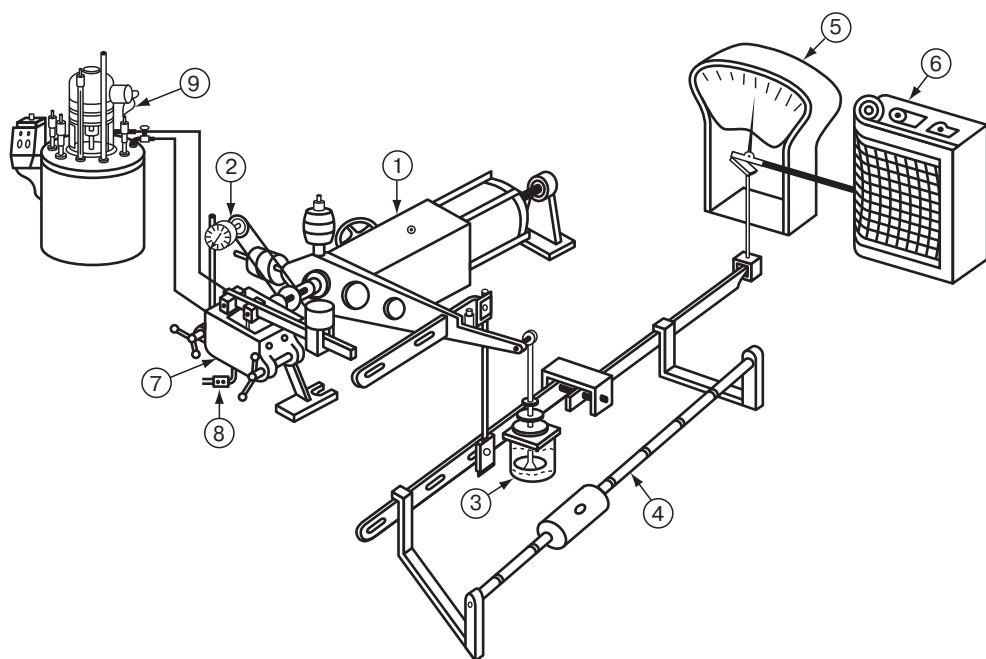


Рис. 12.1. Схема реометра крутящего момента (с разрешения *C.W. Brabender Instruments, Inc.*)

Реометр крутящего момента наиболее часто используют для исследования операций, связанных с компаундированием поливинилхлорида. Большой объем информации дают наблюдения за процессом плавления. Соответствующий эксперимент выполняется следующим образом. Берется навеска заранее установленного количества поливинилхлоридной композиции и загружается в смесительную головку реометра. Затем ротор начинает вращаться с заданной скоростью. В процессе испытаний материал деформируется и доводится до точки плавления, и затем доводится до точки начала деструкции. Результаты испытаний в виде зависимости крутящего момента от времени фиксируются на ленте самописца.

На рис. 12.2 представлены типичные результаты испытаний, которые иллюстрируют процесс плавления, достижение максимума крутящего момента в точке плавления, продолжительность области текучести и время стабильности композиции.

Варьируя содержанием различных добавок, таких как смазки и стабилизаторы, можно оценить их роль в терминах «крутящий момент при плавлении», «время плавления» и «стабильность».

Можно также установить определенное соответствие между данными, получаемыми с помощью реометра крутящего момента и особенностями реальных технологических процессов, таких как экструзия или выдувное формование.

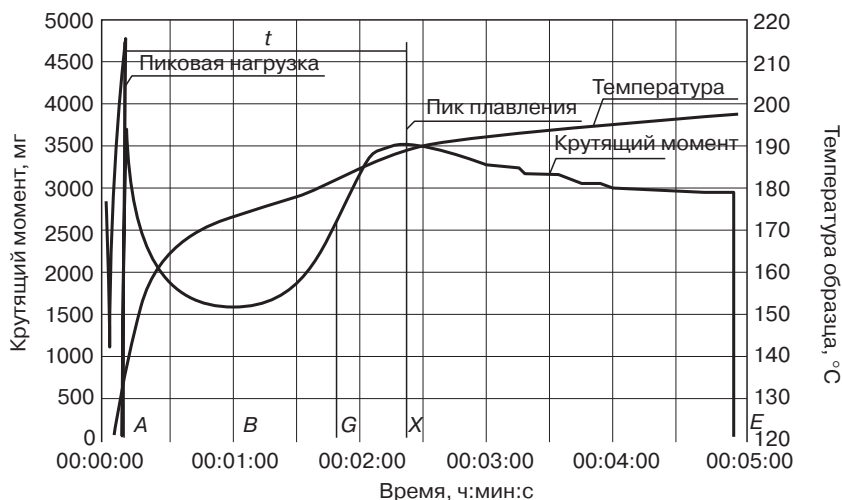
Этот прибор также позволяет оценить особенности течения через капилляры, для чего вместо смесительной головки к динамометру присоединяется небольшой экструдер [1].

Пластограмма Брабендера

Пластикордер и измерительная смесительная головка
Измерения плавления/Версия эксперимента 3.2.6

Общие условия

Заказ	<i>C.W. Brabender Instrument</i>	Начальная температура образца	190 °C
Оператор	<i>AY</i>	Область измерений	5000 мг
Дата	1/28/2005 12:43		
Тип привода	<i>DR2051</i>	Демпфирование	3
Смеситель	<i>Roller Type 6 Bect</i>		
Установка нагрузки	вручную + 5 кг	Продолжительность испытаний	5 мин
Образец	Жесткий поливинилхлорид		
Добавки	Нет	Масса образца	60,0 г
Скорость вращения	60 об/мин	Кодовое обозначение	Испытания на плавление A
Температура смесителя	190 °C		



Обозначение	Время (ч:мин:с)	Момент, мг	Температура образца, °C
Пик нагрузки A	00:00:08	4791	129
Минимум B	00:01:00	1560	173
Точка перегиба C	00:01:50	2555	182
Максимум X	00:02:22	3542	189
Окончание E	00:05:00	2939	198

Интегральные характеристики / энергия

От пиковой нагрузки до минимума	A–X	6,2 кДж
От минимума до максимума	B–X	12,1 кДж
От максимума до завершения	X–E	30,6 кДж
От пиковой нагрузки до максимума	A–X	18,4 кДж
От пиковой нагрузки до окончания	A–E	48,9 кДж
Удельная энергия (Вт/масса образца)		0,8 кДж/г
Желатинизации после точки B	B–X	4,2 кДж

Результаты

Время плавления t	A–X	00:02:14 (ч:мин:с)
Скорость желатинизации v		2953 мг/мин

Рис. 12.2. Типичные результаты испытаний (с разрешения *C.W. Brabender Instruments, Inc.*)

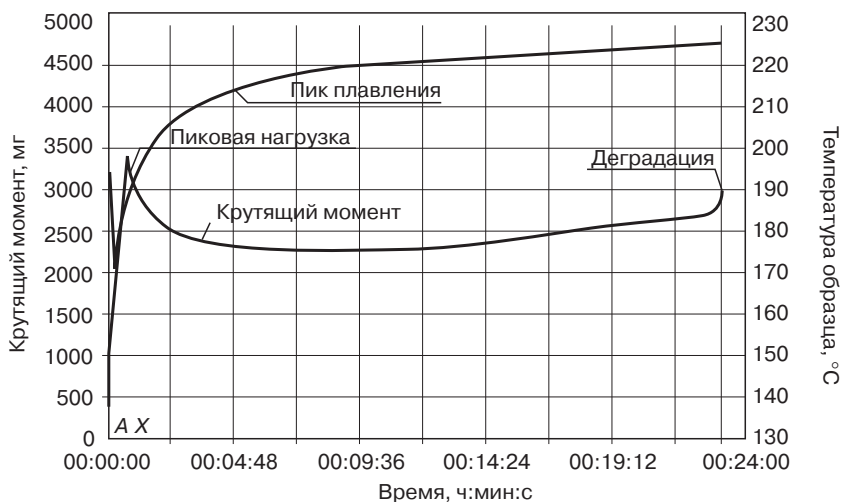
Пластограмма Брабендера

Пластикордер и измерительная смесительная головка

Испытания на тепловую и деформационную стабильность/ Версия эксперимента 3.2.8

Общие условия

Заказ	<i>C.W. Brabender Instrument</i>	Начальная температура образца	200 °C
Оператор	AY	Область измерений	5000 мг
Дата	1/28/2005 13:05		
Тип привода	<i>DDRVT52</i>	Демпфирование	3
Смеситель	<i>Roller Type 6 Bect</i>		
Установка нагрузки	вручную + 5 кг	Продолжительность испытаний	30 мин
Образец	Жесткий поливинилхлорид	Масса образца	60,0 г
Добавки		Кодовое обозначение	тепловая и деформационная стабильность
Скорость вращения	60 об/мин		
Температура смесителя	200 °C		



Обозначение	Время (ч:мин:с)	Момент, мг	Температура образца, °C
Пик нагрузки A	00:00:06	4574	135
Минимум B	00:00:26	1718	174
Максимум X	00:00:48	3415	188
Разжение D	00:29:56	0	0

Интегральные характеристики / энергия

От пиковой нагрузки до минимума	A-B	2,8 кДж
От минимума до максимума	B-X	3,4 кДж
От максимума до разложения	X-D	203,7 кДж
От пиковой нагрузки до максимума	A-X	6,2 кДж
От пиковой нагрузки до разложения	A-D	210,0 кДж
Удельная энергия (Вт/масса образца)		3,5 кДж/г

Результаты

Время плавления t	A-X	00:00:42 (ч:мин:с)
Время разложения	A-D	00:29:50 (ч:мин:с)



Рис. 12.3. Реометр Брабендера (с разрешения *C.W. Brabender Instruments, Inc.*)

На рис. 12.3 показан реометр постоянного момента, предлагаемый на рынке.

12.2. Испытания на адсорбцию пластификатора

Способность поливинилхлорида адсорбировать пластификаторы представляет значительный интерес для специалистов по составлению композиций на основе этого полимера. Наибольшее количество пластификатора, которое может быть поглощено полимером, зависит от состава композиции. Это количество может составлять от 20 долей на 100 частей полимера для мягких материалов экструзионного назначения до 80 долей на 100 частей полимера для пластизольей. При сухом смешении в процессе приготовления экструзионных марок пластифицированного поливинилхлорида важно, чтобы пластификатор полностью адсорбировался так, чтобы в итоге получился сухой материал. При переработке и транспортировке не вполне сухого материала могут возникнуть определенные трудности.

Эффективность адсорбции пластификатора связана со скоростью нагревания смеси с маркой полимера, со средним размером частиц и распределением частиц по размерам, с отношением поверхности к объему и типом пластификатора. Определенное влияние на адсорбцию пластификатора оказывают также различные добавки, такие как, например, наполнители.

Для исследования поглощения пластификатора полимером предложены три основных метода:

- 1) исследование адсорбции по методу «бюретки»;
- 2) исследования адсорбции пластификатора с помощью реометра крутящего момента;
- 3) исследование адсорбции под действием центробежной силы.

12.2.1. Адсорбция пластификатора – Метод «бюретки»

Это быстрый и простой метод, позволяющий определить способность полимера адсорбировать пластификатор в стандартной лабораторной атмосфере. Для испытаний используется бюретка со срезанным наконечником для увеличения скорости течения, титровальный стенд, стоящий на глазурованной керамической подставке, шпатель и весы. Бюретка заполняется ДОФ (ди-2-этилнексилфталатом) технического назначения. Далее берется образец полимера весом $5 \pm 0,1$ г, который помещается точно под концом бюретки на керамическую плитку. Небольшое количество пластификатора капают на полимер и аккуратно растирают шпателем по всему объему. Далее добавляется еще несколько капель пластификатора и т. д. до тех пор, пока не будет достигнута точка текучести. Под точкой текучести понимают такое состояние полимера с введенным в него пластификатором, при котором под давлением шпателя образец начинает растекаться.

Эксперимент повторяется в полном объеме для того, чтобы убедиться в воспроизводимости полученного результата.

Расчет проводится по следующей формуле:

$$\text{Пластификатор} = \frac{\text{Пластификатор (в см}^3\text{)} \times 100 \times \text{Плотность пластификатора}}{5}$$

(частей на
100 частей
полимера)

12.2.2. Исследования адсорбции пластификатора с помощью реометра крутящего момента

Этот метод используется для определения характеристик процесса смешения поливинилхлорида с пластификатором. Функции реометра и измеряемые параметры описаны в разделе 12.1.

Для испытаний используется сигмообразная смесительная головка, показанная на рис. 12.4.

Камера смесителя нагревается либо электрическим током, либо с помощью термостатирующей жидкости, циркулирующей в кожухе прибора. Для получения сопоставимых результатов используется следующая стандартная рецептура:

полимер	$225 \pm 0,1$ г
глинозем	$40 \pm 0,1$ г
пластификатор	$124 \pm 0,1$ г

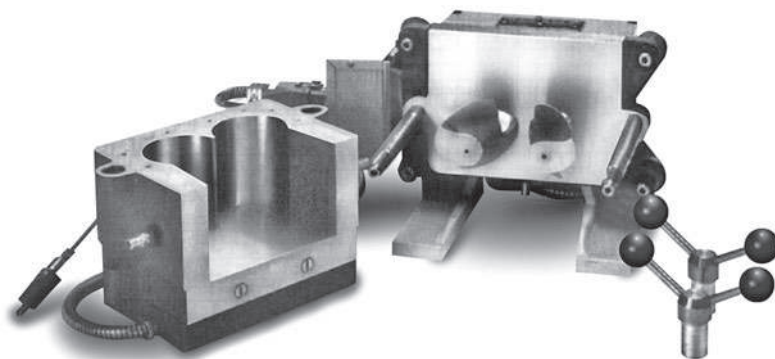


Рис. 12.4. Реометр с сигмообразной смесительной головкой (с разрешения *C.W. Brabender Instruments, Inc.*)

Поскольку свойства глинозема и пластификатора меняются от партии к партии, рекомендуется, чтобы в лаборатории хранился достаточно большой запас этих веществ, что позволяет проводить испытания в стандартных условиях. Далее необходимо получить базовую кривую, характеризующую режим смешения, которая была получена на стандартной рецептуре. Эта кривая должна храниться в лаборатории и использоваться как эталон для сравнения с остальными экспериментальными данными.

Рекомендуется использовать следующие стандартные условия испытаний:

температура	$88 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
скорость вращения ротора	$60 \pm 1 \text{ об/мин}$.

Все ингредиенты, за исключением пластификатора, загружаются в контейнер и тщательно перемешиваются. Смеситель предварительно нагревается, ротор вращается в течение 30 мин с заданной скоростью, что обеспечивает равновесные условия. Все сухие компоненты загружаются в рабочую камеру смесителя, где подвергаются перемешиванию в течение 5 мин. Затем пластификатор быстро выливается в камеру смесителя. Вращение ротора продолжается в течение 10 мин после «сухой точки».

На рис. 12.5 показан график, иллюстрирующий ход процесса смешения в целом.

Крутящий момент резко возрастает в точке T_1 , в которой в смесь вводят пластификатор. При этом происходит относительное перемещение влажных комков материала. По мере того как пластификатор проникает в полимер и наполнитель, механизм движения сменяется на свободное течение порошкообразных частиц. При этом крутящий момент снижается до критической точки T_2 , которая трактуется как «сухая точка». Смешение в режиме течения порошка происходит между линиями, отвечающими точкам T_1 и T_2 (рис. 12.5), то есть в течение времени $T_2 - T_1$.

В альтернативном варианте испытаний по этому методу сигмообразная смесительная головка может заменяться на планетарную головку.

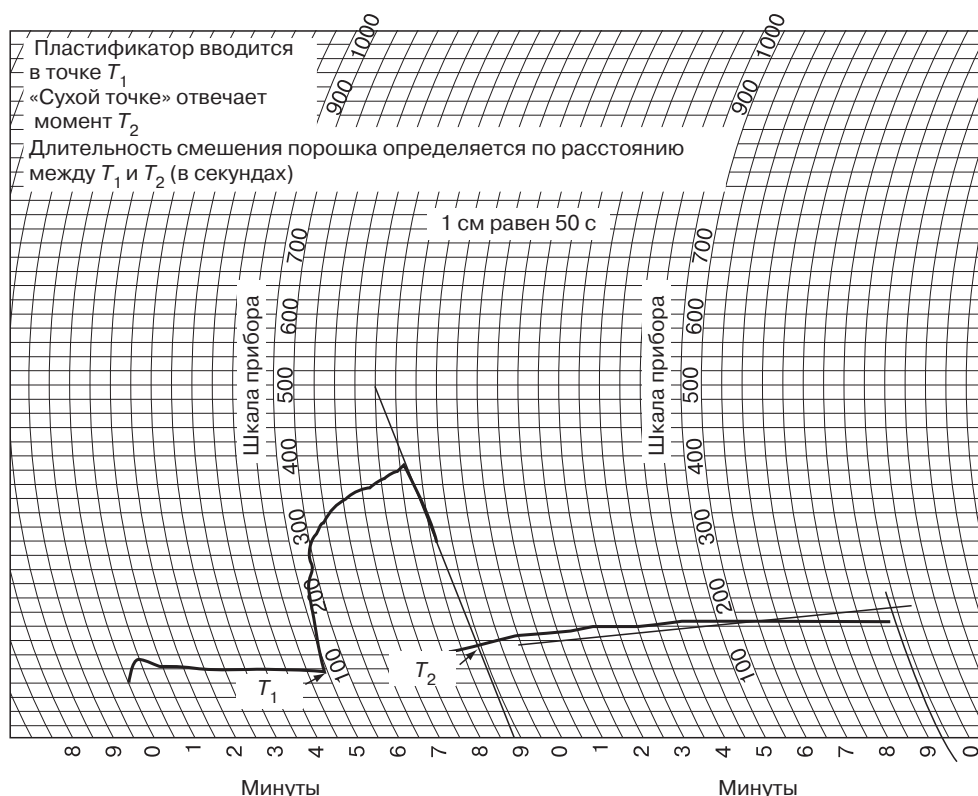


Рис. 12.5. Процесс смешения порошков (воспроизведено с разрешения ASTM)

12.2.3. Исследование адсорбции под действием центробежной силы (ASTM D3367, ИСО 4608)

Этот метод позволяет получить количественную оценку адсорбции пластификатора поливинилхлоридом под действием контролируемой центробежной силы. Методика измерений состоит в том, что небольшое количество полимера ($0,500 \pm 0,050$ г) помещают в перегороденную пластиковую трубку, отверстие которой закрыто тканью. Затем 1 мл пластификатора (например, ДОФ) вводится в трубку. Поливинилхлорид с введенным в него пластификатором подвергается действию центробежной силы при вращении со скоростью 3000 об/мин в течение 40 мин. Пластификатор, не поглощенный полимером, отжимается при центрифугировании через отверстие в трубке, а ткань, прикрывающая отверстие, препятствует выбрасыванию из трубки частичек полимера.

После завершения центрифугирования трубка тщательно взвешивается, и рассчитывается процент поглощенного пластификатора по разности весов — начального и после центрифугирования.

12.3. Определение вязкости методом «чаши»

Как это следует из названия, этот метод основан на использовании измерительного сосуда, сделанного в форме чаши. На его дне установлена насадка (капилляр), через которую исследуемая жидкость вытекает под действием силы тяжести. Измеряется время истечения фиксированного объема. В идеальном случае этот метод позволяет определить кинематическую вязкость жидкости, которая зависит от ее удельного веса. Однако этот метод условный и не позволяет найти истинное значение вязкости.

Тем не менее, метод «чаши» хотя и не дает точных значений вязкости, является простым и практически удобным методом сравнительных испытаний, которые проводятся в строго одинаковых условиях [2, 3].

В технологии пластизоль имеет место операция окунания в жидкость: предварительно разогретая форма окунается в пластизоль и выдерживается в погруженном состоянии в течение заданного времени. Затем форма вынимается, и готовое изделие с нее снимается. По мере протекания процесса вязкость пластизоля заметно снижается. Изменения вязкости в ходе технологического процесса в сильной степени влияет на внешний вид и толщину покрытия, образующегося на форме. Вязкость пластизоль традиционно измеряется с помощью метода «чаши», что позволяет вносить определенные коррективы в состав композиции.

Наиболее широко распространена методика измерения вязкости по этому методу с помощью чашечного вискозиметра *Zahn'a* (рис. 12.6).



Рис. 12.6. Чашечный вискозиметр *Zahn'a* (с разрешения *Byk-Gardner USA*)

Методика испытаний состоит в том, что чаша просто погружается в пластизол или иную исследуемую жидкость. Далее измеряется интервал времени (в секундах) от момента вытаскивания чаши из жидкости до того, как струя, выходящая из насадка, разорвется. Вискозиметры *Zahn*'а со сменными насадками различного диаметра могут использоваться для измерений вязкости в широком диапазоне ее значений.

Известны и иные конструкции чашечных вискозиметров, например чаши *Shall*'а и *Ford*'а [4].

12.4. Испытания на прочность при разрыве

Пластмассы используют в очень многих устройствах, где они подвергаются воздействию внутреннего давления при транспортировке жидкостей. Типичные примеры пластмассовых аппаратов, работающих под внутренним давлением — трубы, фитинги, клапана, емкости и контейнеры.

Для испытаний таких устройств на прочность применяют два подхода:

- 1) кратковременные испытания на разрыв;
- 2) долговременные испытания.

12.4.1. Кратковременные испытания на разрыв (*ASTM D1599*)

Этот метод испытаний призван охарактеризовать сопротивление разрушению пластмассовых изделий, подвергаемых кратковременному воздействию внутреннего давления. При транспортировке жидкостей часто возникают гидравлические удары. Это явление представляет собой резкое возрастание давления, обусловленное либо внезапным скачком объемного расхода, либо неожиданной остановкой течения в линии.

В таких случаях аппарат подвергается очень высокому внутреннему давлению, действующему в течение короткого периода времени. Прочность при кратковременных скачках внутреннего давления определяется при гидравлических испытаниях сосуда, находящегося в контролируемой окружающей среде при заданной температуре, в условиях непрерывного повышения давления до момента наступления разрушения изделия.

Для проведения испытаний используется прибор такого типа, как показанный на рис. 12.7. Для контроля давления используется система, показанная на рис. 12.8.

Описанная аппаратура очень проста. Для ее использования требуются только установки для подачи воздуха и воды (или иной подходящей жидкости). Методика эксперимента состоит в постепенном повышении давления до того момента, когда наступит разрыв.

Согласно требованиям стандарта *ASTM D1599*, время до разрушения должно лежать в пределах 60–70 с. Гидравлическая система перед каждым испытанием должна заполняться с осторожностью так, чтобы избежать попадания в линию воздушных пузырьков. За момент разрушения принимается образование трещины, разрыва или появление утечек.

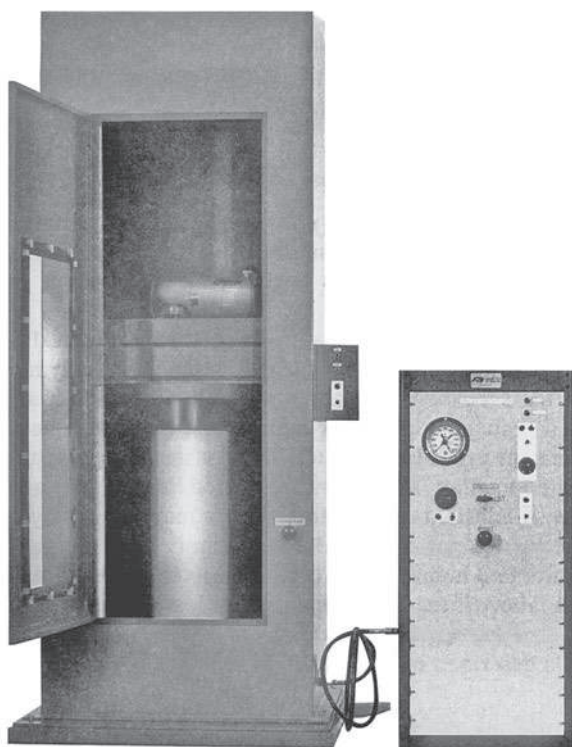


Рис. 12.7. Прибор для кратковременных испытаний на разрыв (с разрешения *Applied Test Systems, Inc.*)



Рис. 12.8. Система контроля давления

Напряжение на наружной поверхности трубы рассчитывается по формулам:

$$S = \frac{P(D-t)}{2t} \text{ или } S = \frac{P(d+t)}{2t},$$

где S — напряжение на внешней поверхности трубы, фунт/дюйм²; P — внутренне давление, фунт/дюйм²; D — среднее значение наружного диаметра, дюйм; d — среднее значение внутреннего диаметра, дюйм; t — минимальная толщина стенки, дюйм.

Напряжение на внешней поверхности — это окружное напряжение, возникающее в наружных слоях изделия цилиндрической формы под действием внутреннего или внешнего давления.

12.4.2. Долговременные испытания на разрыв (ASTM D1598)

Под долговременной прочностью при разрыве понимают разрушение сосуда под действием постоянного внутреннего давления, происходящее через определенное время после создания давления. Этот метод представляет статические испытания в противоположность динамическим испытаниям при кратковременном действии давления.

Для проведения этих испытаний используется аппаратура, показанная на рис. 12.9.

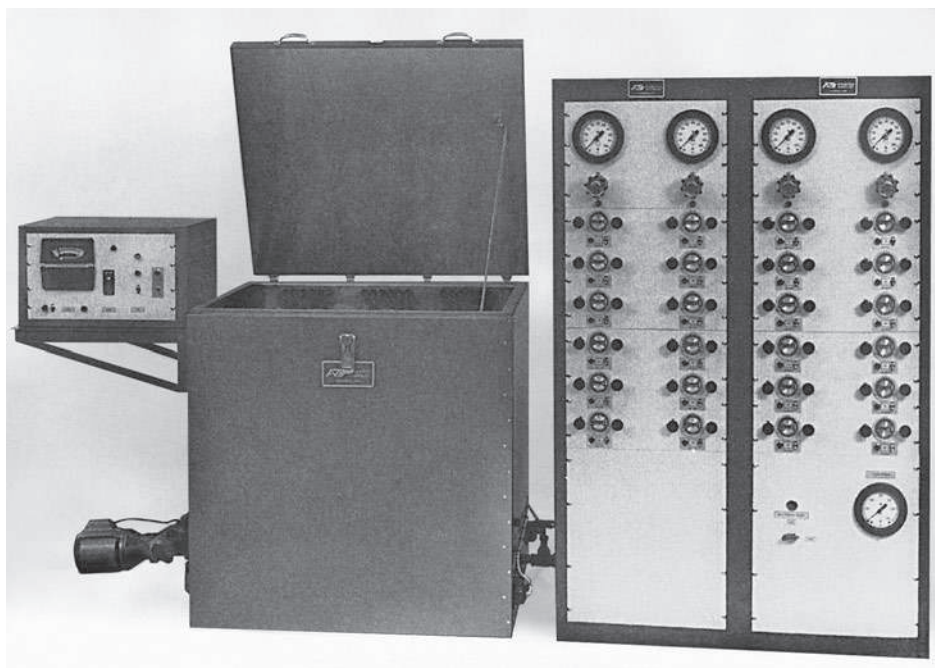


Рис. 12.9. Аппаратура для долговременных гидравлических испытаний (с разрешения *Applied Test Systems, Inc.*)

Аппаратура состоит из системы создания и поддержания заданного внутреннего давления, манометра и встроенного таймера, который определяет время до разрушения с высокой точностью. В сосуд заливается жидкость или он заполняется газом, и создается требуемое давление. Таймер включается в момент, когда давление достигнет заданного уровня. Если это необходимо, то может быть использована система термостатирования. Испытания должны проводиться в стандартной лабораторной атмосфере, поскольку любые колебания температуры и влажности могут весьма резко сказаться на получаемых результатах.

Момент разрушения образцов фиксируется по падению давления, появлению разрывов и утечек, ненормальному вздутию сосуда. Напряжения на внешней поверхности рассчитываются по формулам, приведенным в предыдущем разделе.

12.4.3. Определение допустимых напряжений при долговременном действии гидростатического давления

Институт труб из пластмасс (*Plastic Pipe Institute, PPI*), принадлежащий Обществу промышленности полимеров (*Society of Plastics Industry, SPI*), разработал метод предсказания долговременной прочности пластмассовых труб, находящихся под действием гидравлического давления. За характеристику допустимого напряжения принимается то действующее непрерывно давление, при котором в данных условиях окружающей среды, с большой долей уверенности не происходит разрушение трубы. При этом определяется максимальное непрерывно действующее давление среды в трубе, при создании которого труба наверняка выдерживает это давление без разрушения.

Долговременное предельно допустимое напряжение получается экстраполяцией зависимости напряжения от времени (долговечности), как это описано в разделе 12.4.2.

Ниже описана последовательность шагов, которые приводят к определению этого напряжения.

Образцы пластмассовых труб подвергают воздействию постоянного гидростатического давления при варьировании его уровня и находят предельное время, через которое труба разрушается при различных напряжениях. Напряжение для каждого образца рассчитывается исходя из формулы, которая применима в диапазоне размеров труб от 0,5 до 48 дюймов:

$$S = \frac{Pd}{2t},$$

где S — напряжение на внешней поверхности трубы, фунт/дюйм²; P — внутренне давление, фунт/дюйм²; d — средний диаметр, дюйм; t — средняя толщина стенка, дюйм.

Испытания образцов продолжаются до 10 000 ч в установленных условиях. Зависимость напряжения от времени до разрыва строится в логарифмических координатах, в результате чего получается линейный график (рис. 12.10).

Экспериментальные данные по зависимости напряжения на внешней поверхности трубы от времени до разрушения анализируются методами статистического

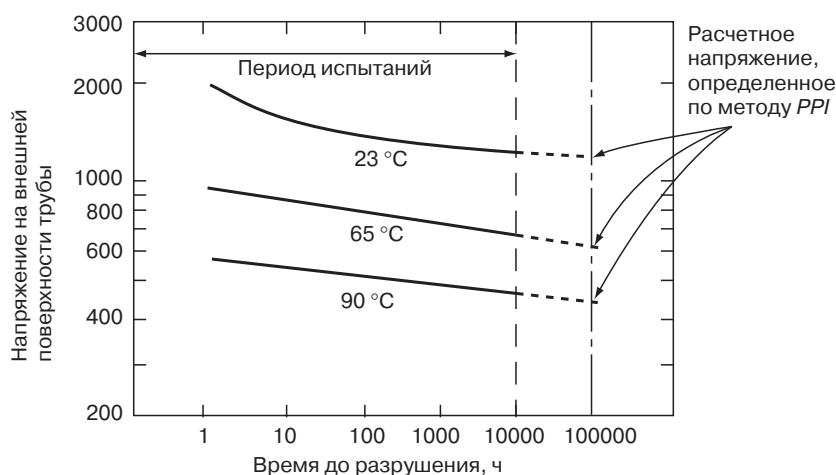


Рис. 12.10. Зависимость напряжения на внешней поверхности трубы от времени до разрушения (воспроизведено с разрешения McGraw-Hill Company)

регрессионного анализа, что позволяет описать их математическим уравнением. Это уравнение экстраполируется на один десятичный порядок по времени, то есть до 100 000 ч (примерно 11,5 лет), что позволяет получить расчетное напряжение, отвечающее этому времени.

Далее общий интервал шкалы напряжений разбивается на несколько участков, каждый последующий из которых соответствует напряжению, примерно на 25% большему предыдущего. Эти инкременты отвечают значениям 80, 1200, 1600, 2000, 2500, 3200, 4000 фунт/дюйм² и т. д. Для каждого материала устанавливается предельное значение этого инкремента, которое отвечает долговечности в 100 000 ч. Рабочие напряжения рассчитываются исходя из некоторых фундаментальных значений, которые называют базисом для гидростатических расчетов.

Для того чтобы из базисных значений напряжения получить допустимые уровни, вводят коэффициенты запаса, которые зависят от температуры и реальных условий эксплуатации трубы. Это значение допустимого напряжения подставляется в уравнение для расчета допустимого давления или определения необходимой толщины стенки трубы при заданном давлении.

Типичные значения коэффициентов запаса таковы:

для перекачки воды	при 23 °C	— 0,5;
для перекачки воды	при 38 °C	— 0,4;
для транспортировки природного газа при классе месторасположения трубы 1		— 0,32.

Хотя описанный метод был первоначально разработан для расчета пластмассовых труб, работающих под давлением, его применение не ограничено только областью

пластмассовых труб, и он может применяться для расчета других сосудов, изготовленных из разных материалов, работающих под давлением.

Рассмотренный метод детально обсужден в стандартах *ASTM D2837*, *ASTM D2892* и рекомендациях *PPI TR3*.

12.5. Испытания на разрушение («краш-тест»)

Изделия из пластмасс часто подвергаются действию сжимающих нагрузок. Данные по прочности при сжатии, полученные при испытаниях на стандартных испытательных машинах (см. раздел 2.4), как правило, недостаточны для предсказания поведения материалов при разрушении в условиях сжатия. Способность изделий сопротивляться действию сжимающих нагрузок зависит от многих факторов, таких как остаточные напряжения, конструкция изделия и условия его формирования.

Был предложен простой метод испытания на сжатие изделий, полученных литьем под давлением или экструзией: это сжатие между двумя параллельными плоскостями. Для этого используется прибор «краш-тестер» (рис. 12.11).



Рис. 12.11. Прибор для испытаний на сжатие — «краш-тестер» (с разрешения *Testing Machines, Inc.*)

Этот прибор состоит из привода с регулируемой скоростью, двух параллельных пластин, одна из которых установлена стационарно, и датчика усилий, измеряющего приложенную силу. Для измерения степени сжатия используется цифровой индикатор. Иногда используют прибор более современной конструкции, показанный на рис. 2.21.

Эксперимент осуществляется достаточно просто: испытуемый образец помещается между параллельными пластинами, которые сжимают его до тех пор, пока не произойдет разрушение. За условие разрушения принимается момент, когда образец действительно разрушается или в нем появляется трещина. Довольно часто условие достаточной прочности при сжатии формулируется так: «Изделие не должно разрушаться или в нем не должны образовываться трещины при сжатии на 10% от его первоначального размера».

Краш-тест используется как рутинный метод оценки качества. В стандарте *ASTM D2412* предлагается метод оценки прочности пластмассовых труб при сжатии внешней силой путем их сдавливания между параллельными плоскостями.

12.6. Метод погружения в ацетон (*ASTM D2152*)

Этот метод был предложен для оценки качества труб и фитингов, изготовленных из жесткого поливинилхлорида по их реакции на погружение в безводный ацетон. Воздействия безводного ацетона на плохо приготовленную композицию приводит к набуханию полимера, образованию хлопьев или полному разрушению образцов. Если же композиция на основе поливинилхлорида была приготовлена по правильной технологии, то такой материал нечувствителен к воздействию безводного ацетона, так что полимер либо вообще не набухает в ацетоне, либо набухает в очень незначительной степени.

Эксперимент состоит в том, что небольшие кусочки поливинилхлорида, отрезанные от отливки или экструдированного изделия, помещают в чистый ацетон и выдерживают в нем в течение 20 мин, после чего оценивают результат. Присутствие остатков воды в ацетоне снижает эффективность его воздействия, так что ацетон должен быть высушен путем встряхивания в смеси с безводным сульфатом кальция, который затем удаляется из ацетона фильтрацией. Контроль качества поливинилхлоридных композиций путем погружения образцов в ацетон используется в повседневной практике многими производителями труб и фитингов из этих материалов.

12.7. Метод погружения в уксусную кислоту (*ASTM D1939*)

Этот метод распространяется на оценку остаточных напряжений в отливках или экструдированных изделиях из АБС-пластиков. Он состоит в том, что образцы погружают в ледяную уксусную кислоту. О наличии больших остаточных напряжений

свидетельствует образование трещин после выдержки образцов. Этот метод очень полезен для оценки качества изделий из АБС-пластика, которые предназначены для использования в качестве печатных плат. Технология использования таких плат требует, чтобы в них отсутствовали остаточные напряжения. Поэтому многие производители используют метод погружения образцов из АБС-пластиков в ледяную уксусную кислоту как контрольный тест на качество изделий.

Методика испытаний состоит в том, что изделия из АБС-пластика, безотносительно их размера, погружают в химически чистую ледяную уксусную кислоту на 30 с. Немедленно после этого испытуемые изделия вынимаются, промываются в токе чистой воды и высушиваются. Далее образцы рассматриваются на предмет образования в них трещин. После этого те же самые или новые изделия погружаются в кислоту дополнительно на 90 с и на 2 мин. После промывки водой и сушки образцы снова рассматриваются для обнаружения трещин. За меру остаточных напряжений принимается время выдержки в уксусной кислоте до появления первых трещин и интенсивность их образования.

12.8. Испытания изделий

Несмотря на многочисленные случаи разрушения полимерных изделий при их применении и увеличивающееся количество проблем, связанных с оценкой надежности изделий, производители продолжают пренебрегать необходимостью испытаний именно готовых изделий. Слишком много доверия оказывается испытаниям сырья, слишком много обвинений предъявляется поставщикам сырья по поводу качества продукции, и слишком мало осознается необходимость испытания готовой продукции. Все производители, как малые, так и крупные, достаточно хорошо оснащены современными методами контроля качества и в целом вполне готовы к тому, чтобы их продукция удовлетворяла стандартным методам контроля.

Полимерные материалы получают в строго определенных условиях при контроле всех необходимых параметров. Но при переработке полимерных материалов такой контроль отсутствует. Так, например, при литье под давлением изделий из пластмасс существует шесть основных и множество более мелких факторов, которые влияют на качество изделий. К их числу относятся: температуры материала, давление, температура формы, соотношение вторичного и первичного материалов в сырье, скорость литья и скорость заполнения формы. Слишком высокая температура расплава может привести к деструкции с последующей быстрой потерей требуемых физических свойств. Даже прекрасное качество сырья не спасает положение, если его переработка ведется в неудовлетворительном режиме.

Данные о свойствах материала получаются при лабораторных испытаниях образцов конкретного размера, проводимых в строго контролируемых условиях. К сожалению, реальный процесс литья не происходит точно в таких же идеализированных условиях, причем внешние параметры могут изменяться весьма значительно. Поэтому данные лабораторных испытаний в целом имеют весьма незначительное значение для характеристики свойств готовых изделий. Качество этих изделий не может

оцениваться на основании данных относительно свойств сырья, предоставляемых его производителями, без того, чтобы правильно оценить роль технологии литья.

Еще одним важным фактором, который необходимо учитывать, являются остаточные напряжения, обычно присутствующие в готовых изделиях. Их величина зависит от геометрии изделий, конструкции формы и параметров технологического процесса. Эти напряжения, если не устранить их путем отжига, могут привести к короблению и неожиданному разрушению изделий.

Из вышесказанного видна необходимость испытаний готовых изделий, поступающих в продажу. Испытание изделий обладает многочисленными преимуществами. Во-первых, это защищает потребителя от неожиданностей в виде разрушения изделия и вызванных этим травм. Производитель также защищен от проблем, касающихся гарантий качества изделий. Во-вторых, это является проверкой для производителя относительно надежности технологического процесса. И что еще более важно, это предотвращает ненужное недопонимание между поставщиком изделий и потребителем. Требования, которые потребитель предъявляет к готовому изделию в процессе его испытаний, позволяет производителю лучше представить себе, что хочет потребитель, и гарантировать поставку качественного продукта. Как мы все хорошо знаем, то, что изделие выглядит внешне вполне качественным, совсем не гарантирует, что оно обладает требуемыми физическими свойствами. Такие свойства могут быть проверены только в ходе испытаний готового изделия.

Существуют многочисленные способы контроля качества готовых изделий. Ниже приводится краткий перечень обычных испытаний, применяемых для этой цели:

- моделирование реальных условий эксплуатации (функционального применения) изделия;
- испытания на удар;
- испытания на кручение (сдвиг);
- краш-тест;
- испытания на растяжение;
- воздействие химическими агентами.

Многие компании разработали свои собственные методики испытаний готовых изделий, моделирующие реальные условия их применения. Это требует использования подходящего испытательного оборудования и квалифицированного персонала. Измерение энергии, затрачиваемой на разрушение изделия, представляется одним из лучших методов испытаний на долговременную прочность изделия. Этот подход к оценке качества изделия должен дополняться испытаниями на удар и краш-тестом. Вместе с тем испытания на сопротивление ударной нагрузке предпочтительнее по сравнению с краш-тестом.

Испытания на кручение часто используют для контроля качества изделий, имеющих нарезку. Методика этих испытаний очень проста: для этого требуется иметь только калиброванный гаечный ключ и устройство для установки изделия.

Испытания на растяжение состоят в том, что измеряется усилие, необходимое для того, чтобы растащить два соединенных между собой изделия.

На рис. 12.12 и 12.13 показаны, соответственно, прибор для испытаний на кручение и недорогое приспособление для испытания на растяжение.



Рис. 12.12. Тестер для испытаний на кручение (с разрешения *Mountz, Inc.*)

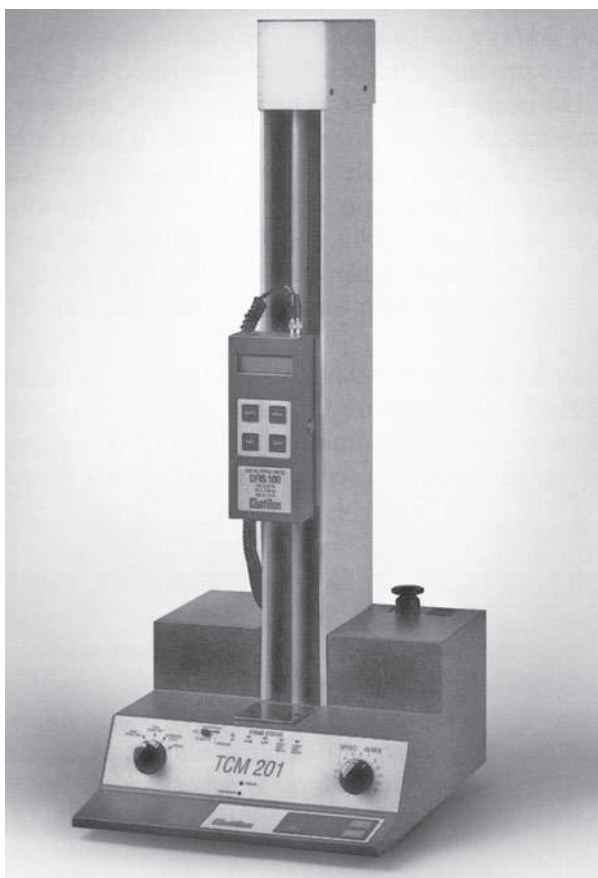


Рис. 12.13. Тестер для испытаний на растяжение (с разрешения *John Chatillon and Sons, Inc.*)

Испытания на воздействие химических реагентов, таких как ацетон и уксусная кислота (см. выше разделы 12.6 и 12.7), очень полезны для контроля технологического процесса.

Многие готовые изделия сами по себе являются инструментами. Поэтому следует с особой осторожностью подходить к их испытаниям для того, чтобы быть уверенным, что эти изделия пригодны для использования и результаты их испытаний воспроизводимы. Во всех случаях, когда это возможно, для испытаний следует использовать промышленно выпускаемое оборудование и при этом следует выполнять предлагаемые методические указания.

12.9. Определение зольности (ASTM D2584, ISO 3451)

Этот метод предназначен для определения содержания в полимерном материале неорганических инертных компонент, используемых как наполнители или армирующие элементы, таких как минералы и стекло. Методика измерений основана на измерениях потери веса термопластичного полимера при его нагревании и горении, при котором выгорают все органические соединения.

Для проведения этих испытаний необходимо иметь небольшую навеску, порядка 2 г, в форме порошка или гранул. Образец взвешивают с высокой точностью и помещают в предварительно высушенный тигель, который устанавливают в муфельную печь, где создается температура 600 °C, и выдерживается там до тех пор, пока не выгорит весь полимер. После этого тигель охлаждается в эксикаторе, по крайней мере, в течение 30 мин. Разница в весе между первоначальным образцом и образцом после выгорания полимера определяет потери веса, и отсюда рассчитывается процентное содержание добавок в полимерной композиции. Остающаяся зола рассматривается под микроскопом, что позволяет разделить ее на минеральную и стеклянную части.

Типичный пример аппаратуры для определения зольности показан на рис. 12.14.

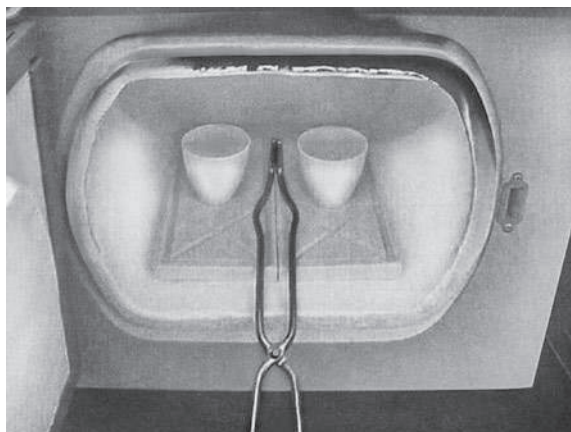


Рис. 12.14. Аппаратура для определения зольности (с разрешения *Plastics Technology Laboratory, Inc.*)

Литература

1. Mentovay L.W. and Yasenchak L.P. «Capillary Flow Analysis» *Plast. Design and Processing* (March 1973), p. 18.
2. Technical literature, *Catalog Section C, Rheology*, Gardner Laboratory, Silver Spring, MD, Sept. 1976.
3. Sward G.G. «Paint Testing Manual» *Am. Soc. for Testing and Materials* Philadelphia, PA, 1972, pp. 181–185.
4. *Ibid.*, pp. 184–185.
5. «Design Guide» *Modern Plastics Encyclopedia*, McGraw-Hill, New York, 1979–1980.

Общие источники

1. Technical Literature on *Torque Rheometer*, C.W. Brabender Instruments, Inc. South Hackensack, NJ.
2. Park R.A. «Characterizing Fluid Plastics by Torque Rheometer» *Plast. Eng.* (Nov. 1976), p. 59.
3. Allen E.O. and Willium R.F. «Prediction of Polymer Processing Characteristics Using C.W. Brabender Plasticorder Torque Rheometer» *SPE ANTEC* (1971), p. 587.

13. Идентификация полимеров

13.1. Введение

Изделия из пластмасс производятся из различных материалов, используя разнообразные технологии. Практически невозможно идентифицировать материал на основе визуальной оценки или данных простых механических испытаний. При этом существует множество причин, которые побуждают идентифицировать полимер. Одна из наиболее часто встречающихся — это желание установить, из какого материала сделано конкурирующее изделие. Кроме того, дефектные изделия, возвращаемые изготовителю, часто требуют надежного определения их происхождения. Иногда бывает необходимо проверить, действительно ли заявленный материал был использован. Производитель материалов из вторичного сырья также испытывает необходимость определить, какой материал он получает из различных источников. Довольно часто к переработчику попадают большие количества сырья с утерянной идентификационной маркой, или же на складе хранится материал без надлежащей этикетки. Во всех этих случаях даже начальные знания о методике идентификации полимеров помогут сэкономить время и деньги.

Иногда и у потребителя готовых изделий может возникнуть желание проверить, отвечает ли использованный материал заявленному типу полимера, и в этом случае можно провести простейшую идентификацию материала. Создание новых материалов также требует развития методов идентификации.

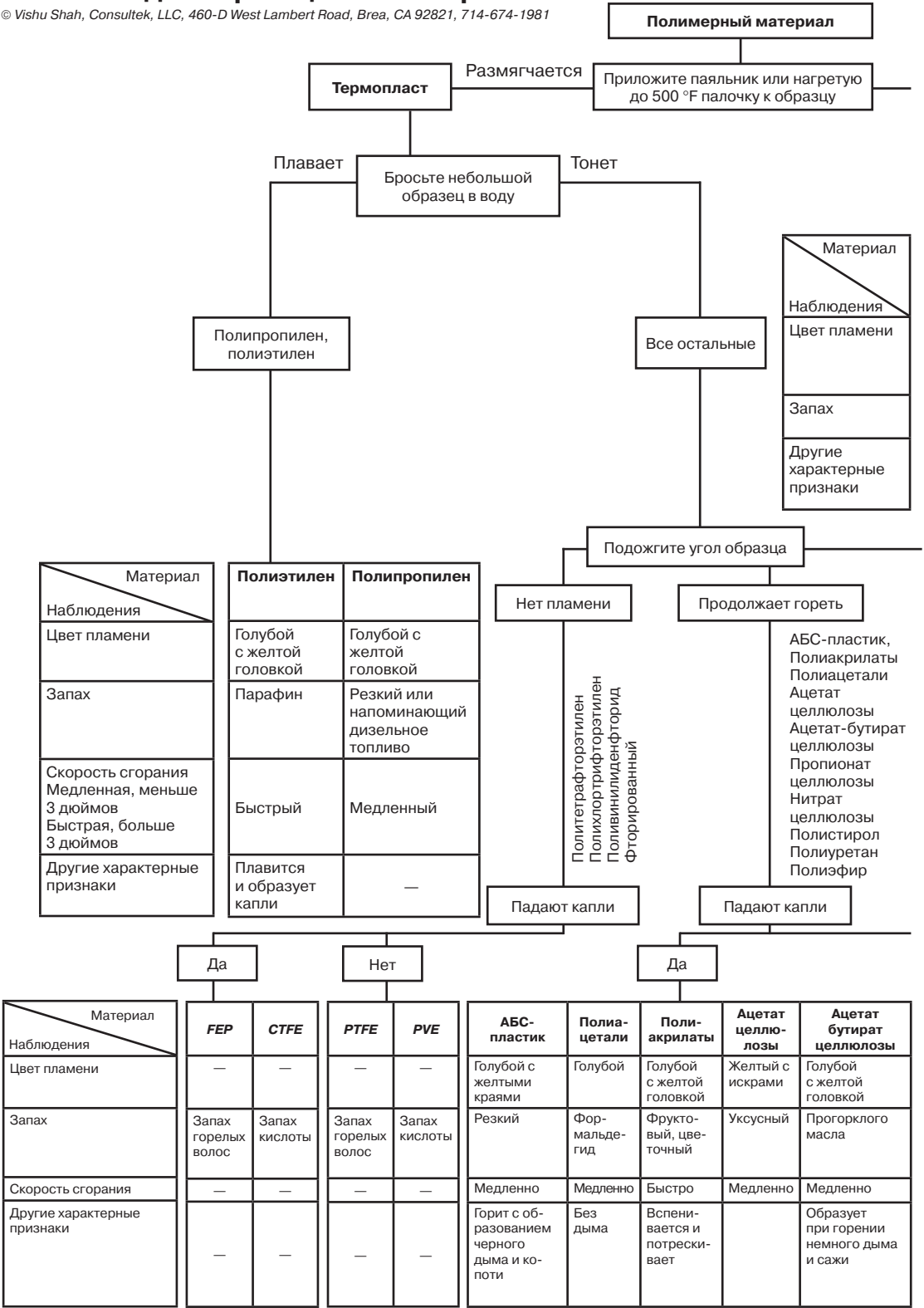
Существуют два подхода к идентификации полимерных материалов. Первый из них достаточно прост, выполняется быстро и недорого. Он требует очень простого инструментария и совсем небольшого объема знаний о полимерах. Второй метод основан на выполнении систематического химического и термического анализа. В этом случае используется сложная экспериментальная техника; этот подход требует больших затрат времени и денег, а интерпретация получаемых результатов доступна только профессионалу, хорошо знакомому с химией полимеров.

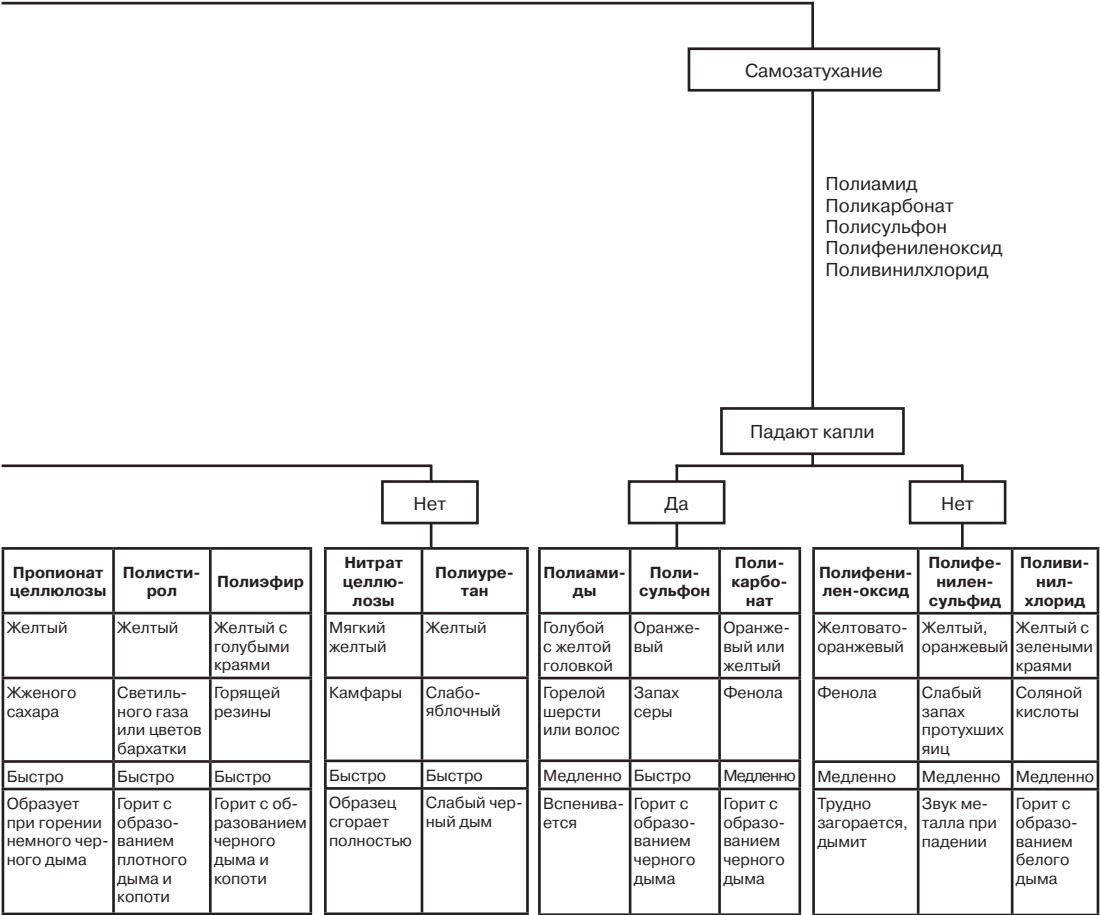
Полимерные материалы часто представляют собой сополимеры, смеси, а их свойства модифицируются использованием различных добавок или смешением с такими компонентами, как огнезащитные добавки, пенообразователи, лубриканты и стабилизаторы. В этих случаях простейшие методы идентификации не дадут удовлетворительных результатов. Единственный путь к получению правильных результатов состоит в использовании сложных химических и термических методов анализа.

Первый из указанных подходов основан на использовании последовательного исключения возможных вариантов с помощью простейших испытаний. Он представлен в Системе Идентификации полимеров (*Plastics Identification Chart*), показанной ниже.

Система идентификации полимеров

© Vishu Shah, Consultek, LLC, 460-D West Lambert Road, Brea, CA 92821, 714-674-1981





Существуют несколько основных указаний, которыми следует руководствоваться для того, чтобы упростить идентификацию полимера.

Прежде всего следует установить, является ли испытуемый полимер термопластом или относится к классу термореактивных смол. Это разделение на основные типы полимеров достаточно просто осуществить, приложив к образцу нагретый паяльник или горячую палочку при температуре порядка 500 °F. Если при этом материал размягчится, то это — термопласт. Если нет, то — реактопласт (термореактивная смола).

Следующий шаг — это испытание на горение. Для поджигания образцов желательно использовать бунзеновскую горелку, дающую бесцветное пламя. Вместо нее можно использовать просто зажигалку. Однако следует разделять запах от горящего газа в горелке и запах, образующийся при горении полимера. Прежде чем начинать испытания на горение рекомендуется приготовить следующий вопросник, на который надо будет отвечать по результатам испытаний.

1. Горит ли материал?
2. Каков цвет пламени?
3. Как пахнет горящий материал?
4. Образуются ли капли при горении материала?
5. Тип и цвет образующегося дыма?
6. Образуется ли копоть в процессе горения?
7. Является ли материал самозатухающим или продолжает гореть после удаления источника пламени?
8. Происходит ли горение быстро или медленно?

Для того чтобы идентифицировать материал, сравните ваши наблюдения с оценками, приведенными в Системе идентификации полимеров. Надежность полученных результатов может быть существенно улучшена, если провести параллельные испытания известного материала. При осуществлении процедуры идентификации полимеров не следует забывать о соблюдении правил техники безопасности. Капли, падающие с горящего образца, могут быть очень горячими и легко прилипать к любой поверхности. После того как образец потухнет, очень осторожно удалите дым. Некоторые пластмассы, например полиацетали, при горении образуют токсичный формальдегид, который, попадая в дыхательные пути, вызывает ощущение жжения.

Результаты описанных выше простых тестов на идентификацию полимера должны быть в дальнейшем подтверждены следующими испытаниями:

- определением точки плавления;
- оценкой растворимости;
- испытанием медной проволокой;
- измерением удельного веса.

13.1.1. Определение точки плавления

Известен ряд методов определения температуры плавления полимеров.

В первом из них используется прибор Фишера–Джонса, показанный на рис. 13.1. Этот метод наиболее широко используется в настоящее время.

Прибор состоит из нагревательного блока, температура в котором контролируется реостатом, термометра и увеличительной линзы. Небольшая гранула или щепотка полимера помещается в электрически обогреваемый блок вместе с несколькими каплями силиконовой жидкости. Образец накрывается покровным стеклом, и температура постепенно поднимается до тех пор, пока полимер не расплавится или не размягчится достаточно, чтобы он мог легко деформироваться.

Мениск, образованный силиконовой жидкостью, хорошо виден через увеличительное стекло. Температура, при которой происходит смещение мениска, принимается за температуру плавления. Ожидаемая точность метода составляет $\pm 5^\circ\text{F}$ по сравнению с литературными данными.

Этот метод применим как к кристаллическим, так и к аморфным полимерам. Для любых кристаллических полимеров точка плавления выражена достаточно резко, так что переход фиксируется очень легко. Аморфные полимеры, напротив, размягчаются в широком диапазоне температур, что затрудняет определение их точки плавления.

Второй метод, известный под названием метода Кофлера, используется только для частично кристаллических полимеров. В этом методе образец помещается на нагреваемый предметный столик микроскопа, а полимер рассматривается через скрещенные поляриды. Когда полимер плавится, исчезает характерное двойное лучепреломление, обусловленное присутствием кристаллических образований. Температура, при которой двойное лучепреломление (обычно в виде всех цветов радуги) полностью исчезает, принимается за температуру плавления.

На рис. 13.2 показан прибор, предлагаемый на рынке, в котором использован этот метод определения температуры плавления.

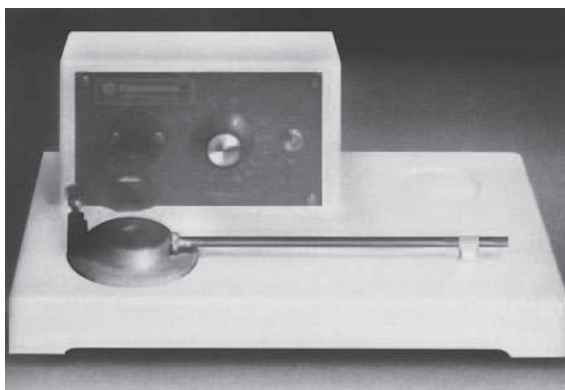


Рис. 13.1. Прибор для определения температуры плавления по методу Фишера–Джонса (с разрешения *Fisher Scientific Company*)



Рис. 13.2. Прибор для определения температуры плавления по методу Кюфлера (с разрешения CEAST USA)

13.1.2. Определение растворимости

Отношение полимера к тому или иному растворителю часто указывает на тип материала. Данные по растворимости, которые можно найти в литературе, имеют слишком общий характер, и, следовательно, их довольно трудно применить в конкретных условиях. Частичная растворимость некоторых полимеров в различных растворителях, а также высокая концентрация различных добавок, таких как пластификаторы, также затрудняют идентификацию полимера по его растворимости. Тем не менее тест на растворимость может оказаться очень полезным для установления разницы между различными производными одного и того же базового полимера.

Например, этим методом можно отличить ацетат целлюлозы от ацетат-бутирата целлюлозы, поскольку ацетат полностью растворим в фурфуроловом спирте, а бутират растворим лишь частично [1]. Аналогичным образом можно идентифицировать различные типы полиамидов и полистиролов.

Тест на растворимость наиболее удобно проводить, поместив небольшое количество полимера в трубочку. Затем в эту трубочку добавляется растворитель и трубочка встряхивается. Для полного растворения иногда требуется довольно значительное время.

13.1.3. Испытания медной проволокой

Наличие хлора в полимере, как, например, в поливинилхлориде, может быть легко установлено с помощью медной проволоки. Кончик проволоки нагревается в пламени

до красного цвета. Проводя нагретой проволокой по поверхности образца, можно захватить небольшое количество полимера. Далее кончик проволоки с полимером вновь помещается в пламя. Если при этом пламя окрасится в зеленый цвет, то это свидетельствует о присутствии атомов хлора в материале.

Аналогичным образом доказывается наличие атомов фтора во фторированных углеводородах.

13.1.4. Измерения удельного веса

Если в композиции присутствуют большие количества пластификаторов, наполнителей и армирующих элементов и других добавок, то это делает идентификацию полимера по его удельному весу весьма проблематичным.

Методика измерения удельного веса описана в главе 10.

13.2. Современные методы идентификации

Как было сказано во введении к настоящей главе, полная и надежная идентификация полимерного материала — это сложная и комплексная задача, требующая длительного времени и основанная на глубоком понимании аналитической химии, опыте и использовании современного оборудования. Полимерные материалы часто представляют собой сополимеры, смеси и содержат различные добавки. Модификация материала изменяет его фундаментальные характеристики, используемые для идентификации, такие как цвет дыма и запах, что делает неприменимыми простые методы идентификации. Более того, часто доступны очень малые количества материала, так что идентификация полимера становится возможной только на основе использования современных методов, описанных ниже в настоящей главе. Всего несколько миллиграммов вещества нужно для того, чтобы выполнить исследования методами спектроскопии, термического анализа, микроскопии или хроматографии.

Список современных методов, используемых для идентификации полимеров и содержащихся в них добавок, приведен в табл. 13.1.

Для идентификации полимеров и добавок, содержащихся в композициях на их основе, используют следующие современные аналитические методы:

- Фурье-инфракрасную и инфракрасную спектроскопию в ближней области спектра (Ф-ИКС, Б-ИКС);
- термогравиметрический анализ (ТГФ);
- дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК);
- термомеханический анализ (ТМА);
- ядерную магнитно-резонансную спектроскопию (ЯМР);
- хроматографию;
- масс-спектроскопию;
- рентгеноструктурный анализ;
- микроскопию.

Таблица 13.1. Методы, используемые для идентификации полимеров и содержащихся в них добавок [2]

Метод	Области применения
Жидкостная хроматография,	Распределение макромолекул по размерам
Гель-проникающая хроматография	Исследование смесей, фосфоритов, пластификаторов, лубрикантов
Газовая хроматография	Остаточные мономеры Неполимерные компоненты Пластификаторы
Инфракрасная спектроскопия	Тип полимера Природы добавок
Термический анализ	Наполнители Лубриканты Молекулярный вес полимера
Рентгеноструктурный анализ	Наполнители Огнезащитные добавки Стабилизаторы
Ядерный магнитный резонанс	Полиэфиры Кремнийорганические соединения Фенольные смолы
Химический анализ	Лубриканты Огнезащитные добавки Катализаторы

12.2.1. Фурье-инфракрасная спектроскопия

Анализ, основанный на использовании Фурье-преобразования инфракрасного спектра, в настоящее время является одним из наиболее широко применяемых как практиками, так и учеными, методов идентификации полимеров. Испытания состоят в том, что поток инфракрасного излучения направляется на образец, где он частично поглощается, а частично проходит через материал. Получающийся инфракрасный спектр является таким же индивидуальным отражением полимера как отпечатки пальцев. Результаты анализа отображаются в графической форме на дисплее. Поскольку никакие две индивидуальные структуры не дают совершенно идентичные спектры, полученный спектр сравнивается с известными эталонами для ранее исследовавшихся материалов, что позволяет однозначно идентифицировать анализируемый полимер.

Быстрая инфракрасная спектроскопия в ближней области спектра стала особенно популярной за последнее время. Образец подвергается облучению в ближней инфракрасной области, лежащей в диапазоне длин волн от 800 до 200 нм. Макромолекулы поглощают радиацию различным образом, что в итоге дает уникальный спектр, позволяющий идентифицировать исследуемый полимер. Технология измерения спектра в ближней инфракрасной области представляет собой недорогой высокоскоростной метод, который стал альтернативной методу Фурье-инфракрасной спектроскопии.

13.2.2. Термогравиметрический анализ

Метод термогравиметрического анализа состоит в измерении потерь веса образцом по мере его непрерывного нагревания. Используемая для реализации этого метода техника довольно проста. Типичная аппаратура состоит из аналитических весов, программируемой электрически нагреваемой печи и записывающего устройства. Этот метод очень полезен для исследования полимеров с различными добавками и наполнителями, содержание которых определяется по весу. Так, например, содержание стеклянных волокон и минеральных наполнителей в полимере может быть определено путем полного сжигания полимера в инертной атмосфере. Несгоревший остаток содержит только стекло и инертные наполнители.

Метод термогравиметрического анализа также используется для идентификации ингредиентов в смесях, которые различаются по относительной стабильности индивидуальных компонент.

13.2.3. Дифференциальная сканирующая калориметрия

Согласно методу дифференциальной сканирующей калориметрии измеряется количество энергии, поглощенной образцом или выделившейся из образца при непрерывном повышении или понижении температуры или при выдержке материала при постоянной температуре. Этот метод является одним из наиболее эффективных способов исследования плавления, включая определение области стеклования, значения температур плавления и кристаллизации, а также температуры термической деструкции. Этот метод также дает полезную информацию, позволяющую определить степень кристалличности полимера и кинетику кристаллизации. Применение метода дифференциальной сканирующей калориметрии также позволяет судить о наличии или отсутствии антиоксиданта в полимере, поскольку это влияет на окислительную стабильность материала. Метод также может использоваться для определения относительного содержания компонент в смесях, блок- и статистических сополимерах, которое сказывается на характеристиках полимера в области плавления.

Использование техники дифференциального термического анализа также дает количественную информацию о содержании в композиции самых различных добавок, таких как сказок, способствующих отделению изделия от формы. Антистатиков, поглотителей ультрафиолетового излучения, модификаторов ударной прочности материала.

Рассмотрение типичных термограмм позволяет судить о поведении материала во всем температурном диапазоне от температуры стеклования до области деструкции, а также об изменениях, происходящих между этими двумя крайними точками.

13.2.4. Термомеханический анализ

Термомеханический анализ предназначен для определения температурной зависимости расширения или сжатия материала, а также для измерений температурных зависимостей модуля упругости и вязкости полимеров. Этот метод позволяет найти точку размягчения и охарактеризовать вязкоупругие свойств материала во всем температурном диапазоне.

Реализация метода термомеханического анализа очень проста: он осуществляется путем приложения постоянной нагрузки и измерения изменений размеров образца в вертикальном направлении, причем эксперимент может проводиться как в отсутствии внешней нагрузки, так и при приложении силы. Метод термомеханического анализа очень полезен для характеристики полимеров: он позволяет достаточно точно определить такие физические свойства материала, как точку плавления, температуру стеклования, плотность поперечных сшивок, степень кристалличности и коэффициент термического расширения.

13.2.5. Ядерный магнитный резонанс

Метод ядерно-магнитной спектроскопии является мощным аналитическим способом идентификации органических молекул и определения их структуры. Ядра некоторых атомов в молекуле могут находиться в различных положениях в отношении ориентации их спина. Если на такое ядро наложить магнитное поле, то различие в спинах приводит к расщеплению энергетических уровней. Далее на молекулу дополнительно воздействуют слабым осциллирующим магнитным полем. При некоторых конкретных и точно определенных частотах наступает резонанс колебаний и этот эффект регистрируется и усиливается [3].

Метод ядерного магнитного резонанса дает полную характеристику структуры химического соединения, а также надежную идентификацию ингредиентов в смесях. Этот метод позволяет определить структуру функциональных групп, которая не может быть установлена другими аналитическими методами [4].

При исследовании полимеров атомы C^{13} наиболее часто используются для идентификации материала. Определение низкомолекулярных соединений, таких как пластификаторы, стабилизаторы, лубриканты, очень легко и непосредственно устанавливаются по их ЯМР-спектрам.

13.2.6. Хроматография

Хроматография представляет собой аналитический метод, основанный на разделении компонент смеси, которые проходят с различными скоростями через колонку, заполненную одной и той же разделяющей средой. Фиксированный материал, через который проходит смесь, называется стационарной фазой и обычно представляет собой твердое тело или гель. Движущаяся среда (обычно это жидкость, а иногда газ) называется подвижной фазой. Смесь растворяется в растворителе, называемом элюентом, и продавливается через колонку или набор колонок. Разделение компонент происходит из-за различий сил межмолекулярных взаимодействий между молекулами стационарной фазы, различных разделяемых компонент подвижной фазы и элюента. В результате отдельные компоненты смеси идентифицируются, а в отдельных случаях могут определяться количественно [5].

Как жидкостная, так и газовая хроматография используются для идентификации веществ. Однако в промышленности полимерных материалов наибольшее распространение получила гель-проникающая хроматография.

13.2.7. Масс-спектро스코пия

Масс-спектроскопия представляется очень полезным инструментом для получения детальной информации о строении полимера, причем в этом методе используются очень маленькие количества вещества. Молекулярный вес полимера и атомная структура соединений могут быть определены с использованием спектрального анализа. В сочетании с газовой хроматографией масс-спектроскопия, называемая в этом случае хромато-масс-спектроскопией, предоставляет даже бóльшие возможности идентификации, чем собственно масс-спектроскопия.

Процедура анализа состоит в том, что исследуемое вещество нагревается и помещается в вакуумную камеру. На пары воздействует электронный пучок, который ионизирует либо молекулу в целом, либо ее фрагменты. Образовавшиеся ионы ускоряются в электрическом поле, а при прохождении через магнитное поле линии их движения искривляются, так что направление движения зависит от скорости и отношения массы к заряду. Это в итоге приводит к разделению по массе (электромагнитное разделение). Благодаря тому что кинетическая энергия более крупных ионов больше, они движутся по более длинной дуге по сравнению с легкими ионами, и это служит основной для идентификации вещества. По выходе из магнитного поля ионы собираются в ловушки [6].

13.2.8. Рентгеновский анализ

Рентгеноструктурный анализ используется, прежде всего, для качественной и количественной идентификации добавок, которые присутствуют в большинстве полимерных композиций, определения присутствия загрязнений, а также оценки следовых количеств различных элементов в полимерах и мономерах.

Для осуществления рентгеновского анализа используют инструменты двух типов — спектроскопию излучения по длине волн и по их энергии.

13.2.9. Микроскопия

Оптическая микроскопия предоставляет выдающие возможности получения информации о поверхностной морфологии образцов, включая идентификацию загрязнений и анализа структуры смесей и сплавов. Эта техника исключительно полезна для исследования структуры тонких пленок.

Методы оптической микроскопии включают в себя два класса исследований — сканирующая электронная микроскопия и просвечивающая электронная микроскопия. В последнем случае достигается большая разрешающая способность. Изображение может получаться с увеличением более 100 000 по сравнению с оригиналом.

Использование сканирующей электронной микроскопии основано на том, что хорошо сфокусированный луч перемещается по поверхности, а изображение с высокой степенью разрешения создается вследствие рассеяния вторичных электронов от исследуемой поверхности образца [7]. При просвечивающей электронной микроскопии изображение получается при прохождении электронов через специально приготовленный образец.

В специальных случаях могут также использоваться наиболее современные варианты микроскопии, в частности атомно-силовая микроскопия.

13.3. Идентификация полимеров

13.3.1. Термопласты

А. АБС-пластики

АБС-пластик — это аморфный тройной сополимер с удельным весом 1,04. Он растворим в толуоле и дихлорэтилене, он горит желтым пламенем с острым едким запахом и продолжает гореть после удаления источника пламени. При горении выделяется черный дым и копоть (сажа). Для идентификации АБС-пластика прекрасно подходит метод инфракрасной спектроскопии. Этот же метод применим для определения относительного содержания компонент в составе сополимера.

Б. Полиацетали

Полиацетали выпускается в виде гомо- и сополимеров. Полимеры обоих типов горят голубым пламенем, выделяя токсичный формальдегид, обладающий характерным запахом. Все полимеры этого типа кристаллизуются. Их удельный вес равен 1,41. Определение является ли материал гомо- или сополимером; может производиться с помощью метода Фишера–Джонса по температуре плавления. Соплимеры имеют более низкую температуру плавления, чем гомополимеры. Полимеры обоих типов растворимы в сесквигидрате гексафторацетона. Однако этот растворитель исключительно токсичен и поэтому редко применяется в лабораторной практике. Для определения того, является ли материал гомо- или сополимером может также использоваться метод дифференциального термического анализа.

В. Полиакрилаты

Полакрилаты являются аморфными полимерами с удельным весом 1,18. Полакрилаты — одни из немногих прозрачных пластмасс, которые используют вне помещений. Они горят голубым пламенем, головка которого желтая. При горении они выделяют фруктовый запах и не образуют дыма. Полиакрилаты растворимы в ацетоне, бензоле и толуоле. Для идентификации полимеров этого класса лучше всего подходит инфракрасная спектроскопия.

Г. Ацетат целлюлозы

Ацетат целлюлозы представляет собой аморфный материал с удельным весом 1,30. Он горит очень медленно желтым пламенем, при плавлении от него отделяются капли. Запах при горении напоминает уксус, при этом выделяется черный дым и копоть. Растворим в ацетоне, фурфуроловом спирте и уксусной кислоте. Ацетат целлюлозы однозначно идентифицируется по его инфракрасному спектру.

Д. Ацетат-бутират целлюлозы

Этот полимер горит желтым пламенем с голубой головкой. При плавлении от него отделяются капли. Запах при горении напоминает прогорклое масло. Удельный вес — 1,24. Полимер растворим в ацетоне и трихлорметане. Ацетат-бутират целлюлозы

принадлежит к немногочисленной группе прозрачных пластмасс, устойчивых к действию атмосферных явлений.

Е. Пропионат целлюлозы

Как и другие производные целлюлозы, пропионат целлюлозы также аморфный материал. Его удельный вес 1,20. Он горит темным желтым пламенем и выделяющийся запах напоминает запах жженного сахара. При плавлении от него отделяются капли, которые могут воспламенить другой материал, как и в случае других производных целлюлозы. Для его растворения наиболее часто применяют ацетон, четыреххлористый углерод и трихлорметан.

Ж. Фторированные полимеры (полифторэтиленпропилен, хлортрифторэтилен, политетрафторэтилен, поливинилиденфторид)

Фторопласты практически не горят при поднесении к ним пламени. Их легко идентифицировать по методу медной проволоки, которая в присутствии фтора светится ярким зеленым пламенем. Все они обладают очень высокой температурой плавления. Для политетрафторэтилена характерна поверхность, напоминающая воск. Его удельный вес 1,25. Все фторопласты практически нерастворимы в любых растворителях.

З. Полиамиды

Существует большое разнообразие различных полиамидов, плотность которых лежит в пределах от 1,04 до 1,17. Все полиамиды горят голубым пламенем с желтой головкой. Выделяющийся при этом запах напоминает запах горящей шерсти или волос. Полиамиды самопроизвольно затухают при устранении источника пламени. В качестве растворителей для полиамидов наиболее часто используют фенол, *m*-крезол или муравьиную кислоту. Различные типы полиамидов можно идентифицировать по их температуре плавления с помощью метода Фишера–Джонса (по *ASTM D789*). Для определения типа полиамида можно также использовать тест на растворимость и измерение удельного веса. Однако наилучшим методом идентификации типа полиамида остается инфракрасная спектроскопия.

И. Поликарбонат

Поликарбонат является одной из наиболее жестких прозрачных пластмасс. Его плотность 1,20. Полимер горит желтым или оранжевым пламенем, выделяя запах фенола и образуя черный дым и копоть. Поликарбонат растворим в метиленхлориде и этилендихлориде. Наилучший метод для идентификации поликарбоната — инфракрасная спектроскопия.

К. Термопластичный полиэфир

Термопластичный полиэфир горит желтым пламенем с голубыми краями, образуя при плавлении капли и выделяя черный дым и копоть. Характерный для него запах при горении напоминает запах горящей резины.

Л. Поливинилхлорид

Самозатухающий аморфный полимер с удельным весом 1,2–1,7. Он горит желтым пламенем с зеленой головкой. При горении выделяется белый дым и запах соляной кислоты. Обычно используемые растворители для поливинилхлорида —

тетрагидрофуран и метилэтилкетон. Поливинилхлорид легко идентифицируется методом медной проволоки, который указывает на присутствие хлора ярко-зеленым пламенем.

Существует большое разнообразие полимеров винилового ряда — поливинилацетат, поливинилиденхлорид, сополимер этилена с винилацетатом. Все они надежно идентифицируются методом инфракрасной спектроскопии.

М. Полиэтилен

Полиэтилен — это один из немногих частично кристаллических полимеров, которые могут плавать в воде. Плотность различных типов полиэтиленов лежит в пределах от 0,91 до 0,96. Он легко загорается и горит голубым пламенем с желтой головкой. При горении из него выделяются капли. Запах при горении — парафиновый, такой же, как от горящей свечи. Полиэтилен не растворяется в большинстве обычных растворителей. Однако он растворяется в горячем толуоле или бензоле. Метод инфракрасной спектроскопии используется для подтверждения идентификации полиэтилена.

Н. Полипропилен

Это семейство полимеров имеет удельный вес 0,88 и все полимеры этого типа плавают в воде. Полипропилен горит голубым пламенем с желтой головкой, выделяя острый резкий запах, подобный запаху горящего дизельного топлива. Полимер растворим в горячем толуоле. Полипропилен однозначно идентифицируется методом инфракрасной спектроскопии.

О. Полистирол

Полистирол — аморфный полимер с удельным весом 1,09. Он горит желтым пламенем и выделяет запах типа запаха при горении светильного газа или цветов бархатки. Во время горения постоянно образуются капли, а также плотный черный дым и копоть. Полистирол растворим в ацетоне, бензоле, толуоле и эфире. Полистирол часто модифицируют, добавляя в него эластомеры, что позволяет улучшить стойкость материала к ударным нагрузкам. Различные типы полимерных композиций на основе полистирола идентифицируются методом инфракрасной спектроскопии.

П. Полифениленоксид

Удельный вес полифениленоксида 1,06. Горит желто-оранжевым пламенем без образования капель. Запах при горении — фенола или горящего газа. Он относится к самозатухающим полимерам. Растворим в толуоле и дихлорэтилене. Как и другие полимеры, полифениленоксид идентифицируется методом инфракрасной спектроскопии.

Р. Полсульфон

Полисульфон относится к самозатухающим полимерам. Его плотность равна 1,24. Он горит оранжевым пламенем с запахом серы. Во время горения выделяет черный дым и копоть. Полисульфон растворим в метилхлориде.

С. Полиуретан (термопластичный)

Легко загорающийся материал, горящий желтым пламенем и выделяющий запах, напоминающий слабый запах яблок. При горении выделяется черный дым. Термопластичные полимеры на основе полиуретана растворимы в тетрагидрофуране и диметилформамиде. Удельный вес этого материала 1,2.

Г. Полифениленсульфид

Этот материал принадлежит к классу самозатухающих материалов, горит желто-зеленый пламенем с выделением слабого запаха протухших яиц, обусловленного образованием двуокиси серы. Полифениленсульфид горит медленно, и капли при этом не образуются. При горении выделяется дым серого цвета с черными следами. После окончания горения образуется черный и блестящий шлак. Полимер надежно идентифицируется методом дифференциального термического анализа.

13.3.2. Реактопласты

А. Диаллилфталат

Удельный вес композиций на основе диаллилфталата в зависимости от типа использованных наполнителей лежит в пределах от 1,30 до 1,85. Полимер горит желтым пламенем, образуя черный дым и выделяя слабый запах фенола. Он принадлежит к классу самозатухающих материалов, и его трудно поджечь.

Б. Эпоксидные смолы

Удельный вес композиций на основе эпоксидной смолы составляет от 1,10 до 2,10. Эпоксидные смолы горят желтым пламенем и выделяют черный дым, который имеет резкий запах амина. Различные типы эпоксидных смол могут быть идентифицированы методами инфракрасной спектроскопии и термического анализа.

В. Фенолформальдегидные смолы

Фенолформальдегидные смолы горят желтым пламенем и выделяют при горении запах фенола. В зависимости от типа использованного наполнителя, композиции на основе фенолформальдегидных смол могут быть самозатухающими, а могут гореть. Композиции на основе этих смол могут быть только темной окраски. Удельный вес композиций лежит в пределах от 1,30 до 1,90. Фенольные смолы растворимы в ацетоне и уксусной кислоте.

Г. Мочевинформальдегидные смолы

Мочевинформальдегидные смолы горят желтым пламенем с зеленовато-голубыми краями. При горении выделяется острый запах формальдегида, а в процессе горения материал обычно разбухает и растрескивается.

Д. Меламинформальдегидные смолы

Самозатухающие материалы с удельным весом от 1,47 до 1,80. Они горят желтым пламенем с голубыми краями, и выделяющийся запах напоминает запах рыбы. В области, в которой происходит горение, материал разбухает, растрескивается, а края этой области становятся белыми. Меламинформальдегидные смолы растворимы в ацетоне и циклогексаноне.

Е. Полиэфиры

Полиэфиры горят желтым пламенем и голубыми краями, образуя черный дым с копотью. Полимеры продолжают гореть после удаления источника пламени, но капли

при этом не образуются. Запах при горении близок к запаху корицы. Удельная плотность композиций на основе полиэфиров составляет от 1,30 до 1,50.

Ж. Кремнийорганические смолы (силиконы)

Кремнийорганические смолы горят ярко-желтым пламенем без какого-либо специфического запаха, и продолжают гореть после удаления источника огня. Удельный вес композиций на основе этих полимеров лежит в пределах от 1,05 до 2,82. Эти полимеры надежно идентифицируются методами инфракрасной спектроскопии.

13.3.3. Эластомеры

А. Эластомеры на основе стирола

Полимеры этого типа проявляют свойства эластомеров благодаря их двухфазной структуре. Полимерная фаза, образованная полистиролом, при комнатной температуре твердая. Эта фаза диспергирована в мягкой эластомерной матрице [8]. Фаза эластомера образована обычно полиизопреном или полибутадиеном, подобно тому, как это имеет место в сополимерах этилена с пропиленом или этилена с бутиленом.

Сополимеры указанного типа представляют собой одни из наиболее широко распространенных материалов, поскольку они могут перерабатываться на традиционном технологическом оборудовании, а их свойства близки к свойствам обычных резин.

Удельный вес сополимеров рассматриваемого типа составляет от 0,9 до 1,2, твердость по Шору, шкала А, лежит в пределах от 20 до 95. Сополимеры стирола обладают хорошими температурными характеристиками, высоким сопротивлением износу, стойкостью к окислению, выносливостью при различных погодных условиях и прекрасными свойствами при испытаниях на сжатие.

Эластомеры на основе стирола используют в самых различных областях, включая изготовление ярко окрашенных ручек, рукояток для спортивных товаров, кухонных принадлежностей, товаров для личного обихода и медицинских приспособлений.

Эластомеры на основе стирола довольно легко и быстро горят, образуя желтое пламя с выделением черного дыма и запахом горящей резины. Два наиболее часто используемых метода для идентификации этих полимеров — пиролитическая газовая хроматография и Фурье-инфракрасная спектроскопия.

Б. Полиуретаны

Разработаны два основных типа термопластичных полиуретановых эластомеров — на основе простых и сложных полиэфиров. При одной и той же твердости, полиуретаны на основе простых полиэфиров обладают более высокой жесткостью, маслостойкостью, лучшими физическими характеристиками и выдающейся стойкостью к износу. Полиуретаны на основе сложных полиэфиров характеризуются лучшей гидролитической стабильностью, более высокой стойкостью к воздействию грибов, а также лучшей низкотемпературной гибкостью и более высокой податливостью.

Существует большое количество составов на основе полиуретанов, что позволяет получать материалы с твердостью по Шору, шкала А, от 60 до значений твердости по шкале D до 80. Удлинение при разрыве для мягких материалов может достигать 75%. Предел прочности при разрыве может составлять от 5000 до 8000 фунт/дюйм²; верхний предел превышает значения прочности любых других эластомеров, как

термопластичных, так и сшитых резин [9]. Эластомерные полиуретаны могут использоваться в диапазоне температур от -60 до 270°F . Удельный вес этих материалов составляет 1,1–1,3.

Основные области применения этих материалов — изготовление колес для роликов, предметов медицинского назначения, компонентов для внутренней отделки автомобилей, подошв обуви, изоляции проводов и кабелей, уплотнительных колец, диафрагм и обтюраторов.

Полиуретаны любого типа растворимы в циклогексаноне, тетрагидрофуране и пиридине. Полиуретаны на основе сложных полиэфиров горят желтым пламенем с резким неприятным запахом и выделяют при горении серый дым. Эти материалы сгорают быстро и полностью, редко образуя шлак. Полиэфиры на основе простых полиэфиров горят медленно, и пламя имеет желто-оранжевую окраску.

Надежная идентификация лучше всего достигается с помощью метода Фурье-инфракрасной спектроскопии. Может также применяться метод дифференциальной сканирующей калориметрии, который позволяет разделить два указанных типа полиуретанов. Было также показано, что метод ЯМР C^{13} позволяет четко установить тип использованных полиолов.

В. Сополиэфиры

Полимерные эластомеры, производимые фирмой *DuPont* и хорошо известные под торговой маркой *Hytrel*[®], представляют собой блок-сополимеры, состоящие из чередующихся жестких и мягких блоков, полиалкилентерефталата и полиалкиленэфира, соответственно [10]. Твердость этих материалов по Шору, шкала *D*, составляет от 35 до 72, что ближе к значениям, соответствующим, скорее, гибким термопластам, нежели типичным резинам.

Эти материалы представляют собой высококачественные эластомеры, обладающие прекрасной пластичностью, высоким сопротивлением ударным нагрузкам, широким температурным интервалом применения (от -80 до 250°F), выдающейся прочностью при многократном изгибе и прекрасным сопротивлением действию различных растворителей. Эти материалы широко используются в тех случаях, когда требуются высокая механическая прочность и долговечность, сочетающиеся с гибкостью. В качестве примеров применения этого материала можно привести изготовление изоляции, ремней, вкладышей, диафрагм насосов, зубчатых колес, защитной обуви, шлангов и труб, пружин и устройств, предназначенных для поглощения энергии удара. Изделия из сополимеров можно получить, используя традиционное технологическое оборудование, включая технологии литья под давлением, экструзии, выдувного и ротационного формования.

Полиэфирные эластомеры растворимы в крезоле, концентрированной серной и трифторуксусной кислотах. Удельный вес этих материалов составляет от 1,17 до 1,25. Эластомеры этого типа горят очень медленно, образуя желтое пламя с голубой головкой. При горении выделяется дым с хлопьями копоти и образуется характерный сладковатый запах. Для надежной идентификации этих материалов следует использовать методы инфракрасной спектроскопии и дифференциального термического анализа.

Г. Полиолефиновые термопластичные эластомеры

Этот класс полимеров, часто называемый полиолефиновыми эластомерами, представляет собой смесь двух полимерных материалов, каждый из которых образует свою фазу. Более твердый компонент — это обычно полипропилен, но может быть и поливинилхлорид. Более мягкий компонент — это эластомер, представляющий собой сополимер этилена с пропиленом или бутадиен-нитрильный каучук в смеси с поливинилхлоридом при очень небольшой степени поперечного сшивания или при его отсутствии. Смешение обеих фаз при высокой дисперсности компонент обеспечивает достаточное межфазное поверхностное взаимодействие, так что силы взаимодействия обеспечивают относительно высокую прочность материала [11]. Изделия из этого материала, полученные литьем под давлением или экструзией, обладают хорошей прочностью и высоким удлинением при разрыве, а также превосходной гибкостью в области низких температур.

Полиолефиновые термопластичные эластомеры обладают самым низким удельным весом среди всех эластомеров — в диапазоне от 0,9 до 1,02. Диапазон значений твердости по Шору составляет от 50 по шкале *A* до 60 по шкале *D*. Эти материалы обладают прекрасной стойкостью к погодным условиям, хорошим сопротивлением воздействию химических реактивов, и при этом они относительно недороги. Материалы могут использоваться в области температур от -55 до 220 °F.

Типичные области применения полиолефиновых термопластичных эластомеров — это кабельная изоляция, компоненты, используемые в автомобильной промышленности, спортивные товары и гибкая упаковка.

Полиолефиновые термопластичные эластомеры сгорают медленно с образованием голубого пламени с желтой головкой и дают при этом характерный запах нагретого воска. Современные методы идентификации материалов рассматриваемого типа — это Фурье-инфракрасная спектроскопия, дифференциальный термический анализ и пиролитическая газовая хроматография. Прежде чем использовать эти методы, рекомендуется удалить некоторые добавки, используемые в композициях на основе эластомеров, путем их экстракции растворителями.

Д. Термопластичные вулканизаты

Материалы этого типа очень близки полиолефиновым термопластичным эластомерам, за исключением того, что в этих материалах используется сильно вулканизованная фаза эластомера, тонко диспергированная в непрерывной фазе полиолефина. Вулканизация в эластомерной фазе осуществляется в ходе технологического процесса, что приводит к улучшению ряда характеристик материала, таких как поведение эластомера при усадке и термическая стабильность. Эти материалы демонстрируют наименьшую усадку среди всех других термопластичных эластомеров [12]. Материалы этого типа могут быть получены в широком диапазоне значений твердости. Они характеризуются превосходным сопротивлением действию химических агентов, легко окрашиваются, стойки в маслах и обладают исключительно высокой долговечностью при многократном изгибе.

Термопластичные вулканизаты могут перерабатываться всеми традиционными методами, такими как литье под давлением, экструзия, выдувное формование и каландрование.

Их использование представляет серьезную экономическую конкуренцию обычным термореактивным эластомерам в различных сферах применения, таких как автомобильная промышленность, строительство, изготовление приборной техники, спортивных товаров и изделий медицинского назначения. Основные типы изделий, получаемых из термореактивных эластомеров — это шланги технического назначения, колесики тележек, защитные кожухи, диафрагмы, уплотнения, изделия внутренней отделки автомобилей.

Удельный вес материалов этого типа лежит в пределах от 0,9 до 1,0. Они горят, образуя большие языки желтого пламени с голубым основанием и черным дымом. Эти материалы сгорают быстро, а выделяющийся запах похож на запах горящей резины. Надежная идентификация этих материалов может быть дана с использованием методов инфракрасной спектроскопии, пиролитической газовой хроматографии и дифференциальной сканирующей калориметрии.

Литература

1. E.I. DuPont Co., *Technical Bulletin: Identification of Thermoplastic Materials*, Wilmington, DE.
2. Coe G.R. «Instrumental Methods of Polymer Analysis» *SPE ANTEC*, 23 (1977), p. 496–499.
3. Waites G. and Harrison P. *Dictionary of Chemistry*, Cassell Wellington House, London, 1998, p. 139.
4. Cheremisinoff N.P. *Polymer Characterization, Laboratory Techniques and Analysis*, Noyes Publications, Westwood, NJ, 1996, p. 60.
5. Waites, Reference 2.
6. Sax N.I. and Lewis R.J. *Condensed Chemical Dictionary*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1987.
7. Portnoy R. *Medical Plastics—Degradation Resistance and Failure Analysis*, Plastics Design Library, Norwich, NY, 1988, p. 22.
8. Marshall J. «Thermoplastic Elastomers» *Modern Plastics Encyclopedia*, Nov. 1997.
9. Schwartz S. and Goodman S. *Plastics Materials and Processes*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1982, p. 446.
10. Rader C.P. Reference 1.
11. Rader C.P. Reference 1.
12. Level M.A. «Thermoplastic Elastomers» *Plastics Eng.*, January, 2003 p. 94.

Общие источники

1. «Identification of Plastics» *Modern Plastics Encyclopedia*, McGraw-Hill, New York, 1950, p. 992–1001.
2. «How to Identify Plastics» *Western Plast. Mag.* (March 1966).
3. «Identification Chart» *Canad. Plast. Mag.* (1971).
4. Richardson T.A., *Modern Industrial Plastics*, Howard W. Sams and Co., Inc., Indianapolis, IN, 1974, p. 84–90.

5. Lever A.E. and Rhys J.A. *The Properties and Testing of Plastic Materials*, Temple Press, Feltham, England, 1968, p. 269–275.
6. Haslam J. and Willis H.A. *Identification and Analysis of Plastics*, Iliffe Books, London, England, 1965.
7. Rodriguez F. *Principles of Polymer Systems*, McGraw-Hill, New York, 1970, Chapter 15, p. 464–475.
8. Kline G.M. *Analytical Chemistry of Polymers*, Parts 1–3, Interscience, New York, 1962.
9. Beck R.D. *Plastics Product Design*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1970, p. 432–440.

14. Испытания пенопластов

14.1. Введение

Пенопласты (пены) — это общее название группы материалов, содержащих множество пустых ячеек (открытых или замкнутых), диспергированных по объему вещества. Расширяющееся применение и популярность пенопластов приводят к необходимости создания методов испытаний, специфически пригодных именно для материалов этого типа. В течение долгого времени методы, создававшиеся для испытаний твердых полимеров, использовались и для пенопластов. Тем не менее эти методы должны быть модифицированы, что объясняется низкой прочностью пенопластов. Необходимость в такой модификации и предлагаемые изменения привели к разработке многочисленных нестандартизованных методов испытаний, что, в свою очередь, вызвало недоумение среди специалистов, применявших эти материалы. Благодаря стараниям и усилиям комитетов *ASTM*, *SPI* и поставщиков материалов был разработан ряд стандартов. Большинство методов испытаний пенопластов вполне аналогичны ранее использовавшимся для других полимерных материалов. Однако некоторые методы направлены на то, чтобы отвечать необходимости испытаний именно пенопластов, и они в этом отношении уникальны. К таким методам относятся, в частности, измерение пористости, определение относительного содержания открытых и замкнутых ячеек в материале.

14.2. Методы испытания жестких пенопластов

14.2.1. Плотность (*ASTM D1622*, ИСО 845)

Плотность пенопластов представляет значительный интерес для конструкторов изделий из этих материалов, поскольку многие физические свойства материала определяются их плотностью. Методика определения плотности пенопластов очень проста. В ее основе лежит приготовление образца определенной формы, которая бы позволяла достаточно просто измерить его объем. Далее образец взвешивается, а его объем вычисляется по линейным размерам, измеряемым с помощью микрометра, кронциркуля или калибра. Плотность рассчитывается как:

$$\text{Плотность (фунт/фут}^3\text{)} = \frac{\text{Вес образца (фунт)}}{\text{Объем образца (фут}^3\text{)}}.$$

Этот метод был разработан для определения как суммарной плотности материала, так и эффективной плотности центральной части жестких пенопластов. Эффективная

плотность материала в целом определяется как вес, отнесенный к единице объема, образца в целом, включая поверхностные слои. Эффективная плотность центральной части (ядра) материала определяется аналогичным образом, но после удаления поверхностных слоев.

14.2.2. Размер ячеек

Размер ячеек и их ориентация являются очень важными характеристиками пенопластов, поскольку от них зависят некоторые физические свойства материала. Так, например, для оценки адсорбции воды и содержания открытых ячеек необходимо знание поверхности ячеек, которая, в свою очередь, рассчитывается на основании их размеров.

Метод испытаний распространяется на определение эффективного размера ячеек в жестких пенопластах путем измерения количеств пересечений прямой с границами ячеек на определенной длине. При этом используются две базовые методики. Согласно процедуре *A* необходимо приготовить тонкие срезы толщиной не более чем половина среднего диаметра одной ячейки, что обеспечивает механическую устойчивость среза. После того как из образца с помощью микротома делается срез указанных размеров, его изображение с помощью проектора слайдов проецируется на экран. Измеряется средняя длина хорды и определяется количество ее пересечений с границами ячеек. Далее рассчитывается среднее значение размера ячеек.

Процедура *B* предназначена для использования применительно к хрупким материалам, из которых трудно приготовить тонкие срезы для визуального анализа. В этом случае на образце делается разрез так, чтобы получилась гладкая поверхность. Границы ячеек отмечаются маркером. Далее используется та же методика измерений, что в первом случае: проводится прямая, рассчитывается количество ее пересечений с границами ячеек и вычисляется средний размер ячеек.

14.2.3. Подсчет количества открытых ячеек (ASTM D2856, ISO 4590–1981)

Этот метод предназначен для определения пористости или процентного содержания открытых ячеек в пенопласте. Знание этих характеристик пенопласта необходимо для применения этих материалов в качестве плавательных средств, поскольку избыточная пористость или повышенное содержание открытых ячеек будут заметно сказываться на плавучести изделий из пенопластов. Высокое содержание замкнутых ячеек, напротив, препятствует удалению газообразных продуктов и тем самым повышает изоляционные характеристики материала, способствуя понижению его теплопроводности.

Образцы с размерами, удобными для испытаний, могут быть получены только путем их вырезания из крупных заготовок. При этом часть закрытых ячеек становится открытой и при расчете она прибавляется к числу существующих открытых ячеек. Для внесения соответствующих корректив предлагаются три основные методики.

Процедура А. Подсчитайте количество ячеек, открывшихся в процессе приготовления образца, измерив их диаметр и рассчитав на этом основании объем этих ячеек.

Процедура В. Подсчитайте количество ячеек, открывшихся в процессе приготовления образца, путем приготовления среза и получения открытой поверхности по площади, равной площади поверхности исходного образца.

Процедура С. Не вводите коррекцию на количество ячеек, открывшихся в процессе приготовления образца, но достаточно точно определите содержание полностью открытых ячеек. Точность этой оценки уменьшается по мере увеличения содержания замкнутых ячеек и увеличении их размера.

Методика измерений основана на использовании закона Бойля, согласно которому увеличение замкнутого объема, занимаемого газом при постоянной температуре, пропорционально уменьшению давления. Если объем некоторого пространства увеличивается в равной степени в присутствии в этом объеме образца или в его отсутствии, то падение давления будет меньше для пустого пространства. Величина разности давления и рассчитанный из этого истинный объем материала позволяют найти процентное содержание замкнутых ячеек.

Прибор, используемый для проведения испытаний, называется воздушным пикнометром (рис. 14.1). Он состоит из двух цилиндров равного объема, в один из которых помещается образец. Поршни в обеих камерах могут перемещаться. При изменении объемов камер, обусловленных движением поршней, реальные изменения объема в камере с образцом меньше чем в пустой камере из-за присутствия образца. Величина этой разницы измеряется, и содержание открытых ячеек в пенопласте определяется расчетным путем.

Воздушный пикнометр, предлагаемый на рынке, показан на рис. 14.2.

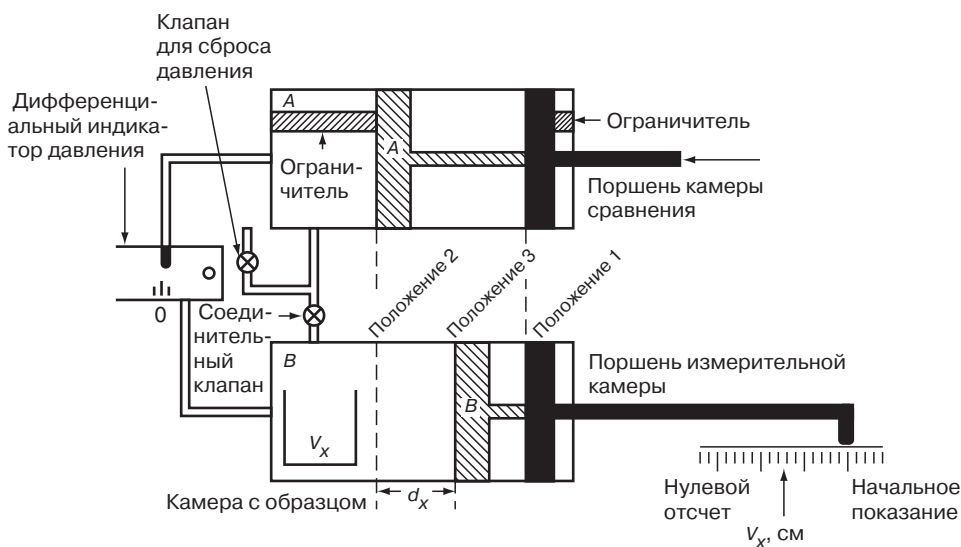


Рис. 14.1. Схема воздушного пикнометра (воспроизведено с разрешения ASTM)



Рис. 14.2. Воздушный пикнометр

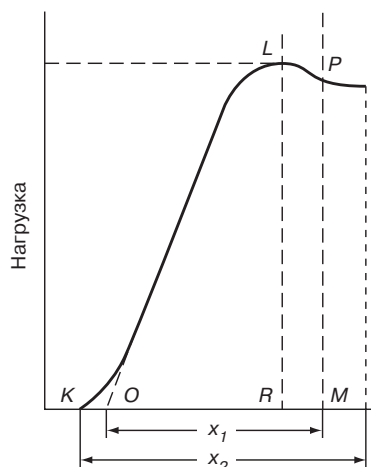
14.2.4. Сжимаемость (ASTM D1621, ИСО 844)

Испытания, в которых определяется модуль упругости и прочность при сжатии жестких пенопластов, во многом аналогичны методам, используемым для других пластмасс, как это описано в главе 2. Этот метод очень полезен для сравнения прочностных характеристик пенопластов различного состава. С помощью рассматриваемого метода проводятся стандартные испытания, которые позволяют получать результаты, используемые при исследовательских работах, контроле качества и проверке на соответствие спецификации на материал. Однако этот метод не может рассматриваться в качестве оценки того, как пенопласт поведет себя в реальных условиях эксплуатации в течение длительного времени. Для того чтобы получить исходные данные для проектирования изделий из пенопластов, предназначенных для работы под нагрузкой, необходимы дальнейшие испытания на ползучесть, определение усталостных свойств материала и его сопротивления удару.

Испытания проводят с образцами, минимальная высота которых составляет 1 дюйм, а максимальная высота не должна превышать ширину образца. Предварительно кондиционированный образец подвергается равномерному сжатию в стандартной испытательной машине. Перемещение траверсы машины рассматривается как мера деформации. Испытания продолжаются до тех пор, пока не достигается предел текучести, или же деформация при сжатии не достигнет приблизительно 13% от исходного размера образца, в зависимости от того, какое из этих условий будет достигнуто раньше. Из деформационных кривых, подобных показанным на рис. 14.3 и 14.4, рассчитываются прочность при сжатии, модуль упругости и эффективное значение модуля.

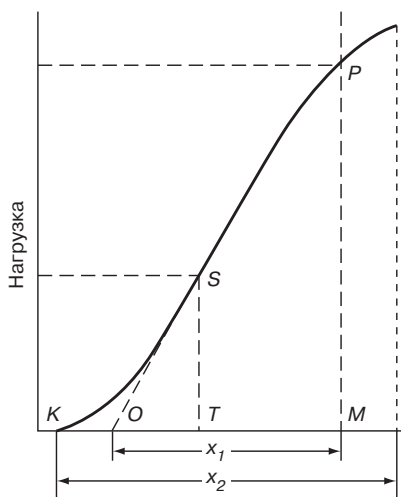
14.2.5. Испытания на растяжение (ASTM D1623)

Метод, используемый для определения характеристик пенопластов при растяжении, аналогичен методу, применяемому для оценки свойств других пластмасс, как это



x_1 = Процедура А: деформация центральной части образца 10%
 Процедура В: деформация равна 2%
 x_2 = Деформация сжатия, приблизительно равная 13%

Рис. 14.3. Определение прочности при сжатии — напряжения в пределе текучести при деформации, не превышающей 10% (воспроизведено с разрешения *ASTM*)



x_1 = Процедура А: деформация центральной части образца 10%
 Процедура В: деформация равна 2%
 x_2 = Деформация сжатия, приблизительно равная 13%

Рис. 14.4. Определение прочности при сжатии — напряжения при деформации составляющей 10% (воспроизведено с разрешения *ASTM*)

описано в главе 2. Единственные различия связаны с размером испытываемых образцов и способом их приготовления.

Для проведения испытаний используют три основных типов образцов. Предпочтительным являются образцы типа *A*, если имеется достаточное количество материала, чтобы приготовить такой образец. Образцы типа *B* используют, если доступны только небольшие количества материала в виде сэндвичевых панелей. Образцы типа *C* используют для определения адгезионной прочности при отрыве пенопласта от подложки как при определении свойств сэндвичевых панелей, так и индивидуальных образцов пенопластов.

14.2.6. Испытания на сдвиг (ASTM C273)

Этот метод разработан специально для измерения зависимости напряжения от деформации при испытаниях сэндвичевых конструкций или центральной части пенопласта при приложении нагрузки параллельно лицевой части образца. Приспособление, показанное на рис. 14.5, может использоваться для испытаний либо сэндвича в целом, либо только его центральной части.

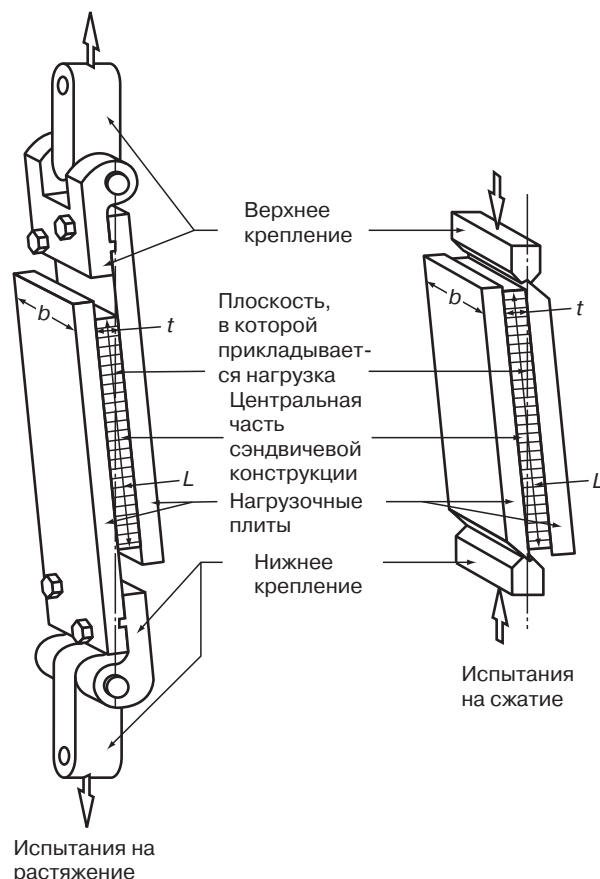


Рис. 14.5. Аппаратура для испытаний пенопластов на сдвиг (воспроизведено с разрешения ASTM)

Нагрузка прикладывается к стальным плитам, с помощью которых осуществляется либо растяжение, либо сжатие. При этом нагрузка распределяется равномерно по всей ширине образца. Максимальная длительность приложения нагрузки не должна превышать 3–6 минут.

По результатам испытаний строится зависимость напряжения от деформации, а по начальному участку этой зависимости определяется модуль упругости либо сэндвичевой конструкции в целом, либо отдельно ее центральной части.

14.2.7. Испытания на изгиб (ASTM D790, ИСО 178)

Такие характеристики материала как прочность при изгибе, предел текучести при изгибе и модуль упругости жестких пенопластов могут определяться так, как это описано в главе 2 для любых пластмасс.

14.2.8. Размерная стабильность (ASTM D2126, ИСО 2796)

В последние годы пенопласты нашли широкие области применения в аэрокосмической технике, электронике и строительстве. Поэтому очень важно знать, как поведут себя пенопласты в условиях меняющихся температуры и влажности окружающей среды. При использовании пенопластов как теплоизоляционных материалов также очень важна размерная стабильность, сохраняющаяся в течение длительного времени.

Разработанный метод испытаний для определения реакции жестких пенопластов на воздействие температуры и старение позволяет определить максимально допустимую температуру эксплуатации, а также получить данные по стабильности размеров в условиях меняющихся температуры и влажности. Для проведения этих испытаний используют весы, термокамеру, холодильную камеру и мерительный инструмент для точного определения размеров. Образец заданных размеров получают механической обработкой. После кондиционирования образец подвергают испытаниям по одному из режимов, приведенных в табл. 14.1. Заключительные испытания проводят после того, как образец вновь принял комнатную температуру. Далее образец исследуется визуально, и измеряются его размеры.

Таблица 14.1. Условия испытаний — температура и влажность

Температура, °C	Относительная влажность
23 ± 2	50 ± 5
38 ± 2	97 ± 3
70 ± 2	97 ± 3
Должна быть выбрана	95 ± 3
–40 ± 3	Комнатная
–73 ± 3	Комнатная
70 ± 2	Комнатная
100 ± 2	Комнатная
150 ± 2	Комнатная
200 ± 2	Комнатная
Температура и влажность выбираются применительно к индивидуальным требованиям	

Определение максимально допустимой температуры производится путем постепенного повышения температуры до высоких значений с параллельным измерением размеров, до тех пор, пока не будет достигнут допустимый предел изменений размеров.

14.2.9. Адсорбция воды (ASTM 2843, ИСО 2896)

Пенопласты широко используют в изделиях, от которых требуется плавучесть. Фактор плавучести прямо связан с количеством воды, которое может адсорбировать тот или иной пенопласт. Методика измерений адсорбционной способности жестких пенопластов подробно описана в соответствующем стандарте *ASTM*.

Методика измерений основана на определении начального объема сухого образца и расчете начальной выталкивающей силы. Затем образец погружается в воду, и через определенное время вновь измеряется выталкивающая сила. Для этого используется подводная установка для взвешивания. Разность между начальным и конечным значениями выталкивающей силы характеризует количество адсорбированной воды. Эта величина выражается в граммах воды, отнесенных к объему образца. Для получения надежных результатов необходимо строго соблюдать последовательность шагов при испытаниях, поскольку на получаемые данные в сильной степени влияют отклонения от стандартной процедуры.

14.2.10. Адсорбция воды центральной частью сэндвичевых конструкций (ASTM C272)

Метод измерения количества воды, поглощаемой центральной частью (ядром) сэндвичевых конструкций дает первоначальную информацию, которая помогает оценить влияние этого фактора на механические, термические и электрические свойства материала. Для испытаний из сэндвичевой панели вырезается образец размером 3×3 дюйма с гладкими краями. После правильно подобранного режима кондиционирования образец взвешивается и погружается в воду на заданное время при выбранной температуре. После этого образец вынимается, высушивается и вновь взвешивается. Количество поглощенной воды выражается в граммах на 1 см³ образца, или же в процентах адсорбированной воды по отношению к весу образца.

Эта методика испытаний также используется как контрольная для оценки однородности поступающих партий материала.

14.2.11. Перенос паров воды (ASTM E96)

Этот метод призван определить скорость переноса водных паров через пористые материалы. Для этих измерений используют два метода — метод эксикатора и водный метод. Первый из них, как правило, дает более низкие значения, чем водный метод.

Скорость переноса воды (*Water Vapor Transmission, WVT*) определяется как количество воды, переносимое в единицу времени между двумя параллельными плоскостями, выделенными в теле, в направлении, перпендикулярном этим плоскостям. Принятая размерность этой величины — «перм» (*perm*). Проницаемость по водным

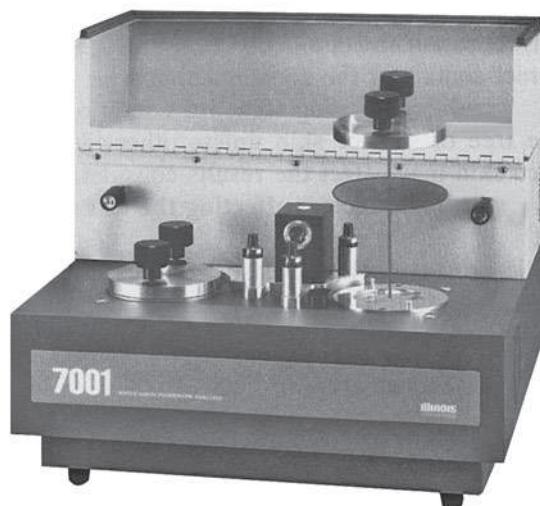


Рис. 14.6. Промышленный WVT-анализатор (с разрешения Illinois Instruments, Inc.)

парам определяется произведение этой величины на толщину стенки, через которую осуществляется перенос. Единица проницаемости «перм-дюйм».

При измерениях по методу эксикатора образец располагается так, что он закрывает горловину сосуда, в который помещается эксикатор, а вся установка помещается в контролируемую атмосферу. Скорость переноса паров определяется периодическим взвешиванием сосуда.

В водяном методе используется дистиллированная вода. Скорость переноса определяется периодическим взвешиванием сосуда, содержащего воду и образец.

На рис. 14.6 показан внешний вид прибора для измерения скорости переноса воды, имеющийся в продаже.

14.2.12. Стойкость к климатическим условиям

Каким образом погодные условия воздействуют на пенопласты, не вполне ясно, поскольку по этому вопросу отсутствуют данные как производителей материалов, так и потребителей готовой продукции. Вообще говоря, стойкость пенопластов по отношению к климатическим условиям такая же, как и базовых полимеров. Методы испытаний, описанные в главе 5, применимы и к пенопластам.

14.2.13. Теплопроводность (ASTM C177)

Теплопроводность, или K -фактор, пенопластов наименьшая среди всех известных сегодня теплоизолирующих материалов. Однако эти превосходные теплозащитные свойства зависят от многих факторов. Теплопроводность пенопластов в сильной степени определяется природой пенообразователя, размером ячеек, долей замкнутых ячеек и плотностью материала. Другими факторами, влияющими на теплопроводность пенопластов, являются температура и влажность.

Метод, используемый для измерения коэффициента теплопроводности пенопластов тот же самый, что и применяется для обычных пластмасс. Соответствующая техника описана в главе 3.

14.2.14. Горючесть

Благодаря своим превосходным теплоизолирующим характеристикам пенопласты находят широкое применение в строительстве и в упаковочной индустрии. В этой связи большое внимание привлекает проблема горючести этих материалов. Детальное описание различных методик, используемых в промышленности пластмасс для оценки горючести пенопластов и обычных пластмасс, а также их ограничения были обсуждены в главе 8.

14.2.15. Диэлектрическая постоянная и фактор потерь (ASTM D1673)

Пенопласты обладают уникальными преимуществами по сравнению с обычными полимерными материалами, поскольку часть объема в них заполнена газом, который имеет низкую диэлектрическую постоянную. Вследствие этого пенопласты обладают улучшенными значениями диэлектрической постоянной, что имеет несомненные преимущества при применении этих материалов для изготовления кабельной изоляции. Другое преимущество пенопластов — низкое значение диэлектрических потерь.

Метод измерения диэлектрических характеристик пенопластов в целом аналогичен методу, используемому для обычных полимерных материалов, но все же по некоторым причинам его пришлось несколько видоизменить применительно конкретно к пенопластам. Их поверхность такова, что это исключает применение традиционных электродов типа металлической фольги, при креплении которых используется вазелин и другие адгезивы. Кроме того, большая толщина образцов из пенопластов также не дает возможности использовать обычные электроды.

Диэлектрическая постоянная и фактор потерь измеряют, используя в качестве образцов тонкие листы или блоки как из жестких, так и мягких пенопластов в диапазоне частот от 60 до 100 МГц. Аппаратура для измерений состоит из моста и резонатора. Поскольку крепление обычных электродов на поверхности пенопласта невозможно, для измерений диэлектрической постоянной и фактора потерь используют специально изготовленные металлические электроды в виде пластин. Эти электроды могут работать как в контактном, так и бесконтактном режиме.

Образцы для испытаний предварительно кондиционируют. Обычно с образцов снимают поверхностную корочку, если противное не оговорено специальными требованиями или условиями испытаний, поскольку такая корочка очень сильно влияет на получаемые результаты.

Более детальное описание методики измерений и обсуждение факторов, влияющих на их результаты, содержатся в главе 4.

Специфика природы пенопластов — неоднородность по толщине и плотности пены — способствуют тому, что воспроизводимость результатов испытаний этих материалов обычно оказывается гораздо худшей, чем при испытаниях обычных электроизолирующих материалов.

14.3. Мягкие пенопласты

14.3.1. Введение

Методы испытаний мягких пенопластов существенно отличаются от методов, используемых для характеристики жестких пенопластов. Для испытаний жестких пластиков был предложен ряд методов, направленных на оценку их специфических свойств. Никаких подобных специфических методов для испытаний мягких пенопластов не существует. Вместо этого используется ряд методов, которые призваны охарактеризовать физические свойства этого класса материалов.

В настоящем разделе предпринята попытка кратко описать все типы основных и сопутствующих методов, используемых для мягких пенопластов. Эти методы были разработаны совместно *ASTM* и *SPI* (*Society of the Plastic Industry* — Общество специалистов, работающих в промышленности пластмасс). Будут также описаны индивидуальные методы испытаний, применимые для различных типов и видов материалов, а также приведен список основных и дополнительных методов, используемых для испытаний различных материалов.

Лишь незначительное количество методов применимо к различным материалам. Названия методов и область их применений приведены в табл. 14.2.

Таблица 14.2. Методы испытаний мягких пенопластов

	Блоки на основе полиуре- танов	Вспененные отливки из полиуретанов	Блоки, заливки и отлитые пенопласты на основе по- лиуретанов	Винило- вые по- лимеры и сопо- лимеры
Стандарт <i>ASTM</i>	<i>D 1564</i>	<i>D 2406</i>	<i>D 3574</i>	<i>D 1565</i>
Испытания по автоклавному методу	•	•	•	
Испытания по методу постоянной деформации	•	•	•	•
Измерения деформации под нагрузкой: методы <i>A</i> и <i>B</i>	•	•	•	•
Испытания в воздушном потоке	•		•	
Испытания на сжатие	•	•	•	
Испытания по методу сухого нагревания	•	•	•	
Испытания на усталость статические и динамические	•	•	•	•
Определение плотности	•	•	•	•
Испытания на разрыв	•	•	•	
Испытания на растяжение	•	•	•	
Испытания на упругость	•		•	

14.3.2. Испытания по автоклавному методу

Этот метод состоит в том, что образец из пенопласта помещается в автоклав и при заданной температуре в течение определенного времени подвергается воздействию пара под небольшим давлением. Далее измеряются изменения физических свойств материала после указанного воздействия.

Перед экспериментами образец кондиционируется. После завершения испытаний образец тщательно высушивается сухим воздухом.

Основная методика состоит в измерении сжимаемости образца до и после его пребывания в автоклаве. Результатом испытаний является относительное изменение сжимаемости, выраженное в процентах. Рассчитывается также деформация, обусловленная воздействием давления пара.

14.3.3. Испытания по методу постоянной деформации

Этот метод состоит в том, что образец деформируется на определенную величину при заданной температуре и в течение конкретного времени. Далее измеряется изменение толщины образца.

Эксперимент состоит в том, что образец деформируется между двумя или несколькими параллельными пластинами до определенной степени сжатия. Испытательный блок помещается в печь, в которой циркулирует воздух с заданной температурой. Через определенное время образец вынимается и измеряется степень восстановления толщины образца. Результатом испытаний является относительное изменение толщины, выраженное в процентах.

14.3.4. Измерения деформации под постоянной нагрузкой

Эти испытания проводятся по двум методам:

метод *A* — вдавливание до заданной степени деформации.

метод *B* — вдавливание под заданной нагрузкой.

Метод *A* состоит в том, что измеряется сила, необходимая для вдавливания на определенную величину (обычно 25–65%) изделия из пенопласта — *IFD* (*Indentation Force Deflection*). Эксперимент состоит в том, что плоский индентор с круглым поперечным сечением вдавливается в образец, и измеряется сила, необходимая для погружения на различную глубину. Этот метод испытаний широко применяется при изготовлении пенопластов для диванов и кроватей. Более высокие показатели *IFD* соответствуют более жестким материалам.

Метод *B* состоит в измерении остаточной деформации после приложения силы — *IRDF* (*Indentation Residual Deflection Force*). Эксперимент состоит в том, чтоб образец нагружается заданной силой в отличие от метода, в котором задается деформация. Приложенная сила действует в течение 1 мин, после чего измеряется величина деформации. Результатом испытаний является величина показателя *IRDF*. Значения этого показателя могут определяться при различных нагрузках. Более высокие значения *IRDF* соответствуют более жестким материалам. Эти испытания полезны, поскольку они дают информацию о том, какова должна быть толщина диванной подушки, на которой сидит человек среднего веса.

14.3.5. Испытания в воздушном потоке

Испытания в воздушном потоке показывают насколько легко воздух проходит через структуру пенопласта. Воздух проходит через открытые ячейки. Поэтому результаты этих испытаний могут быть косвенным показателем особенностей структуры пенопласта.

Эксперимент состоит в том, что образец из мягкого пенопласта помещают в выемку над вакуумируемой камерой, тем самым создавая условия, при которых поддерживается постоянный перепад давления. Измеряется скорость воздушного потока, которую необходимо задавать для поддержания заданного перепада давления. Возможны две методики — создание воздушного потока, направленного параллельно или перпендикулярно поверхности образца. Скорость воздушного потока пропорциональна пористости материала.

14.3.6. Испытания на сжатие

Эти испытания состоят в том, что измеряется нагрузка, которую необходимо приложить по всей поверхности образца для создания сжатия на 50%. Этот метод испытаний отличается от описанного выше определения показателя *IFD* тем, что размеры сжимающей плиты, через которую передается нагрузка, больше, чем размеры образца.

Эксперимент состоит в том, что плита приводится в соприкосновение с образцом и затем сжимает его на 50% от первоначальной толщины. Через 1 мин измеряется действующее усилие. Величина этого усилия является результатом испытаний, характеризующей свойства материала.

14.3.7. Испытания по методу сухого нагревания

Этот метод испытаний состоит в том, что образец пенопласта помещается в камеру, в которой циркулирует сухой подогретый воздух. Исследуется влияние такого воздействия на изменение физических свойств материала. Одним из вариантов метода являются испытания на растяжения, описанные ниже в настоящей главе.

14.3.8. Испытания на усталость

Испытания на усталость проводятся по четырем методам:

метод *A* — статические испытания по снижению нагрузки при постоянной деформации;

метод *B* — динамические испытания с помощью вращающегося ролика, создающего постоянные сдвиговые усилия;

метод *C* — динамические испытания при постоянной нагружающей силе;

метод *D* — динамические испытания для ковровых подушек.

Метод *A* позволяет определить:

- снижение поддерживающей силы;
- уменьшение толщины;
- визуально определяемые структурные разрушения.

Начальная толщина измеряется после предварительного перегибания образца. Затем образец помещается между двумя параллельными плитами и создается сжатие на 75%, контролируемое линейкой. Пластины фиксируются и выдерживаются в этом положении в течение 22 ч. Через 30 мин после завершения этого эксперимента испытания повторяются, но предварительно образец перегибается шесть раз, и вновь измеряется усилие, необходимое для создания заданной деформации. Рассчитывается относительное снижение усилия и толщины образца, выраженные в процентах. Также отмечаются визуально определяемые структурные разрушения.

Метод *В* состоит в продольном и поперечном деформировании образцов в динамическом режиме при постоянной силе. Эти испытания могут проводиться либо в варианте *А*, когда опыт продолжается в течение 8000 циклов, либо в варианте *В* с использованием 20 000 циклов нагружения.

Устройство для проведения испытаний представляет собой ролик, который перемещается взад-вперед по образцу, прижимаемый к нему заданной силой. Результаты испытания описываются величиной суммарного индекса потерь. Под этим понимают сумму потерь, выраженную в процентах, от всех использованных нагрузок. Кроме того, проводят визуальный осмотр образцов.

Метод *С* представляет собой динамические испытания при приложении постоянной силы. Этот метод предназначен для оценки уменьшения усилия, которое может выдержать образец, при 40% деформации изделия из пенопласта, как это определяется величиной *IFD*. По результатам визуального осмотра также оценивается уменьшение толщины и возможные структурные разрушения образца. Испытания состоят в том, что на образец оказывается периодическое давление, создаваемое плоской горизонтальной плитой, к которой приложено определенное усилие в вертикальном направлении. Эти испытания могут состоять из 8000 или 20 000 циклов. Результатом испытаний является уменьшение толщины (выраженное в процентах) и величина *IFD* при 40% деформации. Кроме того, дается визуальная оценка материала после испытаний.

Метод *Д* предназначен для динамических испытаний ковровых подушек. Этот метод состоит в том, что образцы подвергаются периодическому деформированию с помощью ролика с резиновым покрытием, к которому прикладывается заданное усилие. С помощью этой методики определяется сохранение возможности удерживать приложенную силу при деформации, равной 65%, а также уменьшение толщины изделия и изменение его внешнего вида.

14.3.9. Определение плотности

Плотность пенопласта измеряют на образцах без внешней корочки путем измерения веса и объема образца правильной формы. Вес определяется на весах, а размеры с помощью калибра. Плотность образца рассчитывают как отношение веса к объему.

14.3.10. Испытания на разрыв

Этот метод предназначен для оценки сопротивления мягких пенопластов износу. Этот метод, известный также под названием «метод блока», проводится на образцах,

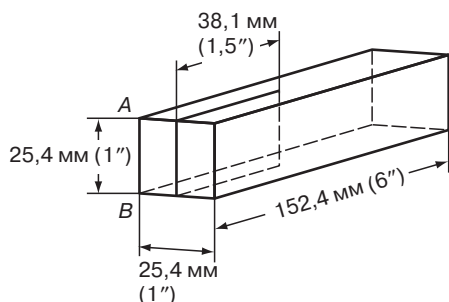


Рис. 14.7. Образец в виде блока для испытаний на разрыв (воспроизведено с разрешения *ASTM*)

показанных на рис. 14.17. Такой образец устанавливается в зажимах испытательной машины. Нагрузка создается путем раздвижения зажимов с постоянной скоростью. Измеряется усилие, при котором происходит разрыв образца. Сопротивление разрушению определяется как отношение максимальной зафиксированной силы к средней толщине образца. Результаты испытаний представляется в ньютонах на метр.

14.3.11. Испытания на растяжения

Этот метод по существу аналогичен методу испытаний на растяжение обычных пластмасс, как это описано в главе 2. Согласно этому методу оцениваются результаты приложения растягивающей нагрузки к пенопласту. При этом измеряются такие параметры, как растягивающее напряжение, предел прочности, предельная степень растяжения при разрыве.

Испытуемые образцы в виде гантели, показанной на рис. 14.8, вырубаются из плоского листа.

Испытания состоят в том, что образец закрепляется в зажимах испытательной машины и растягивается при постоянной скорости движения перемещающегося зажима. За предел прочности принимают отношение силы в момент разрушения образца к его первоначальному сечению.

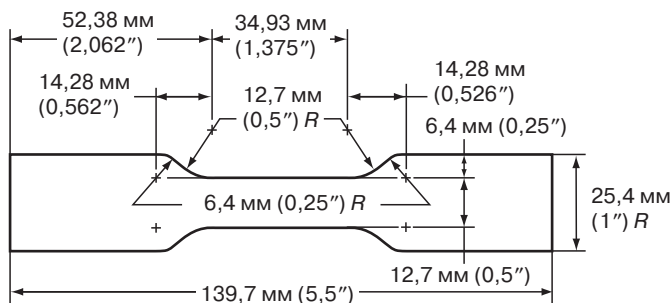


Рис. 14.8. Размеры штампа для вырубki образца в виде гантели, предназначенного для испытаний на растяжение (воспроизведено с разрешения *ASTM*)

14.3.12. Испытания на упругость

Этот метод, называемый также испытанием на отскок шарика, очень полезен для оценки упругости пенопласта. Эксперимент состоит в том, что на поверхность образца пенопласта падает стальной шарик, и измеряется высота его отскока. Прибор для выполнения этих испытаний показан на рис. 14.9. Он состоит из прозрачной

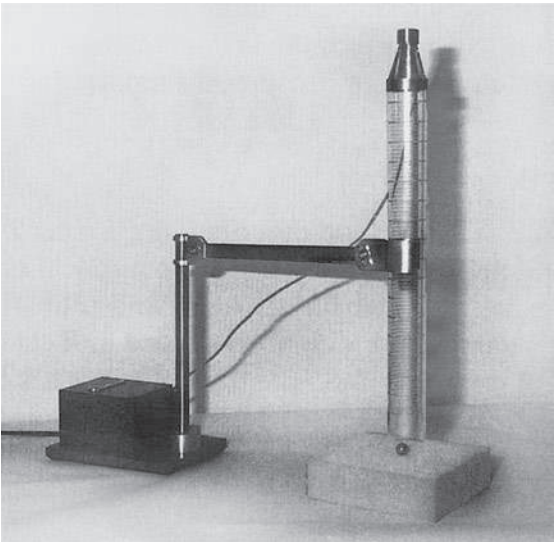


Рис. 14.9. Прибор для измерения упругости по отскоку

Таблица 14.3. Свойства пенопластов

Тип материала	Плотность, фунт/фут ³	Предел прочности, фунт/ дюйм ² , по <i>ASTM</i> <i>D1623</i>	Прочность на сжатие при 10% дефор- мации, фунт/ дюйм ² , по <i>ASTM</i> <i>D1621</i>	Максимально допустимая температура эксплуатации, °F
				сухой материал
АБС-пластик (сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола)	40–56	2,000–4,000	2,300–3,700	176–180
Литьевая марка				
Гранулы				
С добавкой антипиренов	45–55	1,500–3,000		180
Гранулы				
Полиакрилаты	2,6–6,2	—	67–320 ^d	220–230
Доски				
Ацетат целлюлозы	6,0–8,0	170	125	350
Доски и бруски (пенопласт с замкнутыми ячейками)				
Эпоксидные смолы	5	51	90	350

трубки с нанесенными на нее кольцевыми метками, позволяющими оценивать высоту отскока непосредственно в процентах. Шарик должен падать так, чтобы не задеть трубку ни при падении, ни при отскоке. За меру упругости принимается отношение высоты отскока к высоте, с которой падает шарик. Чем больше это отношение, тем выше упругость материала.

14.4. Свойства пенопластов

В табл. 14.3 приведена сравнительная характеристика наиболее важных параметров как жестких, так и мягких пенопластов.

Общие ссылки

1. Frisch K. and Saunders J., *Plastics Foams*, Marcel Dekker, New York, 1972.
2. Benning C.J. *Plastics Foams*, Vols. I and II, Wiley-Interscience, New York, 1969.
3. Remington W.J. and Priser R. «A New Apparatus for Determining the Cell Structure of Cellular Materials» *Rubber World*, 183 (1958), p. 261–264.
4. Harding R.H. «Determination of Average Cell Volume in Foamed Plastics» *Mod. Plast.*, 37(10) (1960), p. 156–160.
5. Benning C.J. and Nutter J.I., «Filled Polyethylene Foams,» *22nd SPE ANTEC*, Montreal, March 7-11, 1966 Reprints.
6. Benning C.J. «Polyethylene Foam: I. Modified PE Foam Systems» *J. Cellular Plast.*, 3(2) (February 1967), p. 62–72.
7. Benning C.J. «Polyethylene Foam, II. Mechanical Properties of Polyethylene Foams Prepared at High and Low Rates of Extrusion» *J. Cellular Plast.*, 3(3) (March 1967), p. 125–137.1

Максимально допустимая температура эксплуатации, °F	Коэффициент теплопроводности, БТЕ/фут ² , по <i>ASTM C 177</i>	Коэффициент линейного термического расширения, 10 ⁵ дюйм/дюйм·°F, по <i>ASTM D696</i>	Диэлектрическая постоянная, по <i>ASTM D1673</i>	Фактор потерь при 28 °C и частоте 1 МГц	<i>WVT</i> (перм·дюйм), по <i>ASTM E96</i>	Адсорбция влаги при (в об. %) при выдержке в течение 96 ч, по <i>ASTM D2842</i>
влажный материал						
—	0,58–2,1	3,7–9,5	—	—	—	0,4–0,6
—		5,1	—	—	—	—
—	0,22	2,9–3,2	1,9	0,004	—	11,8–13,3
—	0,31	2,5	1,12	—	—	13–17 при 100%, относительная влажность 1,9–2,5 при 50% относительная влажность
—	0,26	—	1,19 – 1,08 при 10 ⁶	—	—	—

Продолжение табл. 14.3

Тип материала	Плотность, фунт/фут ³	Предел прочности, фунт/ дюйм ² , по <i>ASTM</i> <i>D1623</i>	Прочность на сжатие при 10% дефор- мации, фунт/ дюйм ² , по <i>ASTM</i> <i>D1621</i>	Максимально допустимая температура эксплуатации, °F
				сухой материал
Замкнутые ячейки				
Предварительно отлитые блоки, заготовки и листы	10	180	260	350
	20	650	1,08	350
Синтетический	14,0–20,0	—	125	350–400
Однокомпонентный вспенивающийся порошок				
Двухкомпонентный литевой влажный песок	20	—	1	—
Жесткие листы, получаемые на месте потребления	23	—	2,1	500
Для использования в виде спреев	1,8–2,0	26–31	13–17	160
Двухкомпонентная система (жидкая)				
Пенопласты, получаемые на месте потребления	2–2,3	—	20–26	200
Двухкомпонентная система (жидкая)				
Сополимеры этилена	35	600–800	—	130
Листы, полученные методом экструзии				
Иономер	2,0–20,0	57–105	24–15,2	150–155
Листы, бруски				
Фенольные смолы	$\frac{1}{3}$ – $1\frac{1}{2}$	3–17	2–15	—
Пенопласты, получаемые на месте потребления				
Жидкие смолы	2–5	20–54	22,85	Постоянное использование при 300
	7–10	80–130	158–300	
	10–22	—	300–1,200	—
Синтетические продукты, пригодные для заливки	50–60	>1000	8 000–13 000	275
Двухкомпонентные системы, жидкости и пасты				
Вспениваемые смолы на основе полифениленоксида	50	3,3	5,5	200
Гранулы				
Полибензимидазол	3–6	44–125	30–125	600
Выдувные				
Заготовки				
Синтетические	15–38	200–2000	700–4,310	600
Литьевые порошки, заготовки				
Поликарбонат	50	5500	7,5	270
Гранулы				
Полиэтилен	1,3–2,6	20–30	5	160–180
Пенопласты низкой плотности				
Планки, стержни, профильные изделия, сетки				
Листы из несшитых полимеров	2,1–3,3	35–100	3	160–180
Трубы из несшитых полимеров	2,1–3,3	—	—	160–180
Листы, ролики, корд из сшитых полимеров	1,6–2,4	40–70	2,9–3,0	175–200
Пенопласты промежуточной плотности	3,6–4,4	70–110	4,3–14	180–200
Планки, ролики из сшитых полимеров	5,5–7	110–210	2–18	180–200

Максимально допустимая температура эксплуатации, °F	Коэффициент теплопроводности, БТЕ/фут ² , по <i>ASTM C 177</i>	Коэффициент линейного термического расширения, 10 ⁵ дюйм/дюйм·°F, по <i>ASTM D696</i>	Диэлектрическая постоянная, по <i>ASTM D1673</i>	Фактор потерь при 28 °C и частоте 1 МГц	<i>WVT</i> (перм·дюйм), по <i>ASTM E96</i>	Адсорбция влаги при (в об. %) при выдержке в течение 96 ч, по <i>ASTM D2842</i>
влажный материал						
—	0,28	—	и 10 ¹⁰ 1,36–1,24 при 10 ⁶	—	—	—
—	0,32	—	и 10 ¹⁰ 1,55– 1,41 при 10 ⁶	—	—	—
—	<0,5	—	и 10 ¹⁰ 1,38	0,006	—	—
—	0,38	—	1,45	0,01	—	—
—	0,36	—	—	—	—	1,8
—	0,11–0,12	—	—	—	—	—
—	0,11–0,13	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	<0,5
—	0,27–0,34	—	1,5 при 10 ⁶	0,003	0,34–2,00	0,40–1,0
—	0,21–0,28	—	—	—	—	—
—	0,20–0,22	0,5	—	—	2 фунт/фут ³ 5 фунт/фут ³ 2,074 г 1,844 г/с ₂ (сутки·м ²)	13–51 при 100% относительная влажность 1–4 при 50% относительная влажность
—	0,24–0,28	—	1,19–1,2	0,028–0,031	—	10–15 при 100% относительная влажность
—	—	—	1,19–1,2	0,028–0,031	—	1–5 при 50% относительная влажность
—	1	10	2,1	0,03	—	>0,5
—	0,86 ^c	3,8·10 ^{–5}	216	0,002	—	—
—	0,216	—	—	—	—	—
—	0,42–0,78	—	1,82–2,40	—	—	—
—	1,05 ^c	2,5	220	0,001	—	—
—	0,28–0,40	9,5–2,3	1,05 при 10 ⁶	0,0002 при 10 ⁹	0,4	<0,50
—	0,28–0,34	2,3	1,05 при 10 ⁶	0,0002 при 10 ⁹	0,20–0,40	<0,50
—	0,26–0,28 при 40°F, в среднем	2,3	—	—	0,13	<0,50
—	0,25–0,28	—	—	—	—	0,1 (24 ч)
—	0,3	—	1,06 при 10 ⁶	0,0002 при 10 ⁹	<0,40	<0,50
—	0,32–0,34	—	1,07 при 10 ⁶	0,0002 при 10 ⁹	<0,40	<0,50

Продолжение табл. 14.3

Тип материала	Плотность, фунт/фут ³	Предел прочности, фунт/ дюйм ² , по <i>ASTM</i> <i>D1623</i>	Прочность на сжатие при 10% дефор- мации, фунт/ дюйм ² , по <i>ASTM</i> <i>D1621</i>	Максимально допустимая температура эксплуатации, °F
				сухой материал
Пенопласты высокой плотности	9,0–10,5	210–300	15–30	180–200
Отливки и формы с твердой интегральной оболочкой	25,0–50,0	1,2	1,3	230
Пенопласты из сшитых полимеров	0,9–12,5	46–210	2,0–18,5	180
Ролики, листы				
Полипропилен	0,6	20–40	0,7	250
Пенопласты низкой плотности				
Ролики, листы				
Пенопласты высокой плотности	35	1,6	2,1	
Отливки и формы с твердой интегральной оболочкой				
—	—	4,2	—	—
Пенопласты из сшитых полимеров	3	118–147	175–1,200	275
Листы				
Полистирол	1	21–28	13–18	165–175
Формы, доски и палки	2	42–68'	35–45	165–175
Литьевые изделия, получаемые из вспениваемых листов				
	5	148–172	85–130	165–175
Доски и палки, получаемые методом экструзии	1,5–20	55–70	25–55 при 5%	
	2,0–2,6	60–105 при 5%	25–60	165–175 (после старения)
	2,0–5,0	180–200	100–180 при 5%	
Пленки и листы, получаемые методом экструзии	6	300–500	42,5 52,5	170–175 (после старения)
	8	400–700		175
	10	600–1000	68	175
Полиуретаны	1,3–3,0	15–95	15–60	180–250
Жесткие (с замкнутыми ячейками)				
Отливки, доски, блоки, заготовки, трубы, покрытые одно-, двух или трехкомпонентными составами для получения пенопластов на месте потребления. Для спреев, свободной заливки или техники вспенивания при заливке	4–8	90–290	70–275	200–250
	9–12	230–450	290–550	250–275
	13–18	475–700	650–1,100	250–300
	19–25	775–1300	1200–2000	250–300
	26–40	1350–2500	2100–4000	275–300
	41–70	3000–8000	5000–15 000	300
Мягкие, полученные свободным вспениванием (заготовки)	0,9–8,0	8–45	0,2–2,0 при 25%	150–175
Заготовки, листы, блоки и формы для товаров повседневного спроса				
Мягкие, полученные литьем (для получения пенопластов на месте потребления)	1,2–20,0	10–1350	0,25–100 при	150
Двух-, трех или однокомпонентные системы, смешение которых производится на месте потребления				25%
Пенопласты на основе изоциануратов	1,5–3,0	15–50	20–60	300
Пористые изделия				
Ламинаты	2,0–3,5	20–60	30–70	300

Максимально допустимая температура эксплуатации, °F	Коэффициент теплопроводности, БТЕ/фут ² , по <i>ASTM C 177</i>	Коэффициент линейного термического расширения, 10 ⁵ дюйм/дюйм·°F, по <i>ASTM D696</i>	Диэлектрическая постоянная, по <i>ASTM D1673</i>	Фактор потерь при 28 °C и частоте 1 МГц	<i>WVT</i> (перм-дюйм), по <i>ASTM E96</i>	Адсорбция влаги при (в об. %) при выдержке в течение 96 ч, по <i>ASTM D2842</i>
—	0,34–0,40	—	1,15 при 10 ⁶	0,0002 при 10 ⁹	<0,40	<0,50
230	0,92	4,18	—	—	—	0,22
—	0,27–0,4	<13	1,1–1,55	0,002 – 0,0007	—	0,1–0,5
—	0,27	—	1,02 при 10 ⁴	0,00006 при 10 ⁴	—	0,02 (3 ч)
—	—	—	—	—	—	—
275	0,27	—	—	—	—	0,5
—	0,26	3,0–4,0	1,06 – 1,02	0,0001–	1,2–6,0	2–6
—	0,24	3,0–4,0	при 10 ³ до 10 ⁶ циклов	0,0007 при 10 ² до 10 ⁶ циклов	0,6–1,2	2–4
—	0,246	3,0–4,0	—	—	0,4–0,6	2–4
—	0,21–0,29 ^b	—	—	—	—	—
—	0,23–0,26 ^c	—	—	—	—	—
—	0,17–0,19 ^b	3,0–4,0	<1,05 при 10 ² до 10 ⁸ циклов	<0,0004 при 10 ³ до 10s циклов	0,3–1,1	1
—	0,18–0,21 ^d	—	—	—	—	—
—	0,24 при 70°F средняя температура	—	1,27	0,000	1,5	—
—	—	—	—	—	1,25	—
—	—	—	1,28	0,000	1	—
—	0,11–0,17 ^{e,f}	4–8	1,05	—	0,6–4,0	1,0–5,0
—	0,21	—	—	—	—	—
—	0,15–0,21 ^{e,f}	4	1,1	0,002	0,9–2,0	0,6–2,0
—	0,21–0,29 ^{g,h}	—	—	—	—	—
—	0,19–0,25 ^{e,f}	4	1–,2	0,003	—	—
—	0,31–0,35 ^{g,h}	—	—	—	—	—
—	0,26–0,34 ^{e,f}	4	1,3	0,006	—	—
—	0,36–0,40 ^{f,g}	—	—	—	—	—
—	0,34–0,42 ^{d,f}	4	1,4	—	—	0,2
—	0,42–0,52 ^{e,f}	—	—	—	—	—
—	—	4	1,5	—	—	—
—	0,57 ^g	4	—	—	0,08	—
—	0,2–0,25 при 2 фунт/фут ³ плотности	—	1,0–1,5	—	—	—
—	0,3 при 2 фунт/фут ³	—	1,1	—	—	—
—	0,105–0,17	4	—	—	3	1,5
—	0,11–0,16	4	—	—	3	1,5

Тип материала	Плотность, фунт/фут ³	Предел прочности, фунт/ дюйм ² , по <i>ASTM</i> <i>D1623</i>	Прочность на сжатие при 10% дефор- мации, фунт/ дюйм ² , по <i>ASTM</i> <i>D1621</i>	Максимально допустимая температура эксплуатации, °F
				сухой материал
Свободная заливка	1,5–3,0	25–75	20–80	300
Спреи	2,0–3,0	20–60	20–65	300
Полужесткие пенопласты, получаемые вспениванием на месте потребления	1,2–26,0	20–1,350	20–2,100	175–350
Отливки с интегральной оболочкой (мягкие)	25–65 (пов.)	20–1,350	1–5 при 25%	150–175
Двух- и трехкомпонентные системы	5–20 (ядро)			
Отливки с интегральной оболочкой (жесткие)	25–65 (пов.)	100–2,700	40–3,000	150–250
Двух- и трехкомпонентные системы	3–30 (ядро)			
Микроячеистые эластомеры	20–70	50–2,500 при 50%	50–2,500 при 25%	200
Двух- и трехкомпонентные системы		5–100 при 10%		
Поливинилхлорид	13–60	—	—	150–175
Механически вспененные пластизоли				
Жидкие или пастообразные				
Пластизоли, содержащие вспенивающие агенты	3–60	50–3,000	—	150–175
Жидкие или пастообразные				
Жидкие с открытыми ячейками	10–цр	10–200	—	125–225
Листы и ролики, подушки с оболочкой				
Другие литьевые формы				
Мягкие с замкнутыми ячейками	4,0–11	50–150	0,5–40,0	130–150
Жесткие с замкнутыми ячейками		(D412)		
Жесткие с замкнутыми ячейками	2–4	1000 и выше	—	—
Листы и палки				
Силиконы	9,6	—	—	400
Жидкие с 10% замкнутых ячеек	(неограни- ченно)		—	
Жидкие с замкнутыми ячейками	21,0–31,0	100–150	10 при 75%	500–650
Листы с открытыми ячейками	10	45	5 при 75%	500
Листы с замкнутыми ячейками	25–34	80–100	1,5–2,9	450
Сополимер стирола с акрилонитрилом	0,5	—	1,5 при 5%	—
Изделия или формы, полученные литьем из вспениваемых гранул, гладкие доски	0,8 1	20 30	6,0 при 5% 6,0 при 5%	170–190 —
Мочевиноформальдегидные смолы	0,8–1,2	Низкий	5	120
Блоки, клочки, получаемые вспениванием на месте приме- нения				

^a При 5%.

^b При 40 °F.

^c *ASTM C177*.

^d При 70 °F.

^e Вспенено со фторуглеродородом.

^f Первое число в каждой последовательности относится к свежему материалу, второе число – к материалу после старения.

^g Вспенено с CO₂.

^h *ASTM D1056*.

Воспроизведено с разрешения *McGraw-Hill Company, New York*.

Максимально допустимая температура эксплуатации, °F	Коэффициент теплопроводности, БТЕ/фут ² , по <i>ASTM C 177</i>	Коэффициент линейного термического расширения, 10 ⁵ дюйм/дюйм·°F, по <i>ASTM D696</i>	Диэлектрическая постоянная, по <i>ASTM D1673</i>	Фактор потерь при 28 °C и частоте 1 МГц	<i>WVT</i> (перм·дюйм), по <i>ASTM E96</i>	Адсорбция влаги при (в об. %) при выдержке в течение 96 ч, по <i>ASTM D2842</i>
влажный материал						
—	0,11–0,17	4	—	—	3	1,5
—	0,115–0,17	4	—	—	3	1,5
—	0,11–0,30	—	2,2	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—
—	0,12–0,80	4	2,5	—	—	—
150	—	—	—	—	—	—
—	Зависит от плотности	—	—	—	—	—
—	Зависит от плотности	—	—	—	—	—
—	Зависит от плотности	—	—	—	—	—
—	0,24–0,28 при 70 °F	—	—	—	0,20 максимум	нуль
—	2,0 при 70 °F	4,0–6,0	—	—	—	—
—	—	—	1,42 при 10 ⁵	0,001 при 10 ⁵	—	—
—	0,36	—	1,3–1,4	<0,01	—	0,1
—	0,6	—	1,2	0,007	—	—
—	—	—	—	—	—	Максимально 5% ^h
—	0,32	—	—	—	—	—
—	0,29	—	—	—	2,0–4,0	нуль
—	0,29	—	—	—	—	—
—	0,18–0,21	—	—	—	28–35	1,9

15. Анализ причин разрушения

15.1. Введение

Фундаментальная проблема, касающаяся выявления причин разрушения изделий из полимерных материалов, состоит в отсутствии понимания различий природы относительно новых материалов, какими являются пластмассы, и традиционных материалов, таких как металлы, дерево или керамика. Инженеры-конструкторы, специалисты в области переработки и потребители готовых изделий — все в равной степени ответственны за эту проблему. Просто копировать продукцию, изготовлявшуюся из металла или дерева, может быть с некоторыми изменениями, диктуемыми эстетическими соображениями, означает столкнуться с непредвиденным разрушением изделия, иногда с катастрофическими последствиями. Проектировщики гораздо лучше знакомы с металлами и их поведением при изменяющихся температурах и условиях окружающей среды. При проектировании металлических изделий конструктор может опираться на единую зависимость деформации от напряжения и в большинстве случаев не обращать внимания на изменения температуры, окружающей среды и ползучесть под нагрузкой, то есть на поведение материала при длительной эксплуатации.

Полимерные материалы по своей природе представляют собой вязкоупругие среды, и в отличие от других материалов, их свойства заметно изменяются в зависимости от температуры, действующей нагрузки, окружающей среды и влияния химических агентов. Так, например, хорошо спроектированная деталь может успешно служить длительное время при комнатной температуре и относительно небольших нагрузках. Но та же самая деталь может очень быстро выйти из строя, если изменится окружающая среда, и деталь попадет в условия действия очень низких или высоких температур, причем процесс разрушения может резко ускориться, если нагрузки увеличатся или же на деталь будут воздействовать химические реагенты. Очень часто не принимается во внимание синергический эффект от совместного воздействия всевозможных факторов, таких как температура, ползучесть, воздействие химических веществ, ультрафиолетового излучения и т. д.

Правильный выбор материала для того или иного конкретного приложения представляется одной из основных задач для конструктора изделий из пластмасс. В настоящее время проектировщик имеет перед собой широкий набор полимеров и различных марок одного и того же материала. Выбор из примерно 50 типов полимеров свыше 50 000 марок, поставляемых более чем 500 производителями, представляется отнюдь не легкой задачей. И более того, поскольку в настоящее время отсутствует единая система стандартизации в отношении типа испытываемых образцов, их геометрической формы и методики испытания, сравнение различных материалов становится исключительно трудным.

Программное обеспечения, построенное на основе такой базы данных, как *CAMPUS* (*Computer-Aided Material Preselection by Uniform Standards* — Автоматизированный предварительный выбор материала на основе унифицированных стандартов), помогает сопоставить данные, полученные с помощью унифицированных мировых стандартов. Более подробное обсуждение базы данных *CAMPUS* дается в главе 20, озаглавленной «Унифицированные мировые стандарты испытаний материалов». Тем не менее конструктор должен принять во внимание влияние всех внешних факторов, прежде чем сделать окончательный выбор в пользу того или иного материала для того, чтобы избежать непредвиденного разрушения изделия в случае, если этот выбор будет сделан неверно.

В процессе эксплуатации полимерный материал находится в суровых физических условиях: на него могут воздействовать высокие температуры, большие давления, высокие скорости деформации и различные химические агенты. При переработке материала необходимо тщательно следовать указаниям, даваемым производителем материала, правильно выбирать технологический режим и быть уверенным, что выбрано оптимальное оборудование, обеспечивающее требуемые условия переработки полимера. При этом необходимыми элементами технологического процесса являются качество перерабатывающего оборудования, контроль технологического процесса и наличие документации, описывающей последовательность технологических операций. Довольно часто случается так, что использование вполне надежного и известного оборудования не позволяет получить эстетически привлекательные изделия с достаточно высокой производительностью, что приводит к неожиданным проблемам.

Потребитель готовых изделий также должен быть обучен производителем полимерных материалов в отношении правильного использования полимера, и при этом он должен быть уверенным, что выбранный материал отвечает желаемым условиям применения изделия. Изделия из пластмасс часто выходят из строя из-за их умышленного или неумышленного неверного применения.

Наконец, следует подчеркнуть, что компании в течение многих лет практикуют последовательное преодоление трудностей взаимного непонимания на пути внедрения новых материалов (рис. 15.1).

Разработка нового изделия начинается от запроса маркетингового отдела, который формулирует требования к продукции, включая его функциональные характеристики и внешний вид. Группа дизайнеров, которая может входить в компанию, а может работать независимо от нее, предлагает общий вид изделия. При этом основное вни-

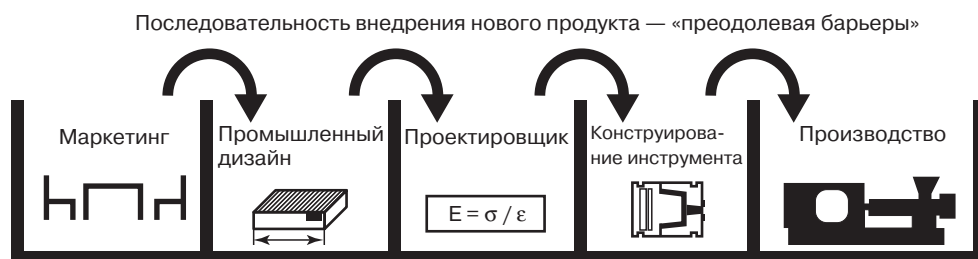


Рис. 15.1. Путь внедрения нового материала (воспроизведено с разрешения *Hanser Publications*)

вание уделяется его основным функциональным характеристикам и эстетичности его внешнего вида. Пока не делаются никакие инженерные расчеты. После выбора внешнего вида изделия к работе приступает проектировщик. Его основной задачей является тщательно изучить, насколько предлагаемое изделие будет работоспособно в предполагаемых условиях его эксплуатации при возможных нагрузках и воздействии окружающей среды. Здесь существенную помощь может оказать изучение прототипов и результатов испытаний. Задачей следующей группы, занимающейся проектированием инструмента для производства изделий, является правильное конструирование формы, в которой будет производиться изделие. После того как эта задача выполнена, инструмент передается в отдел производства для организации крупномасштабного выпуска изделий.

На всех стадиях работы каждая группа должна успешно решать свои задачи, и связи между этими группами довольно слабые. Отсутствие взаимодействия между группами на различных этапах создания изделия препятствует взаимному полезному обмену опытом, знаниями и оценок. Последующее изучение причин разрушения изделий также указывает на отсутствие должного взаимодействия между проектировщиками, конструкторами инструмента и производителями готовой продукции. Во многих корпорациях, чтобы минимизировать ошибки при производстве изделий, предпринимаются усилия для сближения работы различных групп (рис. 15.2). Предполагается, что должны быть усилены контакты между различными группам, начиная с анализа проекта и вплоть до крупномасштабного выпуска изделий.

На рис. 15.3 приведена диаграмма, иллюстрирующая относительную долю ошибок при создании изделий из полимеров, которые приводят к их разрушению. Здесь отмечены следующие группы ошибок:

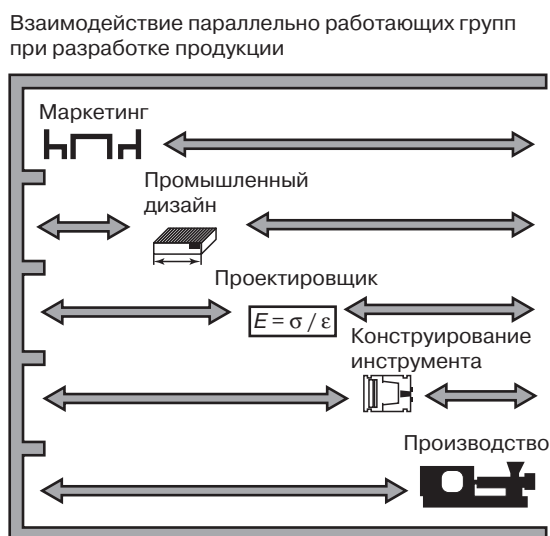


Рис. 15.2. Взаимодействие между параллельно работающими инженерными подразделениями с целью избежать ошибок при выпуске изделий (воспроизведено с разрешения *HanserPublications*)

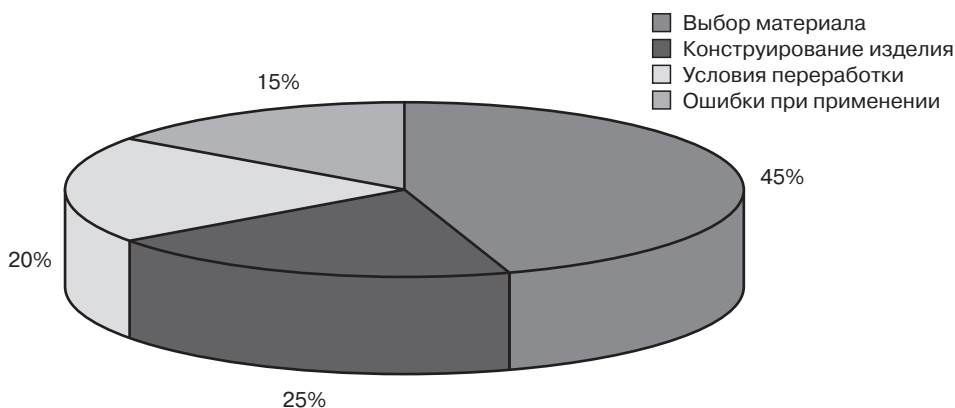


Рис. 15.3. Классификация ошибок при создании изделий из пластмасс, приводящих к их разрушению (воспроизведено с разрешения *RAPRA Technology Limited*)

- неверный выбор материала;
- ошибки при конструировании изделия;
- недостатки процесса переработки;
- применение изделий в неподходящих условиях.

15.1.1. Выбор материала

Ошибки, связанные с опрометчивым выбором материала, довольно часто встречаются в промышленности пластмасс, равно как и в других отраслях промышленности. Если при применении изделия на него оказываются ударные нагрузки, следует выбирать материал, стойкий к удару. Если предполагается использовать изделия в течение длительного времени вне помещения, то необходимо использовать материалы, хорошо противостоящие воздействию ультрафиолетового излучения. Для правильного выбора полимерного материала необходимо тщательно спланировать подход к выбору полимера, понимать эти материалы и разумно использовать опыт испытаний прототипов. Пластмассы — вязкоупругие материалы. Это означает, что при действии на них напряжений они проявляют свойства отчасти твердых тел, а отчасти жидкостей. Это сочетание свойств в той или иной мере характерно для всех полимерных материалов. Поэтому полимер, проявляя свойства твердого тела, характеризуется такими показателями свойств, как упругость, прочность и стабильность формы. В то же время материал проявляет свойства, подобные свойствам жидкости (то есть текучесть), и его поведение зависит от временного фактора, температуры, скорости деформации и уровня приложенной нагрузки. Это также означает, что в отличие от металлов, керамики и других традиционных материалов, для полимеров не выполняется линейная зависимость напряжения от деформации. Конструкторы, привыкшие работать с металлами и другими материалами, часто делают ошибки при выборе полимеров. Именно эта нелинейность свойств полимерных материалов приводит к таким исключительно важным явлениям, как ползучесть, релаксация напряжений и долговечность.

Как общее правило, конструктор начинает выбор материала с изучения баз данных, предоставляемых производителями. Неправильная интерпретация этих данных является одной из наиболее частых ошибок, приводящих к неверному выбору и назначению материала для конкретного применения. Прежде всего необходимо понять назначение предоставляемых производителем баз данных. Эти данные предназначены в основном для сопоставления различных материалов между собой, например, прочности полиамида по сравнению с поликарбонатом или сопротивления ударной нагрузке полистирола по сравнению с АБС-пластиком. Поэтому такие базы данных можно использовать лишь для первоначального отбора материалов. Так, если конструктору нужен достаточно прочный и пластичный материал, то он должен выбрать материалы, у которых предел прочности превышает 7000 фунт/дюйм², а ударная прочность составляет величины не ниже 1,0 (фут·дюйм)/дюйм. Это сразу же исключает из рассмотрения такие материалы, как полистирол общего назначения, полипропилен и полиэтилен.

Базы данных никоим образом не должны применяться для инженерных расчетов и окончательного выбора материала. Необходимо помнить, что приводимые в них характеристики материала получены в результате кратковременных испытаний. Как это уже следует из названия, такие характеристики не учитывают фактор времени и должны рассматриваться как мгновенные. Примером таких характеристик являются предел прочности при растяжении, ударная прочность Изоду, деформационная теплостойкость. Данные такого рода следует рассматривать как однократные. Все эти данные не учитывают роль временного фактора, температуры, влияния окружающей среды, химических агентов и тому подобное. Единственное число, представляющее одну точку на зависимости деформации от напряжения, не может предсказать поведения материала при всех перечисленных условиях.

Стандартизованные испытания, на основании которых составляются базы данных, получены в идеализированных лабораторных условиях (согласно требованиям стандартов *ASTM* и *ISO*) на стандартных образцах, которые имеют мало общего с реальными изделиями, применяемыми в жизни. Все эти испытания проводятся при температурах, скоростях изменения напряжения и деформации, которые очень редко соответствуют реальным условиям эксплуатации изделий [1].

В этом отношении не может быть переоценено правильное использование данных однократных испытаний для выбора подходящего материала.

Это положение прекрасно иллюстрируется классическим примером неправильной интерпретации опубликованных данных и реального смысла и значения результатов испытаний на деформационную теплостойкость (*HDT, heat distortion temperature*) полимеров. Как об этом говорилось в главе 3, испытания на деформационную теплостойкость позволяют получить данные кратковременных измерений, основанные на использовании стандартных образцов в лабораторных условиях. Значения температуры, получаемые в таких испытаниях, указывают лишь на то, что при этой температуре деформация испытуемого образца в виде бруска в определенных условиях составит 0,0010 дюйма. Однако получаемые результаты зависят от уровня остаточных напряжений, величины нагрузки и толщины образца. Поэтому приводимые справочные данные имеют лишь ограниченное значение и не могут служить

Таблица 15.1. Сопоставление значений *HDT* с данными, полученными при длительном воздействии температуры (*UL* температурный индекс)

Материал	<i>HDT</i>	<i>UL</i> температурный индекс
Полифениленсульфид <i>Ryton R-4</i>	>500 °F	338 °F
Полиэфиримид <i>Ultem 4000</i>	412 °F	122 °F

основанием для выбора материала, если изделие предназначено для использования в условиях длительного приложения нагрузки при повышенных температурах.

Данные, получаемые при долговременном пребывании при повышенной температуре, такие как, например, *UL*-индекс, дают более надежные основания судить о том, как материал будет вести себя длительное время под нагрузкой при повышенной температуре. В табл. 15.1 приведены данные по теплостойкости материала, полученные по двум различным методам.

Если конструктор решит выбрать материал для конкретного применения, основываясь на опубликованных данных по деформационной теплостойкости, не учитывая истинного смысла этого показателя и ограниченности данных, получаемых при этих испытаниях, то результат будет ужасающим. Обратите внимание на то, что предельная температура эксплуатации изделий из полифениленсульфида, содержащего 40% стекла в качестве армирующего наполнителя, которая определена по *UL* температурному индексу, составляет всего 338 °F, в то время как деформационная теплостойкость, определенная по методике кратковременных испытаний превышает 500 °F. Таким образом, рассматриваемый материал не может длительно эксплуатироваться под нагрузкой при температурах, превышающих 338 °F.

Выбор материала, основанный на данных многоточечных испытаний

Как было сказано выше, трудности выбора материала обусловлены ограниченным объемом данных многоточечных испытаний, предоставляемых производителями материалов. Легко доступны справочные данные по результатам однотоочечных испытаний. Однако стоит приложить небольшие усилия, и данные многоточечных испытаний можно получить из таких источников как *CAMPUS* [2], *IDES* [3], а также от всех ведущих производителей полимеров. Данные многоточечных испытаний предоставляются в виде таблиц или графиков, представляющих собой зависимости сдвигового модуля от температуры, изохронных кривых напряжение–деформация, данных по ползучести при, как минимум, трех различных температурах и четырех уровнях напряжения. При проектировании изделий, которые должны выдерживать многократные ударные нагрузки, конструктор должен ориентироваться на данные, получаемые при инструментальном контроле испытаний на удар. Такие данные дают ценную информацию относительно перехода от пластического к хрупкому разрушению и описанию поведения полимера в течение всего процесса испытаний.

Значения модуля также часто интерпретируются неверно. В качестве характеристики жесткости полимера, проявляемой при длительном нагружении, часто используют значения модуля изгиба, полученного при кратковременных испытаниях. Однако значения модуля изгиба получают, исходя из данных, относящихся при очень небольших деформациях, отвечающих линейному участку деформационной кривой.

Эти данные не соответствуют эксплуатации изделий в реальных условиях, причем они дают завышенную оценку жесткости готовых изделий. Детали из пластмасс часто разрушаются из-за того, что не была учтена ползучесть материала при его применении. Ползучесть пластмасс имеет место даже при очень небольших нагрузках и малых деформациях и в области комнатных температур. При проектировании изделий необходимо учитывать возможность ползучести или изменения эффективного модуля при работе изделия под нагрузкой в течение длительного времени.

Процедура выбора материала

При выборе материала не следует ориентироваться только на его стоимость; следует исходить из того, что данный материал должен наилучшим образом соответствовать конкретным условиям применения изготовленного из него изделия. Правильный выбор материала должен основываться на точном знании требований по условиям применения изделия, которые определяют необходимые значения механических, термических, электрических, химических свойств и сопротивления воздействию окружающей среды. Во многих случаях достаточно изготовить тонкостенную деталь, имея в виду прекрасное соотношение жесткости к весу, достигаемое при использовании довольно дорогих современных инженерных пластмасс быстрым циклом переработки [4].

Многие компании предлагают программное обеспечение, которое помогает выбрать материал, просто подбирая его исходя из относительной значимости предъявляемых требований при его применении. Выбор полимера начинается с аккуратной формулировки требований, что позволяет сузить круг кандидатов, исключая непригодные материалы. Проектировщик должен точно указать необходимые уровни требуемых механических, термических и химических свойств. Также необходимо учесть все дополнительные требования, такие как возможность ультрафиолетового облучения при наружном применении, прозрачность, долговечность, ограничения по ползучести и релаксации напряжений. Следует также принимать во внимание необходимые требования по выбору технологии переработки и сборки конструкций, в которые входит проектируемая деталь. Многие полимеры плохо противостоят действию различных химических веществ. Поэтому требуется также учесть возможность воздействия химических агентов, имеющихся в окружающей среде, на создаваемое изделие. Ни один единичный фактор не отражает способность материала противостоять действию различных химических веществ, поскольку на это влияют такие обстоятельства применения материала, как внешние напряжения остаточные напряжения, возникшие в процессе переработки, длительность экспозиции, температура, концентрация реагента в окружающей среде. Все это необходимо учитывать при выборе материала.

Некоторые из характерных ошибок при выборе материала обусловлены использованием опубликованных данных, неправильной интерпретацией справочных данных и слепым восприятием рекомендаций поставщика материала. Данные по свойствам материала, приводимые в справочных руководствах, годятся только для скрининга среди различных типов и марок полимеров, но никак не могут использоваться для окончательного выбора материала и инженерных расчетов. Как уже говорилось ранее,

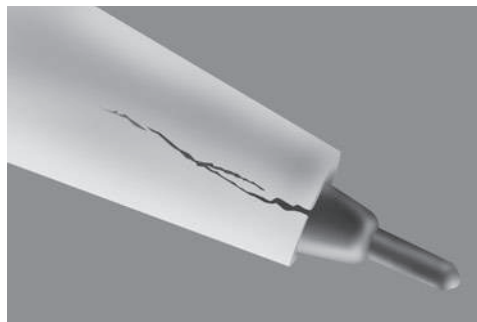


Рис. 15.4. Характерный пример разрушения изделия из-за неправильного выбора материала (воспроизведено с разрешения *Hanser Publications*)

справочные данные, как общее правило, основаны на результатах кратковременных испытаний стандартных образцов, выполнявшихся в лабораторных условиях. Эти данные, вообще говоря, дают завышенные оценки свойств материалов, которые не соответствуют реальным условиям эксплуатации изделий, кроме того, они не учитывают влияния временного фактора, температуры, окружающей среды и химических реагентов.

На рис. 15.4 приведен характерный пример разрушения изделия из-за неправильного выбора материала.

Чтобы помочь конструктору с выбором необходимого материала, поставщик предлагает ответить на вопросы опросного листа (рис. 15.5). Более полный опросный лист такого типа приведен в приложении К. Ниже даны пояснения к характеристикам, указанным в опросном листе.

Механические свойства

- предел прочности при растяжении и модуль;
- прочность при изгибе и модуль;
- ударная прочность;
- прочность при сжатии;
- долговечность;
- ползучесть;
- релаксация напряжений.

Необходимо учесть данные, полученные как при кратковременных, так и долгосрочных испытаниях. При этом результаты кратковременных испытаний используются для сопоставления и скрининга кандидатов, а по результатам долгосрочных испытаний осуществляется окончательный отбор материала. Исследования ползучести и релаксации напряжений для длительного периода нагружения должны быть тщательно проанализированы применительно к интервалу температур, представляющему интерес. Для сопоставления поведения материалов на одном и том же временном базисе очень полезны изохронные зависимости деформации от напряжений. Необходимо также учесть результаты многоточечного инструментального исследования ударного разрушения, которые позволят оценить затраты энергии,

Опросный лист для выбора материала при проектировании нового изделия

Этот лист содержит перечень вопросов, которые имеют определяющее значение для выбора материала при проектировании нового изделия. Ответы на поставленные вопросы помогут для быстрого и обоснованного выбора материала

Имя _____ Дата _____
Потребитель _____ Деталь _____

Расчет времени для выполнения заказа _____

Заказчик _____

Материал, используемый в настоящее время _____

Его характеристики _____

Комментарии _____

Функции изделия — для каких целей оно предназначено? _____

Внешний вид

Прозрачное изделие

- ☐ Прозрачное как вода
☐ Очень прозрачное
☐ Просто прозрачное
☐ Цвет в проходящем свете
- Максимальный уровень мутности _____
Максимальный уровень мутности _____

Комментарии _____

Непрозрачное изделие

- ☐ Блестящая поверхность
☐ Не очень блестящая поверхность
☐ Не отражающая поверхность
☐ От самого полимера ☐ После покраски ☐ От изделия, извлеченного из формы

Комментарии _____

Желательный цвет _____

- ☐ Цвет полимера ☐ Цвет краски ☐ Цвет покрашенного изделия

Критичность сохранения цвета _____ %

- ☐ При дневном свете ☐ При свете лампы накаливания
☐ При свете флуоресцентной лампы ☐ При любом свете (вариации цвета недопустимы)

Комментарии _____

Вид поверхности изделия, имеющей принципиальное значение – Пожалуйста, приложите рисунок

	Нет	Должны быть незаметны	Минимально допустимы	Непринципиально
Следы от литников	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Раковины	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Линии смятия	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Комментарии _____

Вид мест изделия, которые критичны при сборке конструкций с участием этого изделия, пожалуйста, приложите рисунок

Комментарии _____

Рис. 15.5. Опросный лист, используемый при подборе требуемого материала — см. также Приложение К (с разрешения *Bayer Corporation*)

необходимые для достижения данной деформации, и для полного разрушения образца. Пластмассовые детали часто разрушаются из-за невозможности сопротивления ударным нагрузкам в области низких температур. Результаты инструментального контроля ударного разрушения в области низких температур, хотя обычно отсутствуют в базе данных, но могут быть получены у большинства основных поставщиков полимерных материалов.

Термические свойства

Как это обсуждалось выше в настоящей главе, результаты испытаний на деформационное размягчение и на определение точки размягчения по Вика могут использоваться только для первоначального скрининга материалов. Большой смысл имеют данные, полученные при непрерывном воздействии температуры, и значения коэффициента термического расширения, которые могут применяться для окончательного выбора материала.

На рис. 15.6 показан пример детали, которая разрушилась, поскольку была изготовлена из неправильно подобранного материала, выбор которого был основан на данных кратковременных материалов.

Полимерные материалы в любой области температуры расширяются и сжимаются в 7–10 сильнее, чем традиционные материалы типа металлов, дерева или керамики. Проектировщик должен хорошо понимать это обстоятельство и обращать особое внимание на это при сборке конструкций из деталей, изготовленных из различных материалов. Различие коэффициентов термического расширения при контакте двух разнородных материалов приводит к возникновению внутренних напряжений, что в итоге может вызывать разрушение изделия. Этот же эффект возникает и трубопроводах, где значительные напряжения вследствие сжатия-растяжения могут появляться на стыке труб и фитингов, а также при контакте между трубой и поддерживающей ее конструкцией. Созданная конструктивно возможность небольших вариаций длины трубопроводной системы вследствие изменения температуры в целом благоприятна для надежности ее эксплуатации, независимо от того, из каких материалов изготовлены детали этой системы. Такие конструктивные решения способствуют уменьше-



Рис. 15.6. Пример разрушения, обусловленного неправильным выбором материала, сделанным на основании кратковременных испытаний

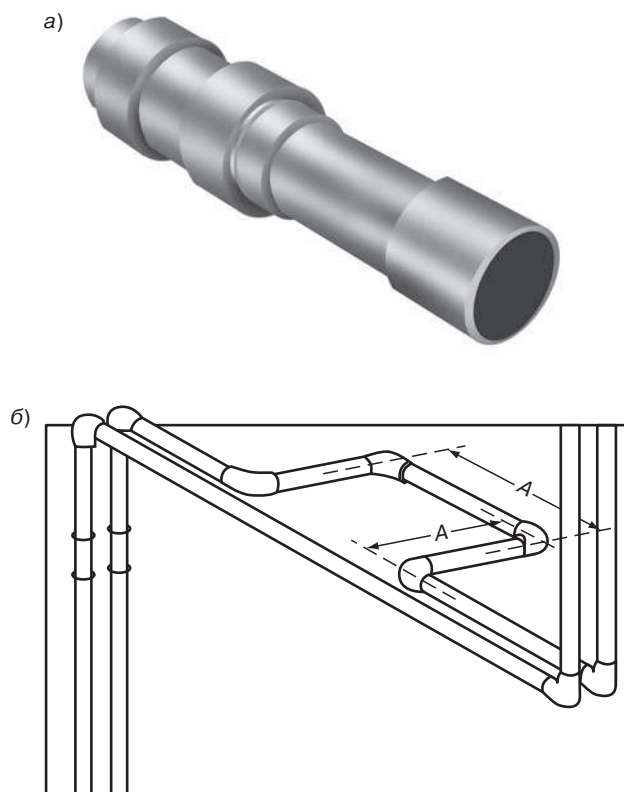


Рис. 15.7. Типовая конструкция петли, устроенной для компенсации температурных напряжений (а), и применяемая схема соединений (б)

нию напряжений и их перераспределению, что в итоге ограничивает возможности колебаний размеров. Поэтому то, что определенной части трубопроводной системе предоставляется возможность контролируемого растяжения-сжатия, является приемлемым способом предотвращения роста напряжений выше недопустимого уровня, который мог бы привести к разрушению структурного единства трубопровода или к отрыву трубы от опоры [5].

На рис. 15.7 показана типичная конструкция петли и мест ее соединения, призванная компенсировать эффекты расширения и сжатия.

Воздействие химических реагентов

Один из важнейших факторов при правильном выборе материала — это оценка сопротивления полимера воздействию различных химических веществ. Как говорилось выше, роль этого фактора проявляется по-разному в зависимости от длительности экспозиции, температуры, остаточных напряжений и концентрации химического реагента. Важнейшую роль при этом играют конструкция изделия и правильный выбор технологического режима его получения. Так, например, влияние концентрации напряжений резко возрастает, если при конструировании изделия отношение радиуса



Рис. 15.8. Влияние кристалличности на сопротивление воздействию химических агентов

закругления к толщине стенки было выбрано меньшим 0,4. Как правило, кристаллические полимеры лучше противостоят действию химических реагентов по сравнению с аморфными полимерами (см. рис. 15.8). Поэтому если по условиям эксплуатации деталь, сделанная из полимера, подвергается постоянному воздействию какого-либо химического агента, предпочтительно использовать кристаллический полимер.

Взаимодействие полимера с химическими агентами могут привести к таким явлениям, как физическое разрушение, выражающееся в появлении трещин под действием напряжений, размягчению и набуханию материала, утрате первоначального цвета, а также к химическим реакциям и, в конечном счете, — к потере исходных физических свойств материала.

На рис. 15.9 показан пример детали, которая разрушилась в результате воздействия химического реагента.

Роль окружающей среды

Полимерные материалы чувствительны к воздействию окружающей среды. Оценка влияния внешней среды связана с определением роли таких факторов, как ультрафиолетовое, инфракрасное и рентгеновское излучение, высокая влажность, экстремальные природные явления, загрязнения от промышленных выбросов, микроорганизмы, бактерии, грибы и контакт почвой. Комбинированное воздействие этих факторов может оказаться гораздо более сильным, чем каждого из них по отдельности, так что процесс деградации может ускориться во много раз. Очень важно понять, что опубликованные данные не учитывают синергетический эффект взаимовлияния различных факторов воздействия окружающей среды, которые в реальной жизни практически всегда накладываются друг на друга. При проектировании изделий из

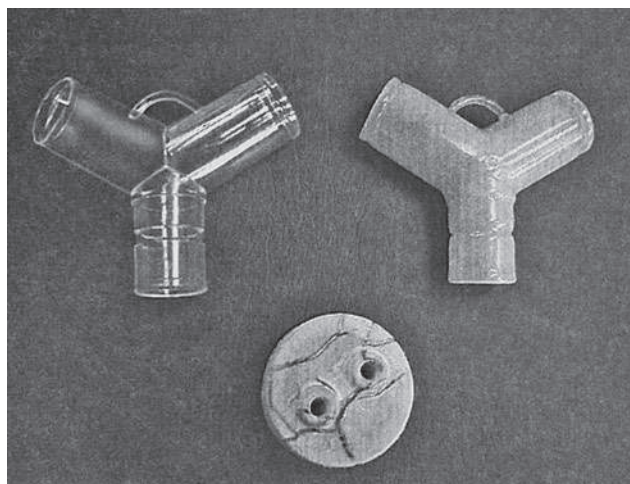


Рис. 15.9. Разрушение детали в результате воздействия химического реагента

пластмасс необходимо помещать эти изделия в экстремальные условия, подобные тем, которые встречаются в реальной жизни.

Требования регулирующих организаций

Выбор материала может основываться на требованиях регулирующих организаций, таких как гарантийные лаборатории (*Underwriters Laboratories, UL*), Национальная организация по санитарному контролю (*National Sanitation Foundation, NSF*) и Администрация по контролю за пищевыми и лекарственными товарами (*Food and Drug Administration, FDA*). Это относится к таким требованиям к свойствам материала, как горючесть и токсикология.

Экономика

Как уже говорилось ранее, выбор материала не должен быть основан только на экономических соображениях. Наиболее логично выбрать три или четыре кандидата, исходя из описанной выше процедуры селекции, а затем остановиться на одном из них, представляющем наибольший экономический интерес.

Другие соображения

При выборе материала нельзя забывать о технологических аспектах, таких как оптимальный вариант процесса получения изделия, вторичные операции и условия сборки конструкции, в которую включается получаемое изделие.

15.1.2. Дизайн

Правильный выбор материала сам по себе еще не гарантирует изделие от разрушения. При конструировании конкретного изделия из полимеров необходимо руководствоваться общими правилами и рекомендациями, которые были разработаны и предлагаются поставщиком материала. Необходимо помнить, что если не считать небольшого числа базовых правил, критерии, которые необходимо учиты-

вать при проектировании меняются от материала к материалу, а также зависят от условий применения изделия. Сегодня конструкторы при проектировании изделий из пластмасс сталкиваются с многочисленными проблемами. Наиболее важными аспектами проблемы являются соображения функциональности, технологичности и эстетичности изделия. Конечно, при проектировании неизбежны определенные компромиссы. Однако в некоторых случаях такие компромиссы могут привести к разрушению изделия.

Наиболее общие ошибки, которые допускаются проектировщиками изделий из пластмасс, связаны с выбором толщины стенок, конструкцией углов и острых краев, а также с учетом ползучести и совместимости с окружающей средой. Неправильная конструкция острых углов (недостаточные радиусы переходов) является общей причиной разрушения изделий из пластмасс, по частоте случаев превосходящей все другие причины. Сохранение одинаковой толщины стенки особенно важно для тех частей изделия, где на поверхности встречаются следы раковин, пустоты, усадки и, что наиболее важно, замороженные напряжения, возникшие при литье. В отличие от металлов вязкоупругость, присущая полимерам, побуждает конструктора обращать особое внимание на данные по ползучести и релаксации напряжений. Деформация изделий из пластмасс развивается во времени, причем роль этого фактора зависит от природы полимера, уровня действующей нагрузки, продолжительности ее действия и температуры.

В табл. 15.2 показана типичная схема проектирования изделий из пластмасс.

Выше обсуждалась важность взаимодействия различных инженерных подразделений в успешном проектировании изделий из пластмасс. Серьезный подход к созданию изделий из полимерных материалов, основанный на солидной инженерной базе, имеет критическое значение. Такой подход, включающий систематический анализ всех сторон дела, необходим при создании новых продуктов. Этот логический и научно обоснованный подход включает в себя ряд последовательных этапов. Проектировщик не должен перепрыгивать через те или иные ступени, даже если это диктуется финансовыми соображениями или требованиями экономии времени.

Этапы правильного порядка действий при проектировании изделия

Разработка принципиального вида изделия.

Выбор материала.

Структурный анализ.

Анализ и моделирование технологического процесса.

Получение прототипа изделия.

Критическое рассмотрение I.

Получение прототипа в одногнездной форме.

Критическое рассмотрение II и анализ допусков.

Анализ инструмента и условий охлаждения литьевой формы.

Конструирование промышленной литьевой формы.

Получение образцов, пробные пуски и определение технологических параметров процесса.

Окончательная оценка получаемой продукции и ее приемка.

Таблица 15.2. Типичный пример руководства по проектированию изделий из пластмасс (с разрешения Bayer Corporation)

Руководство по проектированию изделий
производимых литьем под давлением из инженерных термопластов

Требования для выбора материала

- ☐ Величина нагрузок
- ☐ Окружающая среда
- ☐ Продолжительность
- ☐ Контакт с химическими агентами
- ☐ Смазки
- ☐ Особые требования
- ☐ Возможность использования в качестве платы
- ☐ Возможность ударных нагрузок
- ☐ Влажность
- ☐ Возможность УФ-облучения
- ☐ Прозрачность
- ☐ Возможность окрашивания
- ☐ Долговечность
- ☐ Применение чистящих средств
- ☐ Коробление/Усадка
- ☐ Горючесть
- ☐ Цена
- ☐ Испытания при приемке

Подробное описание изделия

- ☐ Наличие радиусов
- ☐ Толщина стенок
- Материал

• Текучесть

• Однородность
- ☐ Ребра
- ☐ Наличие выступов
- Наличие линий сварки

Уклоны

Допуски

Наличие острых углов

Наличие ребер

Наличие выступов

Нанесение надписей
- Прочность

Длина потока при формовании

Обрамление рисунка

Области утолщений

Радиусы

Толщина основания

Радиусы

Толщина основания

Наличие линий сварки

Уклоны

Допуски

Электрические свойства

Слишком тонкий

Ориентация

Области с тонким сечением

Высота

Внутренний диаметр/внешний диаметр

Длина/диаметр

Близость к местам приложения нагрузки

Необходимость полировки

По отношению к конструкции инструмента (вид разрезов, слайды)

Горючесть

Переходы от тонкого к толстому сечению

Резкие изменения сечения

Расположение

Отношение прочности к величине нагрузки

Глубина текстуры

По отношению к выбору материала

Площадь видимости

Не более 0,5 градуса

По отношению к разрезов, слайды)

Требования к сборке

- ☐ Посадка при прессовании Допуски Длительность сохранения Окружные напряжения
- ☐ Посадка в местах заклепок Допустимые деформации
- ☐ Винты Обрезание резьбы при формировании Избегайте раззенковки
- ☐ Резьба, образованная при литье Избегайте тонких краев, резких углов и трубной нарезки
- ☐ Возможность ультразвукового воздействия Направление распространения энергии Области интерференции
- ☐ Соединения, образованные адгезивами или растворителями Толщина стенок Герметичные уплотнения
- ☐ Общие замечания Допуски на посадки при внутренних соединениях Допуски при сборке Термическое расширение
- ☐ Будьте осторожны с установкой заклепок и вкладышей при литье Совместимость компонентов конструкции

Конструирование формы

- ☐ Коробление Охлаждение (углов) Расположение выталкивателей
- ☐ Места впуска Тип Размеры Расположение
- ☐ Литниковые каналы Размеры и форма Размеры литниковой втулки Баланс потоков
- ☐ Общие замечания Окалина, облой Острые углы
- ☐ Уклоны Выталкивание готовых изделий Избегайте тонких и длинных сердечников

Декларация. Условия использования и применения, а также информация (устная, письменная или в иной форме), содержащая любые формулировки и рекомендации по этом вопросам находятся вне нашей компетенции. Поэтому требуется, чтобы испытания нашей продукции, техническая поддержка и информация относительно соответствия вашим требованиям применялись по крайней мере, на основании испытаний, технических характеристик, а также требований техники безопасности, безредности для персонала и потребителей, а также окружающей среде. Такие испытания не обязательно должны выполняться поставщиком. Вся информация дается без соответствующих обязательств и гарантий. Потребитель должен со всей определенностью понять и согласиться с тем, что поставщик свободен от ответственности в случае правонарушений при заключении контрактов или в иных случаях использования нашей продукции, технических консультаций и информации. Все утверждения и рекомендации, не содержащиеся в настоящем документе, не являются официально согласованными и поэтому никак не обязывают поставщика. Ничто сказанное здесь не должно рассматриваться как рекомендация к использованию любого изделия в противоречии с действующими патентами, которые относятся к материалам и их применению. Ни одна лицензия не должна заключать в себе или фактически разрешать незаконное использование каких-либо патентов.

Стадия получения прототипа часто опускается из-за финансовых и временных ограничений. Тем не менее (безотносительно выбранного материала) на стадии изготовления прототипа получается реальная физическая модель изделия, которая позволяет маркетологам, инженерам-конструкторам и производителям совместно обсуждать результаты работы. Использование прототипа для понимания функций, размера, формы, ощущения внешнего вида изделия неизбежно способствует улучшению производственного климата и лучшему взаимопониманию между членами команды, занимающейся разработкой нового изделия [6].

Также очень важен этап структурного анализа инструмента, обычно осуществляемого методом конечных элементов, и моделирование процесса заполнения формы, для чего используется программное обеспечение *Moldflow*. Компьютерное моделирование позволяет инженеру на ранних стадиях проектирования выявить слабые места и потенциальные проблемы. Решение этих проблем до того, как будет сконструирована и изготовлена литейная форма, позволит избежать переделок и преждевременного разрушения изделия при его эксплуатации. Слишком легкий подход к невыполнению последовательных этапов работы очень опасен, поскольку он может привести к выводам, очень далеким от реальной картины. Слишком часто важные обстоятельства, которые, в конечном счете, влияют на качество изделий, неправильно понимаются или вовсе игнорируются. Необходимо правильно оценить соотношения между первичными, вторичными и пиковыми напряжениями, поскольку каждые из них приводят к различным механизмам разрушения, которые следует рассматривать раздельно [7].

Многие причины слишком быстрого выхода изделия из строя связаны с ошибками при конструировании изделия. Среди них следующие пять причин имеют наибольшее значение:

- отсутствие радиусов переходов;
- неправомерные изменения толщины стенок;
- неверное расположение ребер;
- отсутствие совместимости с сопрягаемыми деталями;
- отсутствие понимания явления ползучести.

Все пластмассы чувствительны к надрезам. Наиболее важными причинами, приводящими к разрушению изделий, является концентрация напряжений вблизи острых углов и неправильный выбор радиусов скруглений. Наличие острых углов приводит к двоякой проблеме при анализе свойств полимерных изделий. Во-первых, это увеличивает концентрацию напряжений, возникающих при литье, сохраняющихся в материале и в итоге приводящих к снижению механических свойств и даже катастрофическому разрушению. Во-вторых, это препятствует течению расплава полимера в форме и извлечению готовых изделий.

Обсуждавшиеся выше проблемы иллюстрирует рис. 15.10, который показывает роль концентрации напряжений и эффекта остаточных напряжений в острых углах вблизи оснований двух ребер.

Остаточные напряжения, сохраняемые в отливках, максимальны вблизи основания ребер, поскольку между ребрами был вставлен металлический сердечник, который не позволил осуществиться усадке до того, как изделие было извлечено из

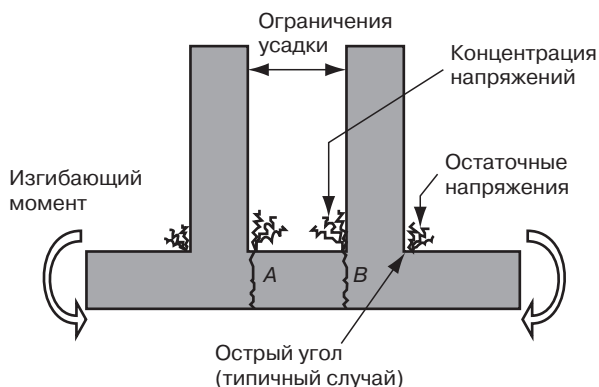


Рис. 15.10. Комбинированное влияние концентрации напряжений и остаточных напряжений вблизи острых углов в основании двух ребер (с разрешения *Bayer Corporation*)

литевой формы. Дополнительным фактором, влияющим на развитие остаточных напряжений, была различная скорость охлаждения утолщенной части изделия при пересечении основания с ребрами. Действующий вдобавок к этим напряжениям фактор концентрации напряжений в острых углах делает эти области уязвимыми даже при приложении небольшого изгибающего момента, что приводит к разрушению в точках A или B [7].

Напряжения очень резко возрастают по мере уменьшения радиуса скругления, как это показано на рис. 15.11, который иллюстрирует эффект концентрации напряжений.

Как видно, с увеличением радиуса при одной и той же толщине стенки отношение радиуса к толщине пропорционально возрастет, и, как следствие этого, снижается

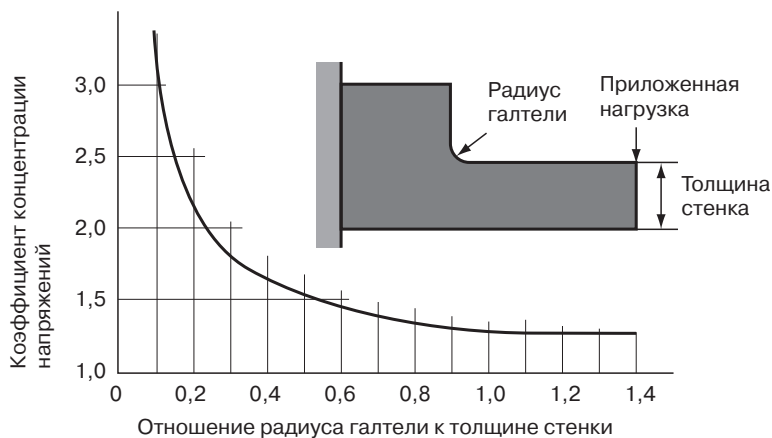


Рис. 15.11. Влияние радиуса скругления на эффект концентрации напряжений

коэффициент концентрации напряжений. Даже сравнительно небольшое увеличение радиуса приводит к очень сильному снижению концентрации напряжений. И напротив, недостаточное увеличение радиуса может привести к ужасающим последствиям. Как общее правило, радиус у внутренних углов должен составлять 30–50% от номинальной толщины стенки, причем в качестве грубого приближения можно принять, что минимальный размер радиуса должен составлять 0,020 дюйма. Радиусы при наружных углах должны быть равны радиусу внутреннего угла плюс толщина стенки. Такие рекомендации приводят к тому, что стенка будет равномерной по толщине, а концентрация напряжений заметно снижается. Важно заметить, что по мере того как искривление поверхности становится все более плоским за пределами отношения радиуса к толщине стенки порядка 1,0, дальнейшее увеличение радиуса не приводит к дальнейшему снижению концентрации напряжений. Более того, чрезмерно большое увеличение радиуса может привести к тому, что стенка оказывается слишком толстой, что способствует возрастанию остаточных напряжений и появлению пустот.

Влияние надреза на такие материалы как поликарбонат, показано на рис. 15.12, на котором видно резкое падение ударной прочности по Изоду по мере того, как надрез становится более острым [8].

На рис. 15.13 и 15.14 показаны типичные случаи разрушения изделий из полимеров, обусловленные отсутствием радиуса скругления в наиболее опасных сечениях изделия.

Общее правило при конструировании изделий из пластмасс состоит в том, что толщина стенок должна быть везде одинаковой. Однако в большинстве случаев требуемая условиями применения сложная конфигурация изделий делает невозможным выполнение этого правила. Конструктор должен соблюдать хорошо установленные принципы конструирования, то есть переход между толстыми и тонкими стенками должен быть плавным с тем, чтобы избежать концентрации напряжений. Это же относится к переходу от толстых к тонким плоскостям. Необходимо делать радиусы скругления при пересечении элементов конструкции. Наружные и внутренние радиусы должны делаться в одном том же месте, чтобы сохранить однородную толщину стенки вблизи угла и т. д. Чрезмерно большая толщина стенки является, возможно, основной причиной коробления детали, образования пор и раковин на утолщенной

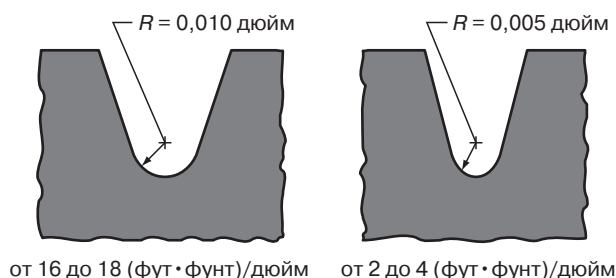


Рис. 15.12. Чувствительность к надрезу очень жесткого материала типа поликарбоната. Приведены данные, свидетельствующие о резком падении ударной прочности по Изоду по мере того как надрез становится более острым (с разрешения Bayer Corporation)

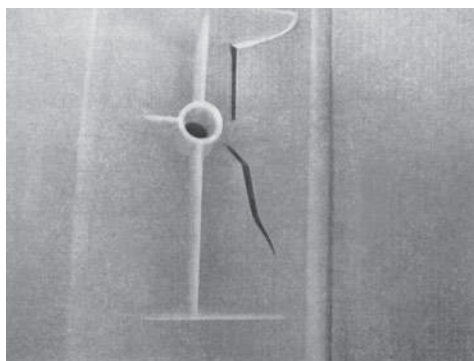


Рис. 15.13. Типичный пример разрушения, произошедшего из-за отсутствия скругления в наиболее опасном месте детали

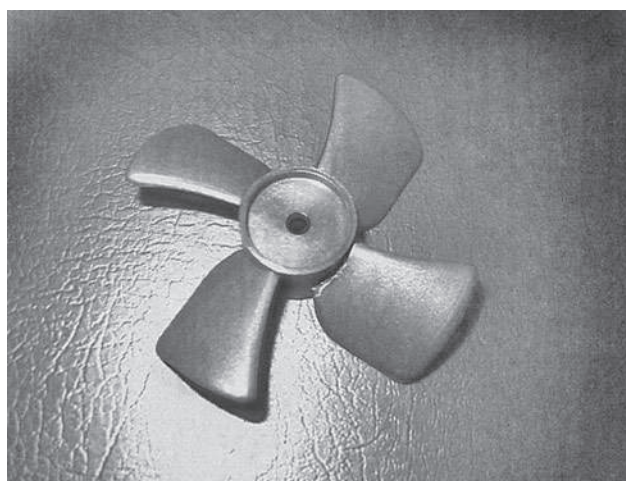


Рис. 15.14. Типичный пример разрушения, произошедшего из-за отсутствия скругления в наиболее опасном месте детали

части изделия. Изменение толщины стенки приводит к появлению внутренних напряжений.

Остаточные напряжения возникают из-за различия скорости охлаждения и разной усадки толстой и тонкой частей изделия. Эти внутренние напряжения постепенно снижают механические свойства, а также способствуют усилению воздействия химических реагентов на полимер. Коробление деталей не только ухудшает их внешний вид, но и приводит к снижению функциональных характеристик. Однако важность этой проблемы еще в большей степени проявляется, если данная деталь является составной частью конструкции. В действительности пластмассовые детали довольно пластичны и небольшое коробление может не препятствовать сборке. Однако после этого деталь находится в деформированном состоянии под постоянным действием напряжений в течение длительного времени, что приводит к образованию трещин.



Рис. 15.15. Разрушение детали из-за чрезмерного перепада толщины стенки

Сочетание внутренних напряжений, возникших из-за неоднородности стенок по толщине, с внешней нагрузкой, возникшей при сборе, способствует экспоненциальному росту вероятности разрушения детали.

На рис. 15.15 показан пример, каким образом разрушается деталь из-за неоднородности толщины стенок.

Как это обсуждалось ранее, конструктор может добиться сохранения однородности стенок по толщине при сохранении требуемой прочности и жесткости без изменения базовой конструкции изделия путем использования ребер жесткости. Правильное использование ребер и корректный выбор мест их установки ребер при сохранении однородной толщины стенок позволяет устранить существенное различие между структурно прочными элементами и особо слабыми частями детали, склонными к разрушению. Неправильная же установка ребер жесткости в общем случае приводит к внутренней усадке, появлению раковин, пустот, что вызывает проблемы при конструировании литейной формы и инструмента.

Желательно руководствоваться следующими правилами для правильного проектирования ребер жесткости:

- толщина ребра у основания должна составлять 50% от толщины стенки, к которой оно примыкает;
- высота ребра не должна превышать 300% от толщины стенки;
- чтобы избежать высокой концентрации напряжений, радиус скругления у основания ребра должен составлять не менее 25% от толщины стенки;
- расстояние между соседними ребрами должно быть не меньше 200% от толщины стенки;

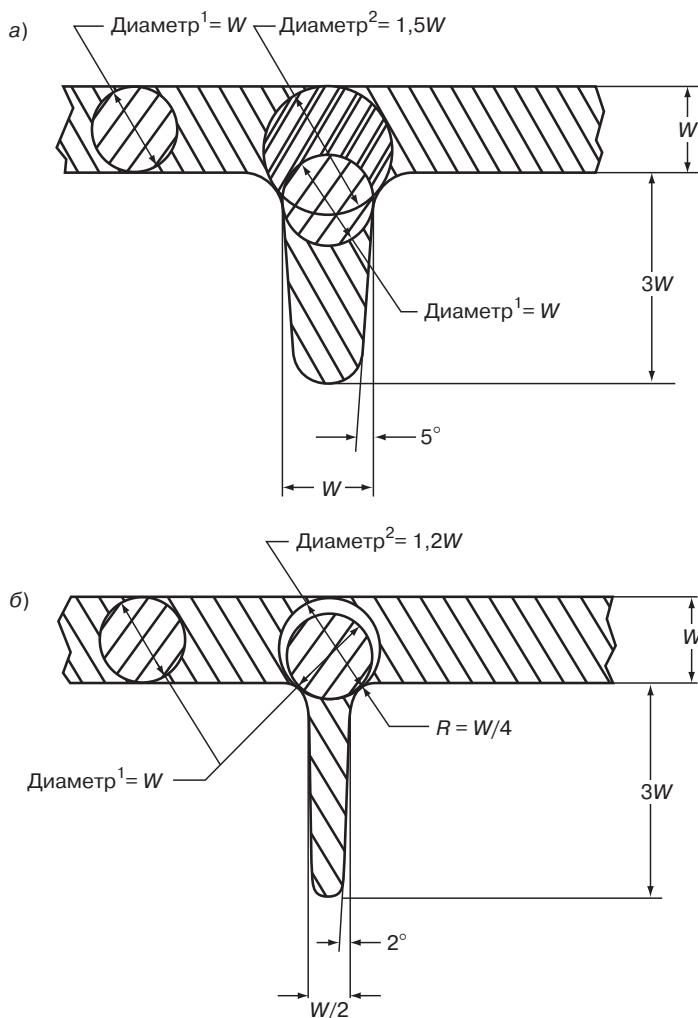


Рис. 15.16. Общие указания по конструированию ребер жесткости:

- высота меньше, чем 300% от номинальной толщины стенки ($3W$);
- толщина 40–60% от номинальной толщины стенки ($W/2$);
- расстояние между соседними ребрами 200% от номинальной толщины стенки ($2W$);
- радиус скругления при основании ребра от 25 до 70% от номинальной толщины стенки ($W/4$);
- уклон от 0,5 до 1,5 градусов;
- используйте наименьшие из рекомендуемых значений из эстетических соображений и наибольшие для обеспечения максимальной прочности

- все ребра должны иметь уклоны от 0,5 до 1,5 градуса;
- следует избегать свободно стоящих ребер, чтобы образовались воздушные пузыри и не появились в результате этого места перегаров и недоливов.

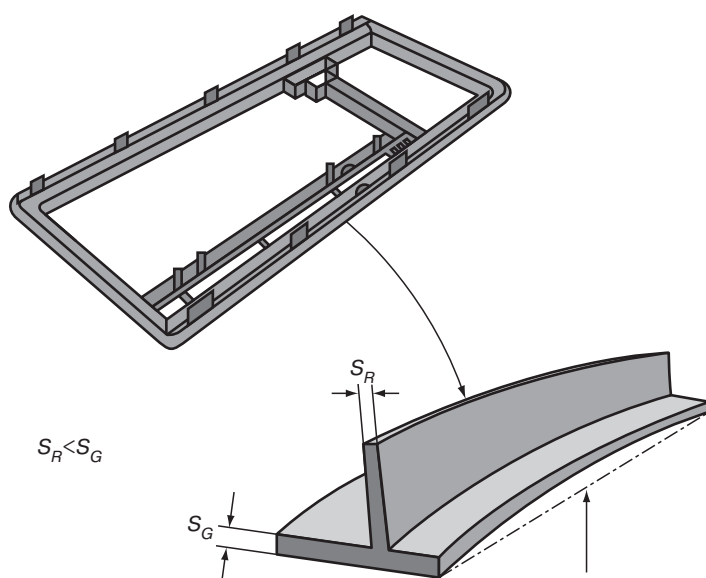


Рис. 15.17. Типичный дефект (коробление) как следствие неправильной конструкции ребра жесткости

Основные рекомендации по конструированию ребер иллюстрирует рис. 15.16, а типичный результат неправильной конструкции — рис. 15.17.

Статистический анализ показывает, что почти в 50% случаев разрушения деталей это происходило вследствие деструкции под воздействием окружающей среды [9]. Конструкторы должны принимать во внимание влияние различных факторов, связанных с воздействием окружающей среды на готовое изделие. К их числу относятся различные химические агенты, ультрафиолетовое облучение, экстремальные погодные условия, загрязнения, кислотные дожди, микроорганизмы. Наиболее важная задача здесь — попытаться оценить долговременное поведение материала, основываясь на кратковременных лабораторных или полевых испытаниях.

Первый этап в процессе деструкции состоит в активированной действием напряжений адсорбции химических веществ и увеличении их концентрации в определенных микроструктурных областях. Далее происходит локальная пластификация, приводящая к развитию трещины [9]. По большей части конструкторы знакомы с проблемой ограниченного применения пластмасс из-за их химической совместимости с различными веществами, и, как правило, проводят исследования, позволяющие выявить роль хорошо знакомых растворителей и других химических веществ. Проблемы возникают тогда, когда детали, находящиеся под подозрением, такие как кольцевые уплотнители, набивки, кожа подвергаются воздействию паров от клеев, адгезивов, растворителей, используемых при монтаже конструкций, состоящих из разных полимеров. Хорошим примером этой ситуации является несовместимость хорошо известного пластификатора поливинилхлорида — диоктилфталата — с поликарбонатом [6].

На рис. 15.18 показан эффект появления микротрещин в выступах детали из поликарбоната, которая контактируется с трубой, сделанной из поливинилхлорида, содержащего этот пластификатор.

Одна из главных проблем, с которой сталкивается конструктор, — отсутствие достаточных данных о химической совместимости различных веществ, а те данные, которые имеются в литературе, часто интерпретируются неверно. Опубликованные данные обычно основываются на результатах опытов по погружению полимера на 24 ч в различные среды, налитые в лабораторный стакан. Методика этого эксперимента, выполняемого по *ASTM D543*, подробно описана в главе 9.

Образование трещин происходит в большинстве полимеров, подвергнутых воздействию тех или иных химических реагентов в течение определенного периода времени, если при этом образцы находились под напряжением. Эффект такого рода наблюдается даже в том случае, когда те же химические агенты не оказывают влияния на полимер в отсутствии напряжений, так что результаты испытаний на погружение в среду не дают адекватной информации о химическом сопротивлении материала. Совместное воздействие остаточных напряжений и влияние внешней силы, а также концентрации химического реагента, температуры, длительности экспозиции могут оказывать ужасающее влияние на материал и приводить к катастрофическим последствиям.

Конструкторы также должны обращать особое внимание на полимерные изделия, содержащие металлические вкладыши, поскольку на границе раздела возникают значительные напряжения, обусловленные различием термических коэффициентов расширения сопряженной пары и выбором неудовлетворительного технологического режима. Образование трещин на границе полимер–металл вокруг вкладыша под воздействием химических агентов представляется довольно обычной ситуацией. Она иллюстрируется фотографией на рис. 15.19.

При изготовлении изделий методом литья под давлением все металлические вкладыши должны быть предварительно нагреты до той же температуры, что и

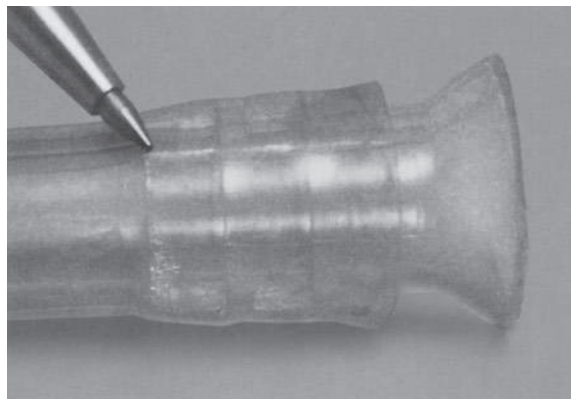


Рис. 15.18. Появление микротрещин в выступах изделия из поликарбоната вследствие контакта с поливинилхлоридом, содержащим пластификатор, несовместимый с поликарбонатом (с разрешения *Bayer Corporation*)

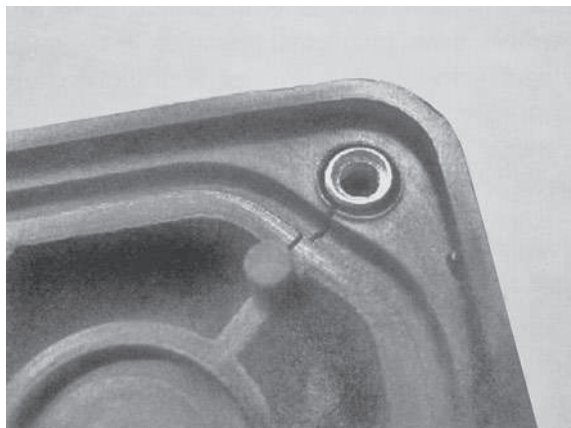


Рис. 15.19. Трещины, образовавшиеся вокруг металлического вкладыша. Высокий уровень концентрации напряжений в этой области способствует повышенной чувствительности полимера к воздействию химических агентов

температура формы, что способствует минимизации напряжений, возникших при литье вокруг вкладыша.

Вредные последствия воздействия окружающей среды на внешний вид и свойства изделий из полимеров описаны в главе 5.

Одним из наиболее неверно воспринимаемых проектировщиками явлений, играющих крайне отрицательную роль при эксплуатации полимерных изделий, является ползучесть. Это явление вносит существенный вклад в преждевременное разрушение деталей из пластмасс. Влияние этого фактора на свойства материала подробно обсуждено в разделе 15.1.1.

15.1.3. Технологический процесс

После того как был правильно подобран материал и создана конструкция, ответственность за получение качественных изделий смещается на переработчиков. Наилучший материал и очень тщательно проработанная конструкция не могут противостоять негодной технологической практике. Остаточные напряжения, возникшие при литье, поры, потеря прочности на линиях сварки, влажность сырья — вот примеры наиболее часто встречающихся причин раннего выхода изделий из строя. Игнорирование основных технологических требований в целях получения эстетически привлекательных изделий обычно приводит к частичной потере физических свойств материала и разочаровывающему уровню качества продукции [10].

Последние достижения в области методов контроля технологического процесса позволяют отслеживать измеряемые параметры с высокой точностью, а также устанавливать по записям причины последующих недостатков полученных изделий при их эксплуатации. На инструменте должны устанавливаться закладки с кодовыми обозначениями даты, которые могут меняться, причем это осуществляется без разборки оборудования. Такая фиксация всех производственных параметров совер-



Рис. 15.20. Разрушение детали, обусловленное ошибками при осуществлении технологического процесса (с разрешения *The Madison Group*)

шенно бесценна для специалиста, анализирующего причины разрушения изделий. Все последующие вторичные операции, также как и сборка конструкций, должны выполняться особо тщательно, чтобы избежать появления дефектов. Во многих случаях трещины, приводящие к разрушению, появляются вокруг металлических вкладышей, просверленных отверстий и линий сварки.

Пример разрушения детали, обусловленный некачественным технологическим процессом, показан на рис. 15.20.

Ошибки при выполнении технологического процесса начинаются с обслуживающего персонала. Прежде всего следует убедиться, что используется именно тот материал, который нужен. История показывает, что в очень многих случаях детали разрушались и были возвращены переработчику именно по причине использования неверно взятого материала. Если в ходе технологического процесса необходимо осуществить смешение с красителем, иными добавками или вторичным материалом, то необходимо убедиться, что все эти компоненты взяты в правильном соотношении. Использование автоматических загрузчиков сырья, дозаторов красителя и смесителей в общем случае позволяет минимизировать ошибки, возникающие при ручном ведении соответствующих операций.

Если используемый материал гидрофилен по своей природе, то необходимо использовать сушилку и удалить влагу согласно имеющимся рекомендациям. Нельзя получить качественные изделия даже при применении наилучшей контрольной техники при использовании плохо обслуживавшегося и старого оборудования. В процессах литья под давлением наиболее важными компонентами является блок контрольных колец, шнек и цилиндр. Использование изношенных деталей может привести к деструкции материала, плохому смешению полимера с добавками, неоднородности расплава, недоливу и иным технологическим трудностям.

Технолог часто отходит от рекомендуемых параметров технологического процесса и оптимальных условий с тем, чтобы исправить дефекты используемого инструмента и оборудования. Такая практика приводит к получению некачественных деталей и, в конечном счете, приводит к их неожиданному разрушению. Например, переработчик

может попытаться устранить внешние дефекты изделия, связанные с износом или неправильно сконструированным инструментом, что приведет к недоливу при заполнении формы. В итоге получается изделие более привлекательного вида. Но недолив сказывается на образовании микропустот, которые являются концентраторами напряжения и местами, где зарождаются трещины.

Ошибки технологического процесса можно разделить на четыре основные категории:

- а) некачественная сушка материала;
- б) переливы или недоливы;
- в) использование холодного или перегретого материала;
- г) плохое смешение полимера с добавками и вторичным материалом.

Сушка

Большинство полимерных материалов степени в той или иной сорбируют влагу. Степень поглощения влаги непосредственно определяется химическим строением полимера. Неполярные макромолекулы, такие как полипропилен, полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид и некоторые другие не обладают сродством к воде и сорбируют лишь небольшие количества влаги на поверхности. В этом случае вполне достаточна сушка обдувом горячим воздухом. Полярные полимеры, напротив, по своей природе гидрофильны и поэтому обладают сильным сродством с влагой. Такие материалы, как полиамиды, поликарбонат, полиэфиры и полиуретаны гигроскопичны и поэтому нуждаются в тщательной подсушке в специальных сушилках перед началом процесса переработки. Находясь в атмосфере с высокой влажностью, такие полимеры насыщаются влагой, которая собирается внутри гранул. Это явление показано на рис. 15.21.

Возможны два следствия того, что влага не полностью удалена из полимера до начала процесса переработки. Во-первых, детали, отлитые из недостаточно высушенного материала, содержат пустоты и пузыри, а также заметные скосы на поверхности. Однако отсутствие таких скосов еще не доказывает, что сушка была произведена правильно. В изделиях, отлитых из недостаточно высушенных полимерных материалов типа полиэфиров, поверхностные скосы могут отсутствовать, но в стенках изделия образуется большое количество пустот. Пустоты и пузырьки, являясь concentra-

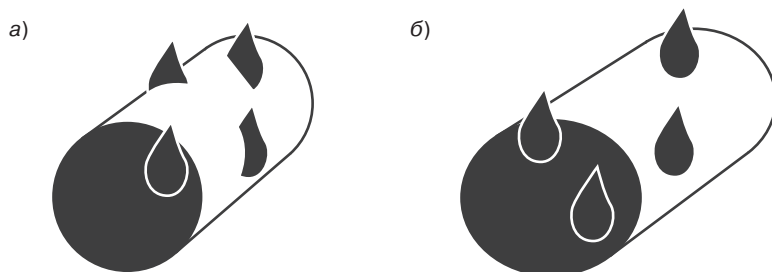


Рис. 15.21. Влага в гигроскопичных гранулах: а — влага, адсорбированная внутри гранул; б — влага на поверхности

торами напряжений, снижают способность материала выдерживать нагрузку, и тем самым приводят к раннему разрушению изделий.

Во-вторых, существует еще более существенная проблема, обусловленная недостаточной подсушкой, а именно возможность гидролиза макромолекул. Полимеры типа полиамидов и полиэфиров, которые получают методом поликонденсации, склонны к гидролизу. В ходе процесса полимеризации образуются макромолекулы и вода. Вода удаляется из зоны реакции и процесс продолжается. Для того чтобы процесс полимеризации с образованием длинных макромолекул происходил непрерывно, вода должна постоянно удаляться. Если в процессе переработки используется влажный материал, то возможна обратная реакция (гидролиз) и длинные макромолекулы распадаются на многочисленные более мелкие молекулы [11]. Таким образом, гидролиз приводит к снижению молекулярного веса, что отражается на резком ухудшении физических свойств полимера. Подобный процесс необратим. Это означает, что если в процессе переработки был использован влажный материал, то получаемые изделия будут хрупкими и их прочность будет невысокой, а вторичная переработка таких изделий и литников невозможна, поскольку произошла деструкция полимера.

Заполнение формы

Наиболее высокие физические свойства отливок из полимерных материалов достигаются тогда, когда получается плотная упаковка макромолекул в изделии. Это достигается тем, что после заполнения формы сохраняется высокое давление на расплав, передаваемое через литник. Поддержание высокого давления на расплав в течение всего периода, пока полимер охлаждается и не становится твердым, исключительно важно с учетом происходящей большой объемной усадки полимера. Если давление в ходе заполнения формы и охлаждения было недостаточным, то это приводит к неравномерной усадке. Наиболее существенные последствия этого — образование остаточных напряжений и коробление изделий. При правильном выборе давления удастся также избежать образования пустот и пузырей. Анализ причин разрушения путем обычного визуального рассмотрения срезов изделий под микроскопом с достаточным увеличением позволяет определить наличие микроскопических пузырьков и пор.

Недостаточное давление при формовании изделий также способствует ослаблению деталей по линиям сварки, что является частой причиной разрушения, развивающегося вблизи отверстий и выступов.

Чрезмерно высокое давление при выдержке отливок в форме также отрицательно влияет на качество изделий. Избыточное давление приводит к росту напряжений, что снижает механические свойства изделий и в особенности опасно с точки зрения влияния химических реагентов.

На рис. 15.22 показан пример разрушения, вызванного недостаточным давлением в процессе заливки формы.

Холодный или перегретый материал

Оптимальный выбор температуры — это ключевой фактор для получения физически качественных и механически прочных деталей. Аморфные полимеры размягчаются постепенно, и, как следствие, они могут перерабатываться в широкой

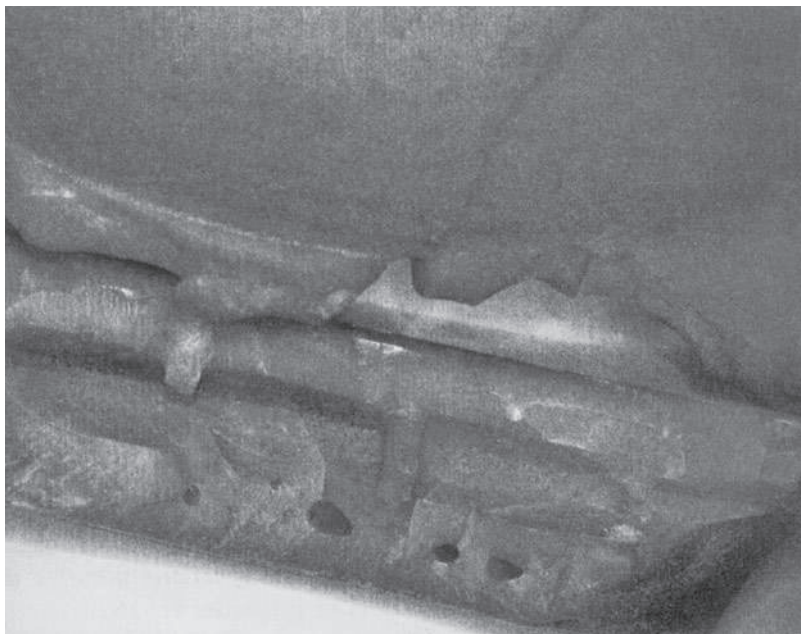


Рис. 15.22. Разрушение детали вследствие образования пустот из-за недолива расплава. Пустоты способствуют снижению способности материала выдерживать действие внешней нагрузки

области температур. В то же время частично кристаллические полимеры имеют резко выраженную температуру плавления, и они могут перерабатываться в узкой температурной области.

Очень часто технологи-переработчики ориентируются на температуру цилиндра литьевой машины и не предпринимают усилий для измерений истинной температуры расплава. Однако реальная температура полимера может быть на 50–70 °F выше, что обусловлено как тепловыделениями при трении, возникающим при работе шнека, так и недостоверностью используемой системы контроля температуры. Дополнительный разогрев на 20–30 °F возникает при высокоскоростном течении расплава через литниковую систему, что вносит свой вклад в деструкцию полимера. Деструкция полимера, обусловленная его перегревом, приводит к разрушению молекул и тем самым к ухудшению физических свойств материала. При переработке таких материалов, как поливинилхлорид, высокочувствительных как к высоким температурам, так и к действию сдвиговых напряжений, от макромолекулы отщепляются атомы водорода и хлора с образованием соляной кислоты. Это инициирует экзотермическую реакцию, которая, в свою очередь, ускоряет процесс деструкции, завершающийся полным распадом макромолекулы вплоть до образования углерода. И наконец, перегрев приводит к расходованию вплоть до полного исчерпания некоторых добавок, таких как антиоксиданты, что также отражается на свойствах изделия.

Если говорить о недогреве, то недостаточно прогретый материал не полностью проплавляется, что не обеспечивает гомогенного смешения.

Плохое смешение полимера с добавками и вторичным материалом

Красители и различные добавки вводят в базовый полимер для улучшения эстетических характеристик изделия, облегчения процесса переработки и улучшения потребительских свойств продукции. Поэтому обеспечение высокого качества смешения является критическим фактором. В широком смысле слова любые добавки — это загрязнения. Если их количество слишком велико или слишком мало, то это отрицательно сказывается на свойствах материала. Так, например, плохое смешение антиоксиданта с полимером приводит к повышению хрупкости полимерных пленок. Вторичный материал, получающийся из элементов литниковой системы, а также из возвращенных в производство забракованных изделий, как правило, добавляется к первичному сырью при соблюдении требуемых пропорций. Лабораторные испытания показывают, что по мере увеличения количества операций переработки наблюдается ухудшение свойств материала. Графики, иллюстрирующие это явление, представлены на рис. 15.23.

Параллельно с ухудшением физических свойств материала заметно возрастает расход добавок, таких как антиоксиданты и смазки, что, в свою очередь, создает дополнительные трудности при переработке материала и ухудшает его потребительские свойства. Дополнительные проблемы возникают в том случае, если материал неправильно измельчается в дробилке или плохо очищаются мешки для хранения отходов и загрузочная воронка дробилки между последовательными операциями. Это также дает свой вклад в причины разрушения изделий. Правильный выбор относительного содержания вторичного полимера и обеспечение его однородного смешения с основным сырьем необходимы для получения качественного изделия.

На рис. 15.24 показаны примеры разрушения изделий, произошедшие из-за избыточного содержания вторичного полимера в перерабатываемом материале.

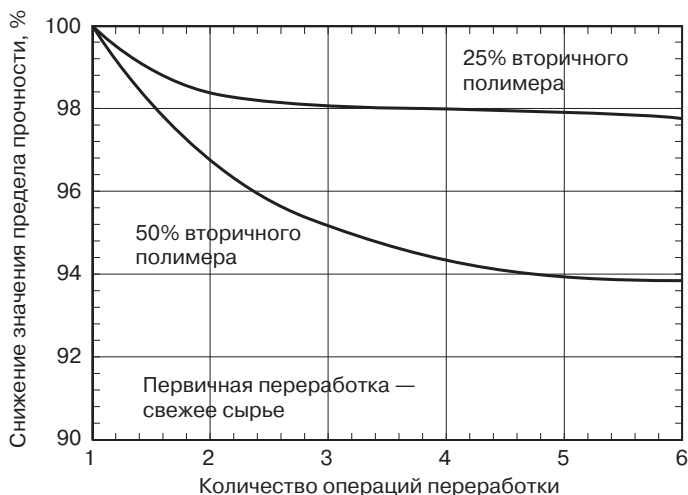


Рис. 15.23. Постепенное ухудшение свойств материала по мере увеличения количества операций переработки (с разрешения DuPont, Nylon Zytel®, марка материала HTN Molding Grade)

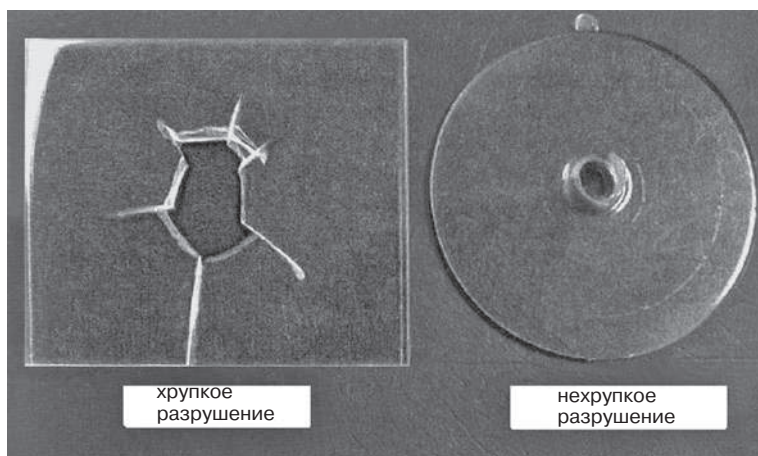


Рис. 15.24. Разрушение, обусловленное избыточным содержанием вторичного полимера

15.1.4. Условия эксплуатации (роль окружающей среды и ошибки при использовании)

Несмотря на существование инструкций и рекомендаций по правильному и безопасному применению изделий, разрушения, обусловленные неправильным использованием полимерных деталей, вполне обычны в реальной жизни. Такие ситуации можно разделить на пять категорий:

- умышленное использование детали в неподходящих условиях;
- применение детали дольше предназначенного ей срока жизни;
- разрушение, обусловленное отклонениями от обычных условий применения;
- разрушение, связанное с тем, что изделие используется за пределами его установленных возможностей;
- одновременное воздействие различных факторов, приводящее к синергетическому эффекту [12].

При нормальных условиях эксплуатации полимерных изделий они подвергаются воздействию изменяющихся внешних факторов, к числу которых относятся экстремальные погодные условия, облучение, загрязнения, воздействие биологических объектов. Влияние этих факторов, в зависимости от концентрации химических реагентов, уровней внутренних и действующих извне напряжений, температуры может изменяться от весьма слабого до очень сильного. Синергетический эффект, обусловленный наложением влияния химических агентов, окружающей среды и механических нагрузок, может привести к катастрофическому разрушению полимерного изделия за очень короткое время. В добавление ко всему этому существенную роль играет человеческий фактор, поскольку потребитель может быть не знаком с ограничениями, связанными с использованием полимерных материалов, или плохо проинструктирован о том, как правильно устанавливать и/или применять изделия из таких материалов. В таких случаях неожиданное разрушение изделия оказывается неизбежным.

Можно ожидать, что потребитель будет в разумных пределах выходить за пределы правильного применения полимерных деталей. Исходя из практики судебных постановлений, касающихся случаев нарушений условий применения пластмассовых деталей, производитель обычно склонен компенсировать эти ошибки потребителя назначением несколько завышенных коэффициентов запаса. Например, потребитель может поставить предметы кухонного обихода или контейнер на нижнюю полку посудомоечной машины или в микроволновую печь на чрезмерно длительный период, или использовать пластмассовый стул вместо лестницы, чтобы достать что-то сверху, или же налить вредный растворитель или иной химический реагент в емкость, изготовленную из пластмассы, не предназначенной для этих целей. Можно также ожидать, что потребитель будет перетаскивать контейнер, доверху заполненный отходами, и уронит его с 6-дюймового бордюра, что создаст большую нагрузку на колесики. Трудно предположить, что потребитель будет очень аккуратно перекачивать тележку через бордюрный камень. Ситуации такого рода должны предусматриваться производителем при конструировании изделия. Очень многие случаи должны относиться к категории «умышленное использование детали в неподходящих условиях», например, применение отвертки в качестве зубила или установка отрезка пластмассовой трубы на конец гаечного ключа для увеличения плеча.

Известно, что загущенное льняное масло плохо воздействует на изделия, сделанные из АБС-пластика. В течение многих лет водопроводчики и ремонтные рабочие используют такие жидкости для уплотнения резьбовых соединений. Производители бассейнов, ванн и разбрызгивателей неоднократно пытались убедить потребителей в опасности использования таких уплотнительных материалов вместо тефлона, но разрушение этих изделий из-за неправильного применения продолжается.

На рис. 15.25 показана разрушившаяся гайка, которая сломалась из-за того, что потребитель использовал гаечный ключ с насаженной на него трубой, несмотря на ясное предупреждение о том, что гайка должна закручиваться только от руки.

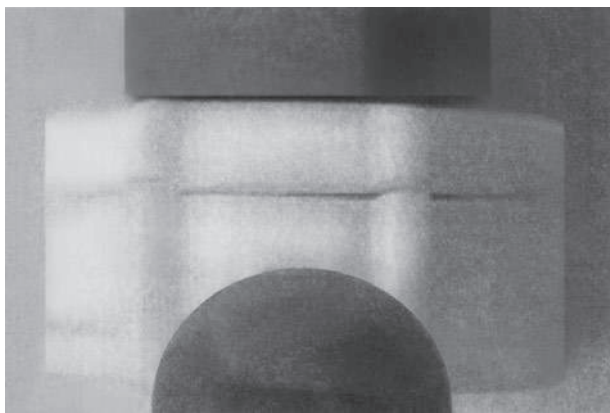


Рис. 15.25. Сломанная гайка, использовавшаяся в линии подачи воды, которая была разрушена из-за приложения чрезмерно большого крутящего момента (с разрешения *The Madison Group*)

Многие изделия разрушаются из-за того, что их пытаются использовать за пределами установленного для них срока жизни. Это относится к таким предметам одноразового пользования, как чашки, пакеты для переноса бакалейных товаров, растягиваемая обертка.

Различные воздействия на изделия из пластмасс при их применении можно подразделить на такие группы, как химические, физические, биологические, механические и электрические [12]. Влияние химических, механических, термических, биологических факторов и окружающей среды на разрушение изделий из пластмасс будет рассмотрено в следующем разделе.

15.2. Типовые случаи разрушения

15.2.1. Механическое разрушение

Причиной механического разрушения является действие внешних сил. Когда напряжения превысят предел текучести, в изделии появляются трещины или же оно распадается на части. Силы могут вызывать растяжение или сжатие, создавать ударную нагрузку, действовать в течение короткого или продолжительного времени. При этом могут изменяться температура и влажность окружающей среды. Существует множество причин, почему тело разрушается под действием внешних сил. Если мы исключим из рассмотрения причины, связанные с термическими эффектами, влияние химических факторов и действие окружающей среды, и будем рассматривать только механическое разрушение, то можно выделить четыре основных типа этого явления:

- а) хрупкое разрушение;
- б) пластическое разрушение;
- в) усталостное разрушение;
- г) разрушение, обусловленное ползучестью и релаксацией напряжения.

Хрупкое разрушение

Хрупкое разрушение представляет собой внезапный разрыв изделия, носящий катастрофический характер, при котором трещина проходит через материал без заметных пластических деформаций. Когда хрупкое разрушение началось, для дальнейшего развития трещины не требуется дополнительных затрат энергии. Если разрушение происходит по этому механизму, то предел текучести никогда не достигается. Изделия из пластмасс, наиболее чувствительных к надрезу, таких как полистирол или полиакрилаты, обычно распадаются на части по механизму хрупкого разрушения. Существует прямая взаимосвязь между типом разрушения, с одной стороны, и такими параметрами, как уровень напряжений, скорость нагружения (скорость деформации) и температура, с другой стороны. При высоких скоростях нагружения, которые обычно имеют место при ударе, изделие более склонно к разрыву по механизму хрупкого разрушения. Низкие температуры и высокие остаточные напряжения способствуют проявлению механизма хрупкого разрушения.

При деформировании аморфных стеклообразных полимеров, таких как поликарбонат или полиэфиримид, наступлению хрупкого разрушения почти всегда

предшествует образование одной или нескольких микротрещин, развитие которых происходит путем трехмерных деформаций. Микротрещины подобны внутренним порам, и после своего возникновения они действуют как внутренние трещины или дефекты. По мере дальнейшего действия нагрузки они разрастаются и часто приводят к хрупкому разрушению.

Ранее существовавшие микротрещины, которые предположительно возникли еще на стадии переработки и последующего охлаждения полимера, продолжают развиваться, и хрупкое разрушение наступает вследствие сильной локализации напряжений у вершины растущей трещины. Если деталь из пластмассы подвергается воздействию определенных химических агентов, то это также способствует перерастанию микротрещин в трещины с последующим хрупким разрушением.

Поверхности разлома при хрупком разрушении гладкие и совершенно не похожи на рваные и зазубренные поверхности, подобно тому, как это получается при расколе стекла.

Пластическое разрушение

Пластическое разрушение характеризуется постепенным раздиrom поверхности после того, как приложенные напряжения превзойдут предел текучести материала. Для роста образовавшейся трещины при пластическом разрушении необходимо поступление дополнительной энергии. Пластическое разрушение происходит постепенно и не носит катастрофического характера. При этом развиваются большие деформации, под действием напряжений происходит побеление материала, а поверхность разрыва получается рваной и зазубренной. При растяжении возникает шейка в виде сужения поперечного сечения образца.

Переход от пластического к хрупкому разрушению

Вообще говоря, полимерные материалы проявляют хрупкость при низких температурах и становятся более пластичными по мере повышения температуры. Высокопрочные и пластичные материалы могут изменить свои свойства и стать хрупкими при понижении температуры или высоких скоростях деформации.

Особый интерес для конструкторов и для исследования причин разрушения представляет точка, в которой происходит переход от пластического к хрупкому механизму разрушения. Для большинства полимеров вполне четко определяемой в этом отношении является точка, которую можно найти по результатам испытаний на удар: ниже этой точки разрушение становится хрупким. При более высоких температурах разрушение происходит с накоплением больших деформаций по пластическому механизму. При более низких температурах разрушение осуществляется путем быстрого распространения магистральной трещины без заметных деформаций [15]. Острые надрезы и высокие скорости деформации заметно смещают эту точку в сторону более низких температур. На точку перехода от пластического к хрупкому механизму разрушения влияет также присутствие красителей и иных добавок.

Именно для определения точки перехода был разработан метод определения ударных характеристик полимерных материалов (см. раздел 2.7.3).

Усталостное разрушение

Для любых материалов максимальное напряжение, которое изделие выдерживает без разрушения при циклическом деформировании всегда ниже, чем предельное напряжение при статической нагрузке. При осуществлении циклической нагрузки трещина, зародившаяся в каком-либо месте, продолжает развиваться в следующих циклах нагружения. В конце концов трещина становится столь большой, что оставшаяся часть сечения уже не выдерживает приложенной силы, и изделие разрушается [14]. Усталостное разрушение, как и разрушение по пластическому механизму, не носит катастрофического характера, поскольку происходит во времени. Распад образца на части осуществляется вследствие локализованных структурных изменений, которые происходят под действием переменных напряжений, уровень которых ниже предела прочности, измеренного при статических испытаниях. Усталостное разрушение определяется действием трех факторов — цикличности действия напряжений, растягивающих усилий и пластических деформаций, причем все они должны действовать одновременно. Циклические напряжения инициируют образование трещины, а растягивающие напряжения приводят к ее развитию [15].

Количество циклов, которые приводят к разрушению образца или детали, зависят от уровня напряжений. Если пиковые напряжения не очень велики, то разрушение наступает через большое количество циклов, а может и вовсе не наступить. Предел усталостной прочности, который определяется как напряжение, ниже которого разрушение не происходит вообще, является очень важной инженерной характеристикой материала. Проектировщик, конструируя деталь, должен сделать ее так, чтобы максимальное напряжение в процессе эксплуатации заведомо не превышало предела усталостной прочности. Обычно предел усталостной прочности не превышает 20–35% от статической прочности материала.

Как и все остальные механические характеристики, предел статической прочности в сильной степени зависит от молекулярного веса полимера, температуры и наличия надразов [16]. Трещины при усталостном разрушении могут начать развиваться на микротрещинах, которые играют роль концентраторов напряжения и мест зарождения усталостных трещин.

Ползучесть/релаксация напряжений

Ползучесть — это явление развития необратимых деформаций под нагрузкой, увеличивающихся со временем. Релаксация напряжений — это постепенное уменьшение нагрузки, воспринимаемой образцом, при сохранении постоянной деформации. Другими словами: ползучесть — это развивающиеся во времени деформации при постоянном напряжении, а релаксация — это снижение напряжений при постоянной деформации [17]. Оба эти явления играют важную роль при преждевременном разрушении изделий из полимерных материалов. Как уже говорилось ранее, конструкторы не всегда правильно понимают или просто пренебрегают спецификой поведения полимеров по сравнению с традиционными материалами в отношении их поведения под нагрузкой во времени, а также влиянием температуры.

Разрушение при ползучести происходит тогда, когда макромолекулы не могут более выдерживать приложенную нагрузку, и возникают микротрещины. В случае

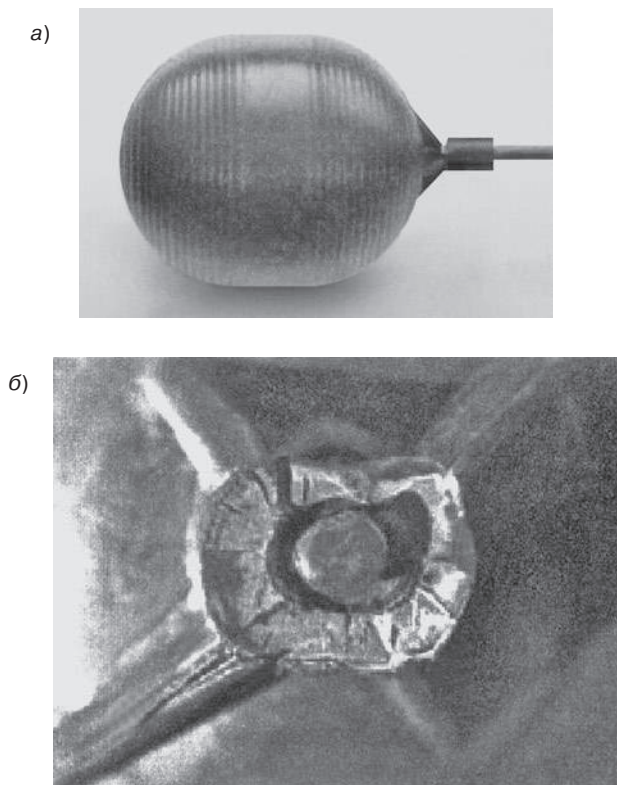


Рис. 15.26. Разрушение, обусловленное ползучестью (развития деформаций во времени) вследствие приложения чрезмерно большого усилия при укупорке — а и б (с разрешения *The Madison Group*)

релаксации макромолекулы перемещаются под нагрузкой, что приводит к уменьшению напряжений, отвечающих заданной постоянной деформации. Разрушение изделия в процессе релаксации происходит довольно редко, но это явление приводит к тому, что изделие, по крайней мере, частично перестает выполнять свое функциональное предназначение. Это относится к таким случаям, как закупорка бутылок пластмассовыми крышками или использование пластмассовых пружин [18].

На рис. 15.26 приведены иллюстрации разрушения при ползучести.

15.2.2. Термическое разрушение

Можно выделить четыре причины разрушения изделий из полимерных материалов, обусловленные температурными эффектами:

- колебания температуры — от слишком низких к чрезмерно высоким;
- термическое расширение и сжатие;
- термическая деструкция;
- неправильное понимание смысла опубликованных данных по деформационной теплостойкости.

При очень высоких температурах изделие из полимера может изогнуться, скрутиться, расплавиться и даже сгореть. При низких температурах наблюдается тенденция к возрастанию хрупкости полимерных материалов. Из-за этого даже при небольшой нагрузке в изделии может появиться трещина, или оно может даже разбиться. Вследствие перегрева может произойти деструкция полимера, т. е. макромолекулярные цепи могут разрушиться. При высоких температурах полимерные молекулы могут начать распадаться на составляющие их компоненты, которые реагируют друг с другом, что, в конечном счете, приводит к постепенному изменению свойств материала [19]. Термическая деструкция может быть следствием (а) перегрева материала при его переработке, (б) выдержкой материала при слишком высокой температуре при эксплуатации изделия. Термическая деструкция приводит к изменениям средней молекулярной массы и молекулярно-весового распределения, и, как следствие, происходит снижение пластичности, образование белых пятен, изменение цвета, а также ухудшаются все показатели физических свойств в целом. Доказано, что основной причиной ухудшения свойств полимерного материала под действием высокой температуры при переработке является расходование функциональных добавок, таких как антиоксиданты, смазки и стабилизаторы.

Как говорилось ранее, коэффициенты термического расширения полимеров в 7–10 раз превосходят значения аналогичного параметра для традиционных материалов. Поэтому необходимо принимать определенные меры, чтобы избежать разрушения под действием напряжений, обусловленных термическим расширением или сжатием полимера. Некоторые наиболее типичные ситуации, в которых причиной разрушения является именно этот эффект являются системы трубопроводов, отливки, содержащие металлические вкладыши, и контракции, в которых деталь, изготовленная из пластмассы, зажата и не имеет возможности расширяться.

Причины разрушения, связанные с отсутствием понимания разницы между приводимыми в литературе данными по деформационной теплостойкости и реальным температурным пределом работоспособности при длительном воздействии температуры, были обсуждены ранее. Выбор и применение материала, основанные на данных по деформационной теплостойкости, неизбежно приводят к неожиданному разрушению изделий из полимеров.

15.2.3. Химическое разрушение

Причины разрушения изделий из полимеров под действием химических агентов можно разделить на две группы: 1) химическое воздействие со стороны веществ, не совместимых с данным полимером; 2) образование трещин в материале, который находится под действием напряжений и контактирует с химическими реагентами, содержащимися в окружающей среде.

Полимерное изделие может находиться в контакте с огромным количеством различных химических веществ — растворителями, смазочными маслами, чистящими средствами, детергентами, красками, покрытиями, адгезивами. Даже вода при повышенных температурах может вызывать гидролиз пластмасс и приводить к гидролитической деструкции с соответствующим снижением таких свойств, как удлинение

при разрыве и ударная прочность. Непрерывное пребывание в воде может вызывать охрупчивание изделий.

Гидролитическая деструкция, обусловленная недостаточной подсушкой материала перед началом его переработки подобно обсуждалась выше в разделе 15.1.3.

Химическая несовместимость определяется пятью факторами:

- длительностью экспозиции;
- температурой;
- концентрацией реагента в окружающей среде;
- остаточными напряжениями, возникшими при литье изделия;
- действием внешних напряжений.

Синергетический эффект при наложении этих факторов способствует экспоненциальному ускорению процесса разрушения полимера. Выдержка полимера в жидких средах, как правило, приводит к размягчению материала, микротрещинам и, в конечном счете, к образованию магистральной трещины, т. е. разрушению изделия.

Как подробно обсуждалось в разделе 9.2, справочные данные по совместимости полимеров с различными жидкими средами, которые получают при испытаниях во время погружения полимера в жидкость, могут использоваться только для сопоставления влияния на полимеры конкретных химических агентов. Эти данные никак не принимают во внимание влияние временного фактора, температуры, концентрации реагентов, остаточных напряжений, а также синергетический эффект наложения различных факторов.

Существуют многочисленные примеры разрушения изделий тогда, когда материал для них подбирался на основании справочных данных по совместимости полимеров с химическими агентами. Конструктор обязан провести испытания на воздействие химических веществ применительно к реальным условиям применения изделия в конкретной окружающей среде с учетом предполагаемого уровня напряжений, и только это позволит избежать преждевременного выхода детали из строя.

На рис. 15.27 показан пример разрушения детали, вызванного действием химического реагента.

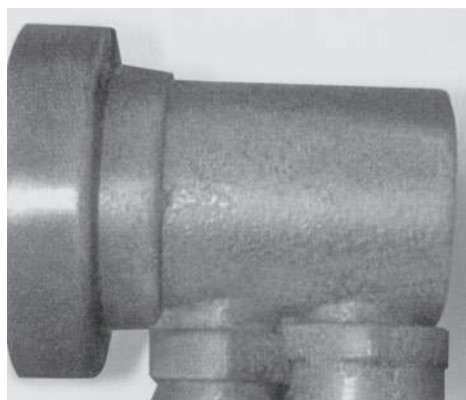


Рис. 15.27. Разрушение детали, изготовленной из полистирола, в результате длительного контакта с топливом (с разрешения *The Madison Group*)

Основной причиной химического разрушения полимеров является образование трещин в деталях, находящихся под действием напряжений, в результате воздействия окружающей среды. Это явление состоит в том, что полимер деструктирует при взаимодействии с химическим реагентом, но это может происходить только тогда, когда на изделие действуют напряжения. Важным фактором является наличие химического реагента, но здесь имеет место синергетический эффект, обусловленный наложением действия напряжений. Однако необходимо понять, что в рассматриваемом случае не происходит непосредственного воздействия химического агента на молекулярные связи. Механизм разрушения обусловлен физическими причинами, а роль химического агента состоит в том, что он, проникая в полимер, ослабляет межмолекулярные связи и тем самым способствует разрушению сетки зацеплений макромолекул [20]. Для реализации рассматриваемого механизма разрушения необходимо наличие трех компонент — полимера, химического агента и напряжений. Присутствие химического вещества лишь ускоряет процесс образования трещин. Если бы этого агента не было, образование трещин все равно бы происходило, даже на воздухе [210]. Образование трещин начинается с формирования системы микротрещин и продолжается до появления визуально обнаруживаемой трещины.

Разрушение в рассматриваемом случае происходит хрупко, даже если в отсутствие растворителя полимер разрушался по пластическому механизму. Образование трещин обычно инициируется с поверхности, в областях, в которых действуют высокие напряжения. Поверхности, которые образуются при прохождении трещины, выглядят гладкими и даже блестящими.

Можно также наблюдать образование множественных трещин, которые в итоге приводят к развитию магистральной трещины. В общем случае к образованию трещин под напряжением в присутствии химических агентов более склонны низкомолекулярные полимеры, обладающие низкой степенью кристалличности, и аморфные полимеры. Для высокомолекулярных частично кристаллических полимеров характерно более высокое сопротивление образованию трещин.

На рис. 15.28 показаны последовательные этапы образования трещин в химических средах под действием напряжений [22].

Характер разрушения в химической среде под действием напряжений иллюстрирует рис. 15.29, где показана фотография корпуса разбрызгивателя. В этом случае напряжения были созданы при закручивании резьбового соединения, а концентратором напряжения было основание резьбы из-за слишком малого радиуса перехода. Требуемый для осуществления разрушения химический агент представлял собой серийное масло на основе эфира, которое использовалось для создания уплотнения. Известно, что химические агенты такого рода активно воздействуют на АБС-пластики. Поэтому примененный в этом случае состав уплотнительного элемента непригоден для использования в контакте с трубами и фитингами, изготовленными из АБС-пластика.

15.2.4. Разрушение под влиянием окружающей среды

Изделия из пластмасс, эксплуатируемых на открытом воздухе, подвержены воздействию различных факторов. Эффект может быть любым, начиная от потери цвета,

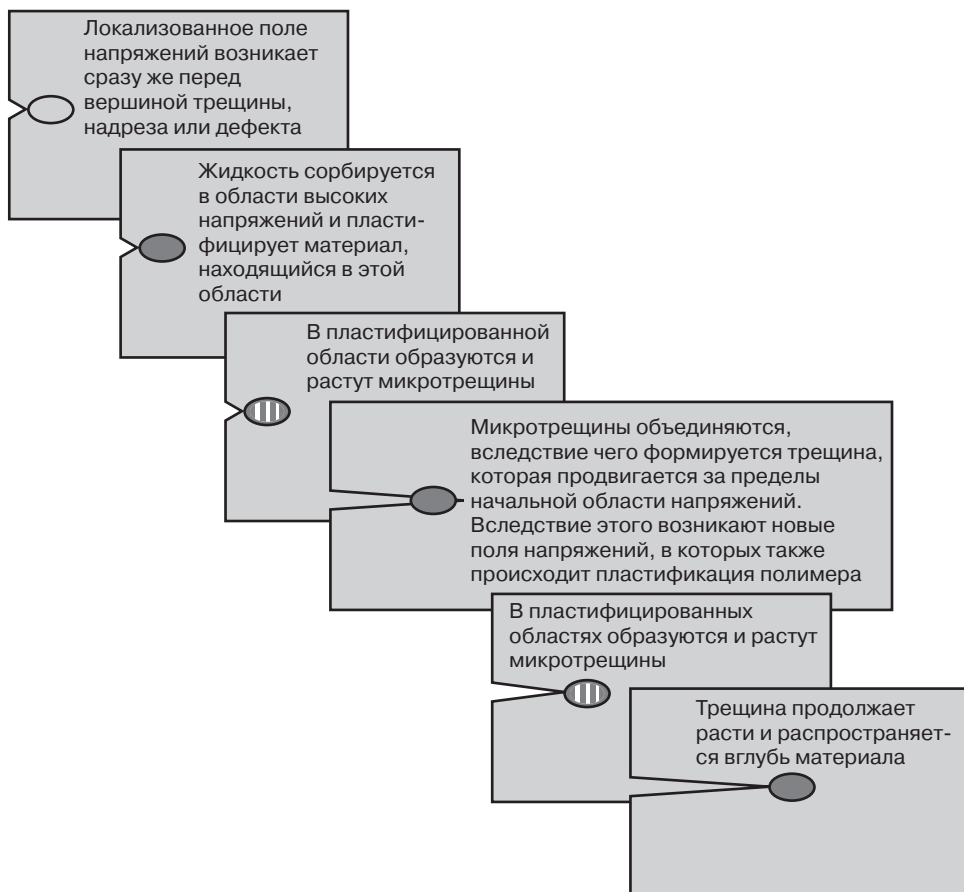


Рис. 15.28. Последовательные этапы разрушения полимера, находящегося под действием напряжения, в активной внешней среде (воспроизведено с разрешения *ASM International*)

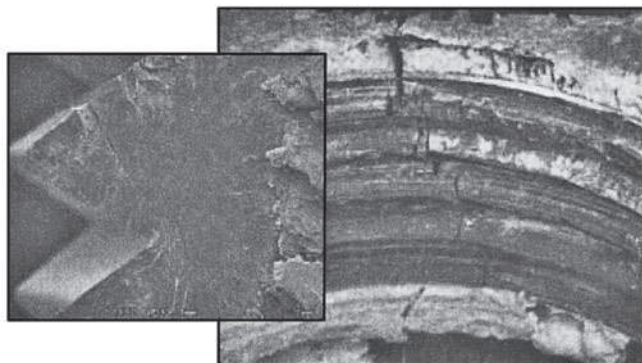


Рис. 15.29. Разрушение корпуса разбрызгивателя, произошедшего под воздействием окружающей среды (воспроизведено с разрешения *ASM International*)

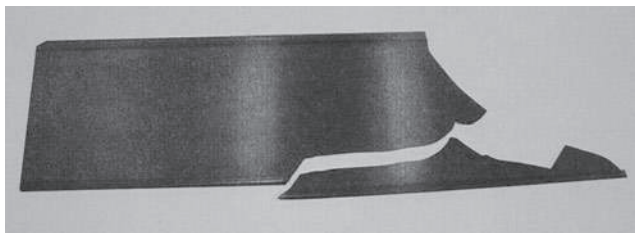


Рис. 15.30. Разрушение детали, произошедшее в результате длительного пребывания на открытом воздухе под действием ультрафиолетового излучения (с разрешения *Consultek, LLC*)

легкого крейзинга и образования трещин, и вплоть до полного разрушения изделия. Типичный пример разрушения, обусловленного погодными воздействиями, показан на рис. 15.30.

Почти 50% всех случаев разрушения полимерных изделий связано с воздействием на них окружающей среды. Большая часть разрушений, связанных с действием окружающей среды, обусловлена: а) влиянием естественных погодных условий; б) действием солнечной радиации (включая влияние ультрафиолетового, инфракрасного излучения и рентгеновских лучей), а также загрязнений, промышленных отходов и влажности. К числу основных факторов относятся, кроме того, микроорганизмы, такие как бактерии и грибы, а также почва, вода, тепловая энергия, ионизирующие излучения, обусловленные гамма- и рентгеновскими лучами и электронными пучками. Как уже неоднократно упоминалось, синергетический эффект от наложения различных факторов оказывает несравненно более сильное воздействие, нежели от любого из них по отдельности, и во много раз ускоряет процесс деструкции.

Характер разрушения изделий варьируется от простой потери цвета до охрупчивания материала, выражающегося в образовании микротрещин, снижении ударной прочности, уменьшения удлинения при разрыве, а также уменьшении молекулярной массы, полного разрушения структуры материала и развитии множества трещин. Интенсивность влияния окружающей среды зависит от ее конкретных особенностей, географического положения, типа пластмассы, концентрации вредных веществ и продолжительности экспозиции.

Прогнозировать долговечность изделий из пластмасс, находящихся под воздействием окружающей среды, представляется трудной задачей. Ускоренные лабораторные испытания дают неясные и часто нереалистичные прогнозы. Более реалистичными представляются результаты, получаемые на основе новейших методик ускоренных испытаний на открытом воздухе. Такие ускоренные испытания предполагают следование за положением солнца и/или использование систем, концентрирующих солнечное излучение, притом что образцы находятся в реальных климатических условиях. Такие методики позволяют получать полезные результаты, по крайней мере, в восемь раз быстрее, чем при испытаниях в реальных климатических условиях. Поскольку испытания в реальном климате неизбежно связаны с наложением воздействия ультрафиолетового облучения и окисления с влиянием влажности, для получения реалистичных результатов оказывается необходимым использовать цикл обрызгивания образцов водой, включая и ночное время.

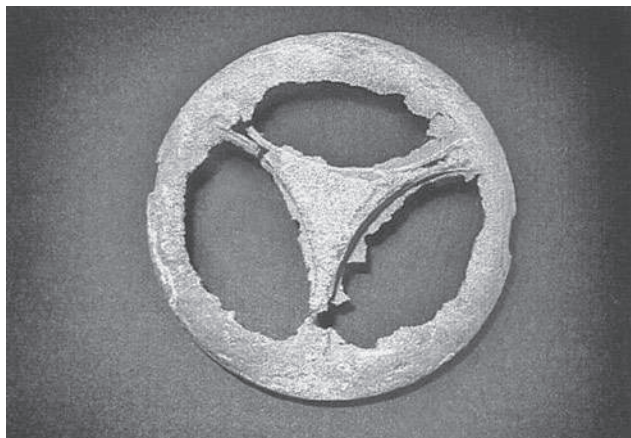


Рис. 15.31. Разрушение покрытия, используемого длительное время во влажной атмосфере плавательного бассейна, под воздействием солнечных лучей

Все изделия из полимерных материалов, которые предполагается использовать на открытом воздухе в течение длительного времени, должны содержать в своем составе адсорберы ультрафиолетового излучения или стабилизатор. Эти адсорберы поглощают большую часть спектра излучения в этой области и способны рассеивать их в материале без особого вреда для полимера. Такие стабилизаторы препятствуют разрыву молекулярных связей с помощью определенных химических реакций или приводят к диссипации энергии ультрафиолетового излучения с переводом ее на более низкий уровень, который не угрожает стабильности молекулярных связей. Защитные покрытия и окраска поверхностей также является эффективным средством продления срока службы изделий, эксплуатируемых на открытом воздухе.

На рис. 15.31 показана картина разрушения покрытия, используемого в плавательном бассейне, после длительной экспозиции во влажной атмосфере под солнечным светом.

15.3. Анализ причин разрушения

В качестве первого шага для любого случая разрушения следует определить причины выхода изделия из строя. Прежде чем начинать тщательную программу исследования, необходимо собрать всю информацию относительно анализируемого изделия. Если изделие возвращено после того, как оно попало к потребителю, следует получить исходную информацию от продавца или потребителя, а именно: когда было продано данное изделие, когда было приведено в действие, когда наблюдалось возникновение первых дефектов, в каком географическом месте использовалось изделие, какие химические вещества встречались в ближайшей округе, и использовалось ли изделие внутри или вне помещения. Вся эта информация имеет важное значение, если необходимо провести анализ причин разрушения на профессиональном уровне. Например, если в отчете с места использования и разрушения изделия, которое предоставляется вместе с разрушенным образцом, упоминается, что данное изделие

контактировало с определенным химическим агентом, то легко проверить материал, из которого изготовлено изделие, на совместимость с этим химическим веществом. Далее можно воспроизвести реальные условия, в которых изделие контактировало с упомянутым химическим агентом.

В отчете, предоставляемом вместе с образцом, должно быть упомянуто, с какой целью проводится анализ причин разрушения. Информация о дате производства изделия и идентификационный номер гнезда формы, в которой было отлито разрушившееся изделие, конечно, ускорит проведение исследования.

Для облегчения проведения анализа предлагались различные опросные листы. В табл. 15.3 приведен типичный пример такого опросника, а схема 15.1 показывает последовательность операций, иллюстрирующих методологию анализа.

Для проведения исследований используется следующая совокупность методов:

- визуальный осмотр;
- идентификация изделия;
- анализ напряженного состояния;
- испытания методом отжига;
- микроструктурный анализ (приготовление микротомных срезов);
- механические испытания;
- термический анализ;
- методы неразрушающих испытаний;
- фрактография;
- моделирование условий применений.

Исключая те или иные причины разрушения, мы в итоге получаем подходящий метод для анализа причин разрушения изделия.

Таблица 15.3. Типичный опросный лист, используемый для анализа причин разрушения

-
1. История образца и описание характера разрушения
 - 1) было ли когда-либо изделие в работе?
 - 2) что изменилось?
 - 3) где произошло разрушение?
 - 4) характер разрушения
 - 5) произошло ли разрушение сразу после литья?
 - 6) процент разрушенных деталей из одной серии
 - 7) повторяемость разрушения
 - 8) всегда ли разрушение происходило в одном и том же месте?

Как выглядит разрушение?

 - 1) как хрупкое
 - 2) как пластичное
 - 3) наблюдались ли пластические деформации

Каковы последствия разрушения?

 - 1) минимальные
 - 2) катастрофические

Каким был вид нагружения, вызвавшего разрушение изделия?

 - 1) изгиб
 - 2) растяжение
 - 3) сжатие

- 4) кручение
- 5) вибрации
- 6) удар
- 7) ползучесть

Что можно сказать о трещине?

- 1) она была с самого начала
- 2) тонкие или толстые стенки изделия
- 3) трещина появилась в переходной области
- 4) трещина появилась в области литника
- 5) трещина появилась в области прилива

2. Материал

Что известно о материале, из которого изготовлено изделие?

- 1) марка и номер партии
- 2) цвет
- 3) отвечает требованиям (спецификации) в минимальной степени
- 4) был сделан правильный выбор для данного применения
- 5) содержит добавки вторичного материала
- 6) какова его доля
- 7) видны ли загрязнения

3. Дизайн

- 1) Были ли внесены измерения по сравнению с чертежом
- 2) толщина стенок и переходов
- 3) расположение литников и линий стыков потоков
- 4) галтели, радиусы скруглений, ребра
- 5) деформация изделия
- 6) наличие выступов или углублений для установки зажимов
- 7) был ли проведен анализ изделия методом конечных элементов

4. Технология переработки

- 1) инструмент
- 2) правильно ли была спроектирована система литников и впрысков
- 3) были ли изменения гнезд при формовании изделия
- 4) критический анализ условий литья и процесса сушки
- 5) были ли проведены операции рециклинга
- 6) была ли достаточна мощность машины, в которой получали изделие
- 7) были ли достаточны уклоны и впрыски
- 8) были ли замечены раковины и пустоты
- 9) были ли подгары и черные точки
- 10) были следы в месте разъема формы

5. Вторичные операции сборки, отделки и машинной обработки

5.1 Сборка

Соединение

- 1) повлияло ли это на характеристики изделия
- 2) повлияло ли на прочность
- 3) повлияло ли на совместимость

Сварка

- 1) конструкция сварного шва
- 2) прочность
- 3) плотность
- 4) отметки от прогара на изделии
- 5) использованное оборудование
- 6) отклонения от технологического процесса

Болтовые соединения и вставки

- 1) выбор соединяемого изделия

- 2) выбор технологии
- 3) размер отверстия под крепление
- 4) прочность
- 5) прочность выступов

Сборка

- 1) примененный процесс
- 2) прочность соединения
- 3) использованное оборудование

Особые условия

- 1) применялись ли заклепки
- 2) применялись ли иные специальные способы соединения

5.2 Отделочные операции

Использование аппликаций

- 1) тип адгезива
- 2) параметры нанесения аппликации
- 3) внешний вид

Цвет

- 1) стабильность
- 2) технология
- 3) совместимость

Металлизация

- 1) адгезия
- 2) совместимость
- 3) эффективность
- 4) взаимодействие с окружающей средой

Нанесение надписей

- 1) адгезия
- 2) совместимость
- 3) технология

5.3 Машинная обработка

Возникли ли в процессе обработки напряжения вследствие:

- 1) обрезки
- 2) фрезерования
- 3) сверления
- 4) отжига
- 5) удаления смазки

6. Воздействие окружающей среды

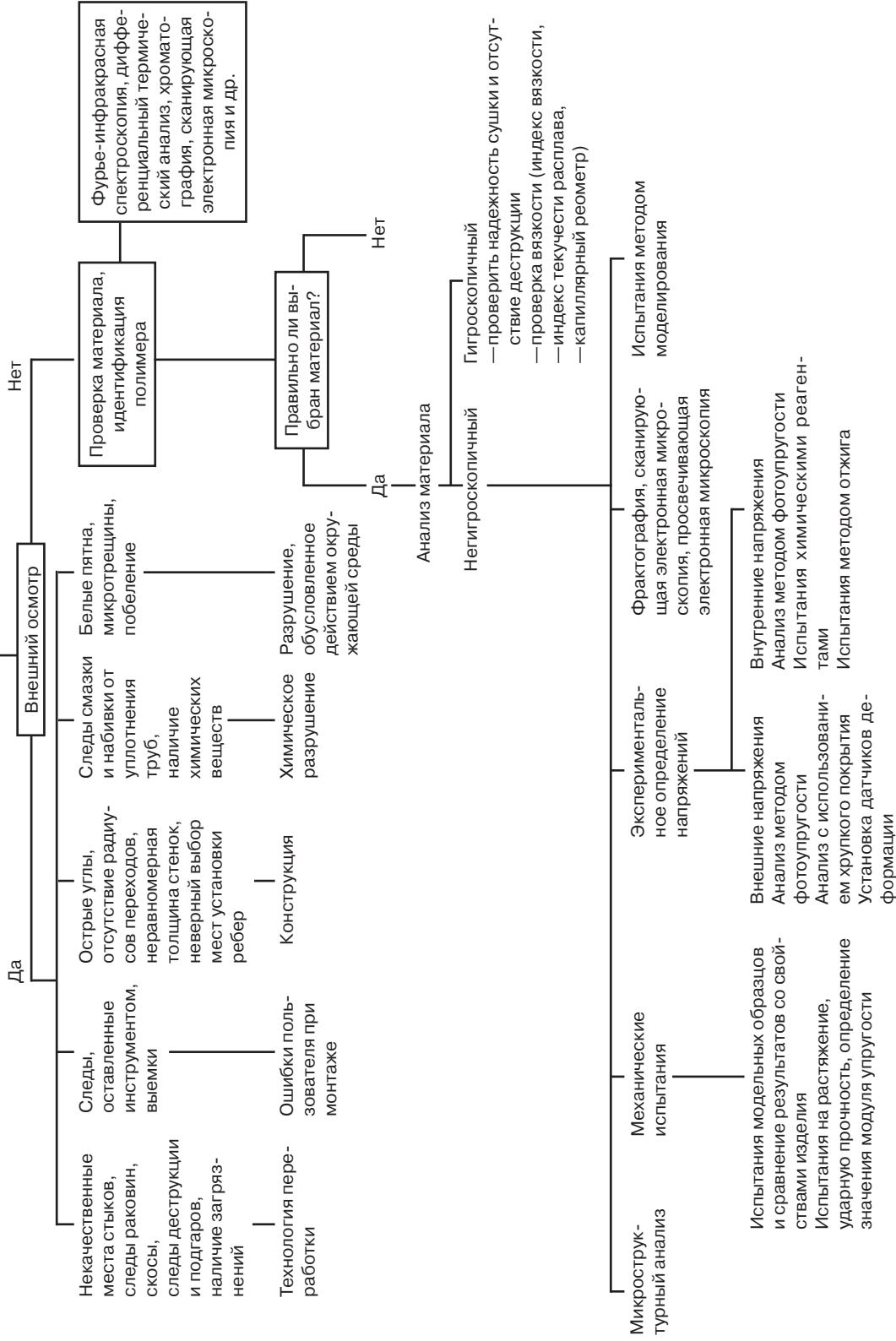
- 1) находилась ли разрушенная поверхность под воздействием солнечного света
- 2) воздействие химических реагентов
- 3) попадало ли изделия в условия пониженных или повышенных температур
- 4) влажность
- 5) было ли воздействие ультрафиолетового облучения
- 6) трение и износ

7. Характер действовавших напряжений

- 1) ударные нагрузки
- 2) воздействие погодных условий
- 3) термические
- 4) человеческий фактор
- 5) при хранении
- 6) разрушение под воздействием электрического тока

С разрешения *GE Plastics*

Анализ причин разрушения



15.3.1. Внешний осмотр

Внешний осмотр поврежденного изделия остается одним из наиболее важных способов анализа причин разрушения. Правильно проведенный осмотр и хорошо задокументированные результаты наблюдений служат надежной основой для выбора дальнейшей стратегии испытаний; они дают ключ и направление, в котором следует проводить дальнейший анализ. Кроме всего прочего, это наиболее дешевый метод анализа, для которого нужен только хорошо натренированный глаз, увеличительное стекло и правильно подобранное освещение.

Прежде всего, необходимо очень тщательно и осторожно собрать свидетельства произошедшего. Ни в коем случае нельзя повредить куски детали, полученные в результате разрушения, а также поверхности разлома. Необходимо тщательно вымыть осколки с помощью подходящих реагентов, чтобы впоследствии можно было провести химический анализ на присутствие веществ, вызвавших возникновение нежелательных напряжений. Если разрушенная деталь попала к вам в виде отдельных осколков, попытайтесь очень осторожно сложить их с тем, чтобы представить себе, как выглядела целая деталь. Это может дать ключ к пониманию того, где было место, являющееся первопричиной брака.

Так, если вам доступно большое количество разрушенных деталей, то попробуйте найти номер гнезда, в котором отливались эти детали. Если окажется, что большинство из них получены в одном или двух тех же самых гнездах, то это даст ключ к дальнейшим поискам. Изделия с дефектами следует сравнить с такими же деталями, но отлитыми в других гнездах. Области, в которых следует проводить поиск — это размеры впусков, расположение литников, наличие острых углов, отсутствующие радиусы скругления, поры и т. п.

Тщательное внешнее обследование подобных деталей позволяет обнаружить многие вещи. Избыточное количество сколов показывает, что материал не был достаточно хорошо просушен перед литьем. Влага стремится выйти из деталей, изготовленных из гигроскопичных материалов, что ухудшает его физические свойства, и в некоторых случаях материал может стать даже хрупким.

Присутствие посторонних примесей и загрязнений ухудшает качество изделий и может быть причиной их разрушения. Невооруженным глазом можно также легко определить прожоги. Они обычно выглядят как коричневые полосы и черные пятна. Эти отметины свидетельствуют о возможности деструкции материала, то есть о разрушении макромолекул, что в итоге приводит к ухудшению всех его физических свойств. Изделия из поливинилхлорида можно рассматривать в ультрафиолетовых лучах, что позволяет выявить деструкцию полимера. Выделившиеся в результате деструкции молекулы хлористого водорода флуоресцируют и могут быть легко обнаружены. Раковины и ослабленные места сварки, хорошо заметные при рассмотрении детали, говорят о плохом качестве технологии переработки и могут быть причиной разрушения. Для оценки качества сварки можно использовать простой прием: нажимая ногтем на область сварки, можно почувствовать, насколько глубоко проварен материал. Если сварка произведена качественно, то палец не должен почувствовать наличия сварки.

Визуальный осмотр также позволяет выяснить, насколько правильно или неправильно потребитель использовал данную деталь. Наличие необычных химических веществ, смази, остатков уплотнений труб и иных химических агентов может дать ключ к выяснению причин выхода детали из строя. Наличие вмятин и выемок показывает, что деталь была подвергнута действию избыточно больших усилий.

Острые углы, отсутствующие радиусы переходов, разнотолщинность, неправильное размещение ребер и тому подобное указывают на ошибки проектирования. Следует тщательно рассмотреть поверхности, по которым произошел разлом, под увеличительным стеклом. Если эти поверхности гладкие, то это указывает на хрупкий характер разрушения, в то время как шероховатость этой поверхности, наличие вырванных кусков, которое может сопровождаться побелением отдельных областей, свидетельствует о пластическом характере разрушения. Гладкая поверхность разлома также может быть связана с воздействием химических агентов, приведшим к хрупкому разрушению. Если наблюдается коробление детали, то это может быть следствием: а) больших остаточных напряжений, обусловленных технологическими причинами; б) термических эффектов, вызванных перегревом изделия.

Деталь, вышедшую из строя, следует осторожно разрезать острым лезвием. Задачей обследования в этом случае является установление наличия пор, вызванных присутствием газовых пузырьков, а также усадкой, особенно существенной в толстых стенках изделия. Уменьшение эффективной толщины стенки и появление острых надразов, связанных с присутствием таких пор, приводит к тому, что прочность детали становится недостаточной, чтобы выдержать растягивающие или сжимающие нагрузки, или удар, что и приводит к разрушению изделия.

И наконец, если изделие находилось под воздействием ультрафиолетового излучения или иных факторов влияния окружающей среды, то визуальный осмотр в этом случае позволит выявить наличие белых слабо выраженных пятен, микроскопических трещин, образование крупных трещин, различимых невооруженным глазом, а также обесцвечивание поверхности детали.

15.3.2. Идентификация изделия

Одной из наиболее часто встречающихся причин поломок изделия является просто неправильный выбор материала. После того как изделие, вышедшее из строя, было возвращено от потребителя, первая задача состояла в проверке того, был ли использован именно тот материал, который был выбран для изготовления данного изделия. Однако простая оценка того, был ли взят тот самый полимер, недостаточна, поскольку для одного и того же полимера существует очень широкий марочный ассортимент, так что необходимо идентифицировать также марку использованного материала. Для первичной оценки можно использовать такой простой метод, как измерение индекса расплава.

Существенное влияние на физические свойства материала оказывает, то какая доля вторичного материала была в композиции. Как общее правило, чем больше доля вторичного сырья, тем хуже физические свойства смеси. Если в процессе переработки

была превышена рекомендованная температура или расплав слишком долго находился при высокой температуре, имеется вероятность того, что произошла деструкция. Если такой материал смешать с первичным сырьем и переработать, то это может привести к очень значительному снижению свойств конечной продукции. К сожалению, почти невозможно оценить долю вторичного сырья, проводя испытания готового изделия. Тем не менее можно установить корреляцию между значением индекса расплава и скоростью разрушения деталей, и, проведя серию испытаний с полимерами, различающимися по этому показателю, на этом основании установить минимальный и максимальный допустимые уровни изменения индекса расплава [27].

В качестве альтернативного метода можно использовать измерение вязкости разбавленных растворов. Сравнивая значения молекулярных масс известных образцов и материала разрушенной детали, можно сказать, происходила ли деструкция полимера при его переработке. Молекулярная масса полимера после деструкции меньше, чем у исходного образца.

При переработке полимеров нередко происходит их загрязнения посторонними веществами. Для того чтобы очистить рабочий цилиндр литьевой машины от предыдущего сырья при смене перерабатываемого материала используют различные чистящие вещества. Не все из них совместимы с полимером. По этой причине может произойти снижение свойств, охрупчивание полимера и расслоение его на компоненты. Существует неверная практика добавления некачественного материала в перерабатываемую композицию.

При переработке винилхлоридных композиций ошибки могут быть связаны с тем, что не были добавлены ключевые ингредиенты, такие как модификаторы удара, что приведет к непредсказуемому разрушению изделий.

Простые лабораторные опыты не позволяют идентифицировать многие загрязнения, а также отсутствие некоторых ключевых компонент в композиции. Для этого требуется использовать более сложную современную экспериментальную технику, такую как спектроскопия, хроматография, сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия. Такие методы во многих случаях позволяют не только однозначно идентифицировать базовый материал, но и определить тип и содержание добавок. Полимеры крайне редко используют без введения в них тех или иных добавок. Такие добавки играют важную роль в термической стабилизации материала или повышения сопротивления воздействию окружающей среды. Для улучшения свойств материала используют такие традиционные добавки, как антиоксиданты, пламегасители, стабилизаторы против ультрафиолетового излучения, термостабилизаторы и смазки. Если по каким-либо причинам эти важные добавки не были введены в композицию или были израсходованы в процессе переработки, то возможно разрушение изделия.

Для расшифровки состава полимерных композиций, определения химической природы и относительного содержания компонент используют такие современные экспериментальные методы, как высокоэффективная жидкостная хроматография, газовая хроматография, ядерный магнитный резонанс, пиролитическая масс-спектрометрия, Фурье-инфракрасная спектроскопия. Эта техника также может быть использована для инженерной оценки роли тех или иных добавок.

Альтернативные методы идентификации добавок и иных ингредиентов были обсуждены в главе 13.

К числу других всевозможных методов идентификации и анализа, реально широко используемых в промышленности пластмасс, относятся следующие четыре:

- Фурье-инфракрасная спектроскопия;
- дифференциальный термический анализ;
- определение зольности (методом сжигания) и термогравиметрический анализ;
- измерения вязкости.

Фурье-инфракрасная спектроскопия является одним из наиболее мощных методов идентификации, используемых для анализа полимерных материалов. Методика испытаний состоит просто в том, что небольшой образец помещается на пути распространения пучка инфракрасных лучей, часть из которых поглощается, а часть проходит сквозь образец. Получаемый при этом спектр, как отпечатки пальцев, сугубо индивидуален для каждого вещества. Поскольку никакие две молекулярные структуры не дают одинаковых спектров, сравнение полученных результатов со спектрами известных соединений позволяют вполне надежно идентифицировать материал. К числу важнейших преимуществ этого метода относятся скорость, точность и возможность проводить испытания с использованием образцов очень маленьких размеров. В зависимости от качества используемого оборудования и полноты имеющейся библиотеки спектров определение природы полимеров, добавок и загрязнений может проводиться за считанные минуты.

После того как было определено к какому классу полимеров (полиамидам, полиацетатам, поликарбонатам) относится испытуемый объект, дальнейшие исследования, выполняемые методом дифференциального термического анализа, позволяют установить конкретный тип полимера (например полиамиды 6, 66 или 6612, или же гомо- или сополимеры полиацеталей).

Использование метода Фурье-инфракрасной спектроскопии позволяет определить, кроме самого базового полимера, также тип добавок и загрязнений.

Если предполагается, что в материале, из которого была изготовлена вышедшая из строя деталь, содержатся неорганические компоненты, такие как тальк, карбонат кальция, стеклянные волокна, то очень полезным для их идентификации может оказаться метод определения зольности. Метод состоит в том, что полимерный материал сжигается в муфельной печи при температуре 600 °С, после чего взвешивается твердый остаток. Рассматривая золу под микроскопом, можно отделить стекло от минералов. Более строго и более точно такая идентификация достигается использованием метода термогравиметрического анализа. Эта техника может применяться даже если образец имеется в количестве всего нескольких миллиграммов.

После того как была проведена идентификация полимера, следует отнести его к одной из двух категорий — гигроскопичных или гидрофобных материалов. Все гигроскопичные материалы необходимо тщательно сушить до начала переработки, чтобы исключить ухудшения физических свойств изделия, обусловленного присутствием влаги. Для того чтобы оценить, не произошла ли гидролитическая или термическая деструкция полимера, следует исследовать, не изменился ли молекулярный вес

полимера. Для этого используют измерения характеристической вязкости, индекса расплава и эффективной вязкости расплава методом капиллярной реометрии. Подробно эти методы описаны в главе 7.

15.3.3. Анализ напряженного состояния

После того как методами визуального анализа и идентификации материала было выяснено, что причиной разрушения изделия не являются ни недостатки технологического процесса, ни ошибки в выборе материала, предстоит сделать следующий логический шаг и рассмотреть характер напряженного состояния детали при ее эксплуатации.

Экспериментальное определение характера напряженного состояния изделия представляет собой наиболее общий метод определения причин его разрушения. Этот подход заполняет зазор между теоретическими расчетами напряженного состояния, выполненный методом конечных элементов, и изучением причин разрушения изделия. Экспериментальное определение напряженного состояния, выполненное на моделях или прототипах реальных изделий, не только дополняет результаты теоретических расчетов, но и позволяет установить общую реальную картину распределения напряжений в изделии, включая и остаточные напряжения [23]. На изделие могут действовать внешние нагрузки или же в нем могут сохраняться остаточные напряжения. Эти напряжения, а также их наложение могут привести к неожиданному разрушению изделия.

Определение остаточных напряжений преследует несколько иные цели, нежели анализ напряженного состояния под действием внешних сил. Конечно, можно установить, что разрушение произошло из-за неудовлетворительной конструкции изделия или же из-за превышения нагрузки над пределом прочности. Такие причины разрушения обычно довольно легко находятся при пробных испытаниях или на стадии выпуска опытных партий. Роль же остаточных напряжений иная. Эти напряжения возникают в ходе технологического процесса формирования изделия, и они могут проявиться везде и в любое время. Сохранение в изделии остаточных напряжений приводит к снижению прочности, уменьшению температурного предела работоспособности и ухудшению сопротивления действию химических агентов.

Во всех этих случаях полезным может оказаться использование метода фотоупругости, который позволяет определить дефектные детали на ранних стадиях и установить причины разрушения прозрачных изделий.

Важно понять, что экспериментальный метод определения напряжений на самом деле позволяет измерить не напряжения, а деформации. Деформации далее пересчитываются в напряжения, исходя из известных свойств испытуемого материала [18].

Для экспериментального определения напряженного состояния используют пять основных методов:

- фотоупругости;
- хрупких покрытий;
- измерения деформаций;

- воздействия химическими реагентами;
- испытания отжигом.

Метод фотоупругости

Метод фотоупругости чрезвычайно популярен среди инженеров-конструкторов, а также специалистов, занимающихся изучением причин разрушения, поскольку это очень информативный и относительно простой способ анализа напряженного состояния в изделии.

Если исследуемое изделие изготовлено из прозрачной пластмассы, то выполнение анализа совсем не сложно. Все прозрачные полимерные материалы обладают способностью к двулучепреломлению и тем самым относятся к фотоупругим материалам. Прозрачная деталь помещается между двумя поляризаторами и рассматривается со стороны, противоположной источнику света. Явление фотоупругости обусловлено тем, что при прохождении светового луча через прозрачную среду, в которой действуют напряжения, он расщепляется на два расходящихся поляризованных луча, направления колебания которых (вдоль осей x и y , соответствующих линии действия главных напряжений) различны. Это явление, которому соответствуют два разных значения показателя преломления, называют двулучепреломлением.

Два световых потока проходят через материал с различной скоростью, которая зависит от величины действующих напряжений. Относительное расстояние между двумя световыми лучами (быстрым и более медленным) зависит также от толщины изделия. Разность расстояний называется запаздыванием. Вращая второй поляризатор (называемый анализатором), можно изменять интенсивность светового потока, приходящего к наблюдателю. Компоненты световых волн, которые прошли через исследуемый материал при некотором угле расположения анализатора, интерферируют между собой, что в итоге приводит к возникновению характерной цветовой картины. Интенсивность цветовой гаммы при рассмотрении прозрачного или мутного изделия, в котором действуют напряжения, при прохождении поляризованного света модулируется запаздыванием. Наблюдаемые цветные полосы отвечают линиям постоянных напряжений. Интенсивность окраски ослабляется при увеличении запаздывания или частоты цветных полос. Цветная картина, наблюдаемая в поляризованном цвете, может использоваться для количественного анализа распределения напряжений в исследуемом изделии [25].

Если цветная картина возникает и при отсутствии внешних сил, то это является свидетельством наличия внутренних (остаточных) напряжений в изделии. Высокая частота чередования линий в некоторой области говорит о том, что в этой области существует высокий уровень действующих напряжений, в то время как низкая частота чередования линий соответствует области, в которой напряжения отсутствуют. Кроме того, высокая частота линий говорит о большом градиенте напряжений. Однородный цвет свидетельствует о равномерном действии напряжений в изделии [26].

Далее, деталь может быть подвергнута действию сил, которые моделируют реальные условия ее эксплуатации. Тогда можно легко обнаружить область высоких напряжений, создаваемую действием внешних сил.

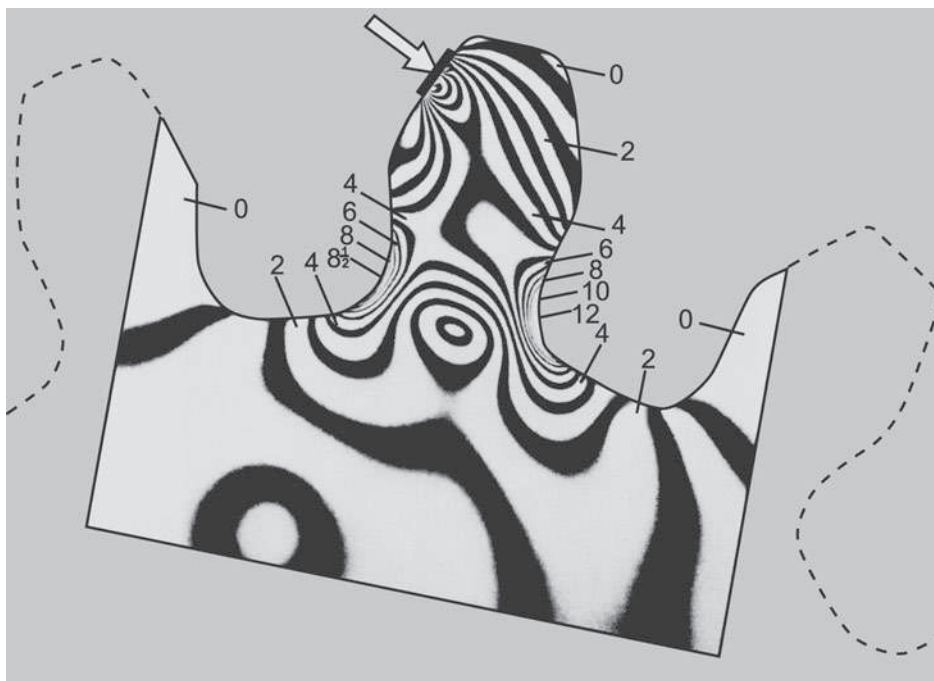


Рис. 15.32. Типичный пример определения распределения напряжений в изделии (с разрешения Vishay Measurements Group)

На рис. 15.32 приведен типичный пример распределения напряжений в изделии.

Обсуждаемый метод оценки распределения напряжений полезен как повседневный способ обследования продукции для контроля ее качества на прозрачных образцах, который должен применяться производителями для поддержания заданного уровня надежности и предотвращения непредвиденного разрушения. Этот метод позволяет решать многие проблемы, обусловленные недостаточным контролем таких технологических параметров, как температура, качество материала, скорость заполнения формы, особенности конструкции и т. д.

Применение обсуждаемого метода основывается на использовании трех основных методов:

- непосредственное наблюдение цветной картины;
- компенсаторный метод;
- метод, связанный с вращением анализатора.

Простое рассмотрение цветной картины, возникающей в изделии при его помещении между двумя поляризаторами, имеет весьма ограниченную ценность. Возможна различная интерпретация результатов таких наблюдений, так что получаемые данные могут использоваться только для сравнительного анализа.

Компенсаторный метод (по *ASTM D4093*) основан на использовании компенсатора в виде клина и калиброванного устройства для ручной регулировки. С его по-

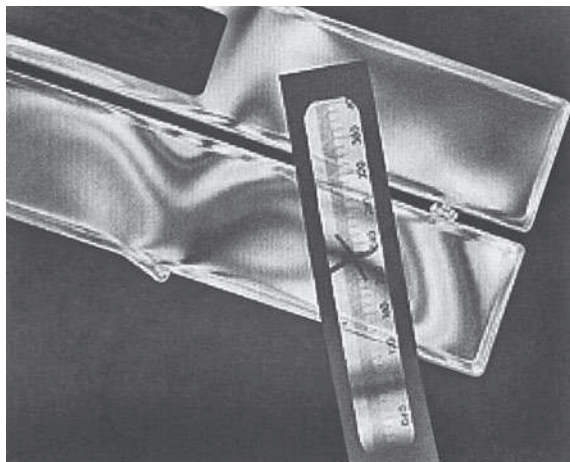


Рис. 15.33. Компенсаторный метод для количественного определения напряжений (с разрешения *Strainoptics, Inc.*)

мощью вводится дополнительное запаздывание, равное наблюдаемому, но обратное по знаку. Оператор устанавливает компенсатор в такое положение, чтобы в точке, для которой ведется исследование, появилась черная полоса (рис. 15.33).

Шкала, которой снабжен компенсатор, позволяет количественно определить величину оптического запаздывания.

Более совершенный метод измерения, основанный на использовании вращающегося анализатора, позволяет достаточно точно определить относительные величины запаздывания.

Прозрачные изделия, используемые в медицинской практике, часто отжигают для устранения остаточных напряжений. В этом случае метод фотоупругости весьма эффективен для оценки эффективности процесса отжига и анализа причин разрушения изделий.

На рис. 15.34 показан пример влияния отжига на остаточные напряжения в медицинской упаковке.

Анализ трехмерных моделей эффективно используется для определения поверхностных напряжений, а также трехмерных моделей в любой точке внутри изделия. Этот метод широко используется для исследования моделей, изготовленных литьем под давлением или стереолитографией, для определения остаточных напряжений, которые существуют в изделии, подвергнутом нагреву в камере и последующем охлаждению до комнатной температуры. Из такой модели готовятся срезы, и определяется уровень сохранившихся в них замороженных напряжений.

Другая методика, называемая методом фотоупругих покрытий, может использоваться для анализа напряжений в непрозрачных деталях. На изделие наносится покрытие, изготовленное из фотоупругого материала. Далее к изделию прикладывается нагрузка, отвечающая реальным условиям эксплуатации. Предполагается, что возникающие внутри изделия деформации передаются на поверхность. Поверхность освещается поляризованным светом от отражающего полярископа. Использование

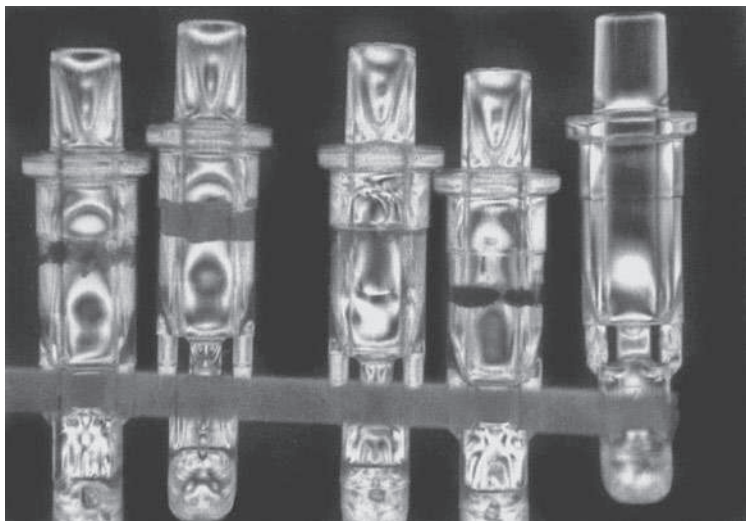


Рис. 15.34. Сопоставление распределения остаточных напряжений до и после отжига

цифрового компенсатора, соединенного с полярископом, позволяет выполнять количественный анализ действующих напряжений [27].

Таким образом, техника фотоупругости является эффективным методом исследования причин разрушения изделий из полимерных материалов.

Исследование областей концентрации напряжений

Места концентрации остаточных напряжений, хорошо различимые по картине двулучепреломления, зависят от типа использованного материала и условий литья. Такие технологические параметры, как давление и температуры влияют как на появление областей концентрации остаточных напряжений, так и на их величину.

На рис. 15.35 показаны фотографии четырех компакт-дисков с различной степенью остаточных напряжений. Диск в правом нижнем углу был получен из полистирола общего назначения. Все остальные были отлиты из высокотекучего оптического поликарбоната, марка которого была специально разработана для производства компакт-дисков. На диске, показанном в левом верхнем углу, видно, что концентрация напряжений имеет место в окрестности втулки. На образце, показанном в правом верхнем углу, видно, что напряжения концентрируются вблизи края диска, где они не играют существенной роли, поскольку в этой области диска либо вообще не сохраняется информация, либо она сохраняется в очень небольших объемах. Как видно, внутренние напряжения в образце, показанном в левом нижнем углу, минимальны по сравнению с остальными дисками. Это отражается в том, что диск прозрачен практически по всей его поверхности. Наихудшим в отношении уровня остаточных напряжений является образец в правом нижнем углу. Число полос и их плотное расположение указывают на высокий уровень остаточных напряжений по всей поверхности диска. Такая большая величина остаточных напряжений обусловлена тем, что для получения диска был использован высокомолекулярный полистирол общего

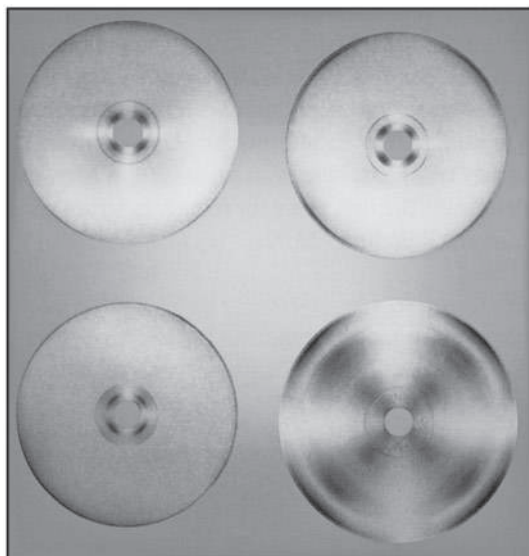


Рис. 15.35. Фотография четырех компакт-дисков с различной степенью остаточных напряжений (воспроизведено с разрешения *Injection Molding*)

назначения, а полученная картина ясно указывает, почему этот материал непригоден для производства компакт-дисков.

Метод хрупкого покрытия

Использование этого метода открывает альтернативные возможности измерения локализованных напряжений в полимерных изделиях. На напряжения после сушки покрытия на воздухе начинают действовать механические нагрузки. Величина максимальных деформаций и направление главных деформаций обнаруживаются по появлению мелких трещин, возникающих под влиянием внешней нагрузки. Таким образом, эта методика дает наглядную общую картину распределения напряжений по поверхности изделия.

На рис. 15.36 представлен пример типичной картины растрескивания поверхностного покрытия после приложения нагрузки.

Данные, получаемые методом хрупкого растрескивания покрытия, указывают на точное расположение опасных областей, в которых следует устанавливать датчики деформаций, и ориентацию главных осей деформации, что позволяет осуществлять точные измерения деформаций. Этот метод также полезен для определения напряжений и областей концентрации напряжений, которые слишком малы или неудобны для установки датчиков деформаций [28]. Метод упругого покрытия, однако, в отличие от метода фотоупругости, непригоден для количественного анализа напряжений, созданных внешней нагрузкой, равно как и остаточных напряжений.

Для реализации рассматриваемого метода под упругое покрытие иногда необходимо подстелить подложку, которая бы обеспечила необходимую адгезию и минимизировала проблемы, связанные с совместимостью материалов. Возможно, что наиболее

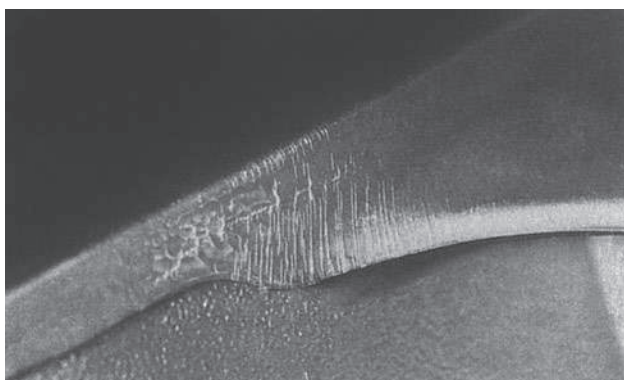


Рис. 15.36. Типичная картина растрескивания покрытия в результате деформирования изделия (с разрешения *Bayer Corporation*)

удобный способ использования этого метода состоит в том, чтобы использовать получаемые результаты в отношении мест концентрации напряжений и их ориентации для установки в этих местах датчиков деформаций. Более детальное обсуждение этого метода интересующиеся могут найти в литературе [29, 30].

Метод измерения деформаций

Измерение деформаций с помощью электрических датчиков сопротивления является наиболее популярным и широко используемым методом измерений деформаций. Такие датчики представляют собой решетку, изготовленную из металлической фольги, крепящуюся к исследуемому материалу. Когда проводник подвергается действию механических деформаций, его электрическое сопротивление изменяется пропорционально деформации. Этот принцип использован в работе датчиков деформации.

Такие датчики с помощью специальных адгезивов устанавливаются на поверхности изделия и присоединяются к электрическому измерительному устройству. Когда изделие подвергается действию внешних сил, возникают деформации, в частности деформации поверхности, которые воспринимаются решеткой. Эти деформации приводят к изменению длины и поперечного сечения проводников, что отражается на изменении их сопротивления. Изменение сопротивления измеряется с помощью соответствующих приборов [31].

При использовании этого метода для исследования причин разрушения деталей следует с особой осторожностью подходить к проблеме совместимости адгезива с исследуемым полимером для того, чтобы избежать возможности растрескивания.

Остаточные, или замороженные, напряжения могут измеряться с помощью рассматриваемого метода, если устанавливать датчики деформации вблизи высверливаемых отверстий. Сначала в определенных местах измеряются напряжения, затем высверливаются отверстия, вследствие чего высвобождаются замороженные напряжения. Затем вновь измеряются напряжения. Разница между результатами двух измерений как раз и указывает на величину остаточных напряжений.

«Химический» метод — метод воздействия химическими реагентами

Большинство пластмасс, находящихся под действием напряжений, растрескиваются при контакте с определенными химическими реагентами. Использование для этой цели растворителей открывает возможности количественной оценки уровня напряжений в изделиях. Этот метод особенно удобен для оценки внутренних напряжений, которые возникают в изделии при использовании некачественной технологии формования, а также вокруг металлических втулок, вкладышей, винтов, заклепок и т. п. Внутренние напряжения также развиваются при литье горячего расплава полимера в относительно холодную форму. Молекулярная ориентация появляется при заполнении формы по мере того, как расплав проходит через насадки, выпуски, литники и течет в гнездах литейной формы. Внутренние напряжения, обусловленные молекулярной ориентацией, способствуют образованию раковин или остаются в замороженном виде, приводя к снижению долговечности и сопротивления изделия воздействию окружающей среды. При превышении некоторого критического уровня напряжений под воздействием различных химических агентов происходит образование микротрещин и трещин, которые хорошо различимы на поверхности детали.

Пример результатов воздействия химических агентов на развитие микротрещин и трещин в области высоких напряжений вокруг монтажных отверстий детали показан на рис. 15.37.

Чувствительность полимера к воздействию растворителей определяется двумя факторами — химическим строением и полярностью как полимера, так и растворителя. Если в полимере имеются большие свободные объемы, как, например, в поликарбонате, то растворитель легко проникает в полимерную матрицу. Диффузия растворителя и набухание полимера проявляются наиболее сильно в областях концентрации напряжений, что и приводит к образованию микротрещин и трещин. Полярность полимера и растворителя также определяют степень притяжения или отталкивания между молекулами, что и имеет решающее значение для воздействия данного растворителя на полимер. Если параметры растворимости полимера и конкретного растворителя близки, то полимер оказывается чувствительным к воздействию этого растворителя. По мере увеличения разности между параметрами

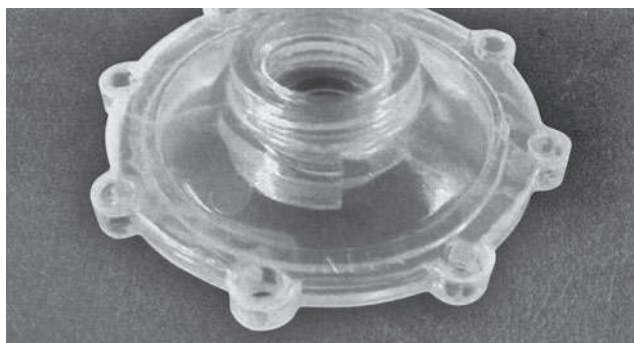


Рис. 15.37. Образование микротрещин и трещин в напряженных областях вблизи монтажных отверстий под воздействием растворителя

растворимости полимера и растворителя сопротивление полимера образованию трещин под влиянием соответствующего растворителя возрастает [32].

Согласно одной из применяемых методик, полимер погружается в смесь ледяной уксусной кислоты и воды на 2 мин при 73 °F, и затем изделие рассматривается на предмет обнаружения образования трещин, которые появляются, если внутренние напряжения превышают предел прочности полимера на растяжение [33]. Деталь может также вновь подвергнуться действию внешней нагрузки, и затем на ее поверхность распыляется химический агент. Таким способом находится величина критического напряжения, приводящего к образованию трещин.

Многие поставщики полимерных материалов приводят справочные данные по значениям критических напряжений под воздействием растворителей.

Если забракованная деталь возвращена от потребителя и на ней видны трещины, то ее следует испытать по описанной методике, что позволит оценить уровень внутренних напряжений, или же подвергнуть внешнему воздействию, моделирующему реальные условия эксплуатации.

Разрушение описанного типа часто наблюдаются, если при литье в изделие был вставлен металлический вкладыш, или же металлическая деталь была введена в изделие после литья.

Три метода — сопротивление деформированию, сопротивление образованию трещин под действием растворителя и сопротивление образованию трещин под влиянием окружающей среды — часто используют для поисков причин разрушения полимерных изделий. Так, хорошо известен метод погружения в ацетон для оценки качества труб и фитингов, изготовленных из поливинилхлорида. Реакция этих изделий на безводный ацетон очень показательна для оценки качества материала. При испытаниях непроплавленного поливинилхлорида погружением в ацетон полимер набухает, образуются хлопья или изделие просто разрушается. Если же композиция на основе поливинилхлорида была хорошо проплавлена, то она практически нечувствительна к воздействию безводного ацетона, который может вызвать лишь незначительное набухание. Бракованные изделия из поливинилхлорида, возвращенные от потребителя, следует подвергнуть испытанию по указанной методике.

Отчет о результатах испытания образца, подвергнутого воздействию растворителем

Резюме. Все детали, полученные методом литья под давлением, в большей или меньшей степени содержат замороженные (остаточные) напряжения. Уровень этих напряжений зависит от конструкции детали, использованного оборудования и особенностей технологического режима. Остаточные напряжения в значительной мере повышают чувствительность изделия к возникновению трещин под влиянием окружающей среды, что приводит к понижению ударной прочности и снижению теплостойкости под нагрузкой.

Задачей настоящего проекта является оценка величины остаточных напряжений в различных изделиях, полученных методом литья под давлением, с помощью метода анализа напряжений воздействием растворителей. Второй задачей исследования было установление минимально допустимого уровня остаточных напряжений, при котором детали отвечали требованиям, предъявляемым к их качеству.

Испытания показали, что уровень остаточных напряжений во всех исследованных деталях, изготовленных из поликарбоната, как правило, не превышает 1000 фунт/дюйм². Типичные значения остаточных напряжений в правильно сконструированных изделиях, полученных при соблюдении установленных технологических норм, лежат в диапазоне от 900 до 1200 фунт/дюйм². Таким образом, исследования привели к выводу, что испытанные детали сконструированы правильно и изготовлены качественно, так что полученные значения остаточных напряжений не должны сказаться на долговременном сохранении требуемых свойств изделий.

Цель. Целью проведенных испытаний было определение уровня остаточных напряжений в различных деталях, изготовленных методом литья под давлением, с помощью метода анализа напряжений воздействием растворителя. Существует общепринятая точка зрения о том, что при старении в условиях повышенных температур может произойти утрата функциональных качеств изделия. Это возможно в том случае, если в материале сохраняются высокие остаточные напряжения, которые при высоких температурах приводят к медленным изменениям размеров деталей после их сборки в различные изделия.

Метод анализа напряжений воздействием растворителя позволяет оценить уровень остаточных напряжений в изделиях, что, в свою очередь, позволит установить допустимый предел, при котором деталь сохраняет требуемое качество.

Материалы и метод испытаний

Метод	Анализ напряжений воздействием растворителя
Наименование метода	Метод испытаний T-77 фирмы <i>General Electric</i> , основанный на воздействии на образец уксусной кислотой (по <i>ASTM 1939</i>)
Проект	№ CP 1001
Заказчик	<i>Consultek, LLC</i>
Материалы	Поликарбонат и АБС-пластик
Условия испытаний	23 °C/относительная влажность 50%
Образцы	Не требуются
Условия изготовления	Литье под давлением
Продолжительность	3 мин на каждый образец
Растворители	Метанол/этилацетат

1. Приготовить различные растворы для того, чтобы провести испытания при критических напряжениях 1200, 1100, 1000, 800 и 500 фунт/дюйм². Как промежуточный вариант в качестве исходной точки использовать раствор при критическом уровне напряжений 1200 фунт/дюйм². Если при этом не будет обнаружено образования трещин, то необходимо увеличивать концентрацию этилацетата и повторять испытания на свежих образцах.
2. Образец погрузить в раствор, проконтролировать, чтобы он был полностью смочен растворителем, и выдержать в растворе в течение 3 мин.
3. После 3-минутной выдержки образец вынуть и прополоскать в дистиллированной воде.

4. Визуально исследовать образец на предмет обнаружения появления микро-трещин.
5. Если следов микротрещин не было обнаружено, повторить испытания на свежих образцах с использованием растворов с более высокой концентрацией этилацетата.
6. Для каждого испытания использовать не менее трех образцов.

Результаты

Критическое напряжение	Деталь А	Деталь В	Деталь С	Деталь D
Метанол/этилацетат			ОМО	
1200 фунт/дюйм ² (71:29)	ОМО	ОМО	ОМО	ОМО
1100 фунт/дюйм ² (69:31)	ОМО	ОМО	ОМО	ОМО
1000 фунт/дюйм ² (67:33)	ОМО	ОМО	ОМО	ОМО
800 фунт/дюйм ² (67:37)	ОМО	ОМО	ОМО	ОМО
500 фунт/дюйм ² (50:50)	ОМО	ОМО	ОМО	ОМО

ОМО — образование микротрещин отсутствует.

Заключение и рекомендации. Полученные результаты испытаний отчетливо свидетельствуют о том, что во всех исследованных образцах уровень остаточных напряжений в целом не превышает 1000 фунт/дюйм². Типичные значения остаточных напряжений в правильно сконструированных изделиях, полученных при соблюдении установленных технологических норм, лежат в диапазоне от 900 до 1200 фунт/дюйм². Таким образом, исследования привели к выводу, что испытанные детали сконструированы правильно и изготовлены качественно, так что полученные значения остаточных напряжения не должны сказаться на долговременном сохранении требуемых свойств изделий.

Чтобы быть уверенным, что детали получают с приемлемо низким уровнем остаточных напряжений, рекомендуем разработать стандарт для оценки качества и соответствующую методику, которая бы применялась как производителем, так и потребителем в качестве приемочных испытаний изделий. Максимально допустимый уровень остаточных напряжений не должен превышать 1000 фунт/дюйм².

Испытания методом отжига

Как уже говорилось, напряжения всегда присутствуют в изделиях, изготовленных из полимерных материалов. Эти напряжения называют замороженными, или остаточными. Использование метода нагрева (отжига) позволяет «вернуть» материал к начальному состоянию и тем самым определить остаточные напряжения.

Испытания состоят в том, что изделие или его часть помещают в термокамеру, в которой циркулирует подогретый воздух. Изделие выдерживается заданное время при контролируемой температуре. Далее изделия подвергается визуальному осмотру, который позволяет выявить ряд характерных признаков изменений. Такие эффекты, как коробление, образование вздутий, появление расслоений и дефектов типа рыбьего глаза, а также искажение формы вблизи мест заливки, указывает на уровень остаточных напряжений. При нагревании остаточные напряжения и

молекулярная ориентация постепенно исчезают, и полимер переходит в более стабильное состояние.

Важное значение имеет температура, при которой начинается этот процесс. На высокий уровень остаточных напряжений указывает начало деформационных процессов при отжиге, ниже температуры деформационной теплостойкости.

Метод испытаний такого рода был в последнее время усовершенствован применением датчиков деформаций, устанавливаемых в опасных областях образца, что позволило аккуратно отслеживать начальные изменения размеров [34].

Стандарт *ASTM F1057* описывает процедуру оценки качества экструдированных поливинилхлоридных труб методом отжига.

15.3.4. Микроструктурный анализ (приготовление микротомных срезов)

Приготовление микротомных образцов — это техника получения ультратонких срезов из пластмассовых изделий для их последующего микроскопического анализа. Этот метод в течение многих лет использовался биологами и металлургами, но только в последнее десятилетие он вошел в практику исследования причин разрушения в промышленности пластмасс.

Микротомирование состоит в приготовлении срезов толщиной 8–10 мкм, которые затем помещают на прозрачное стеклышко. Далее срез рассматривается в проходящем свете, причем микроскоп должен быть оснащен поляризатором для анализа фотоупругих эффектов. Предпочтительно использовать микроскоп с высокой степенью увеличения (от 20 до 40 раз), что позволит делать цветные снимки структуры.

Исследование микроструктуры материала позволяет получить много полезной информации. Так, например, рассмотрение срезов образцов, обладающих высокой хрупкостью, позволяет заключить, что температура расплава была неоднородной по объему материала или вообще слишком низкой. В таких случаях хорошо заметны непроплавившиеся кусочки полимера. Другой часто встречающейся причиной разрушения изделий, полученных методом литья под давлением, является слишком быстрое охлаждение литников и впусков, что приводит к недоливу. Визуально это проявляется в появлении пустот вследствие усадки. Такие пустоты хорошо видны на фотографии на рис. 15.38.

Пустоты в изделии понижают его прочностные характеристики и пластичность из-за концентрации напряжений в ослабленных областях.

Проблемы также всегда возникают из-за загрязнений, которые фиксируются как некие особенности микроструктуры. Неоднородности, обусловленные некачественным смешением двух различных полимеров, хорошо заметны при микроструктурном анализе. Неоднородное диспергирование красителя также может быть причиной хрупкого разрушения изделия. Все эти структурные особенности легко обнаруживаются с применением техники приготовления микротомных срезов.

Оптимальные свойства изделия достигаются тогда, когда различные добавки, в частности стеклянный наполнитель, равномерно распределены по объему материала. Микротомные срезы, полученные из стеклонеполненных армированных пластиков,

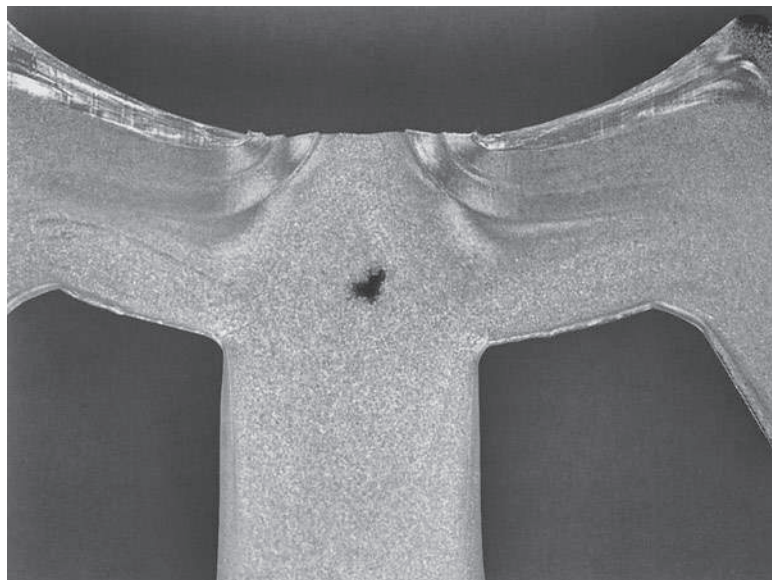


Рис. 15.38. Пустоты, образовавшиеся вследствие усадки

позволяет оценить характер образования связей между полимерной матрицей и наполнителем, а также степень диспергирования и ориентацию стеклянных волокон.

Использование поляризованного света и скрещенных поляроидов при структурных исследованиях позволяет оценить величину замороженных напряжений, а также напряжений, возникших при приложении внешних сил.

Техника приготовления микротомных срезов также позволяет оценить единство структуры изделия в области сварных швов [36].

15.3.5. Механические испытания

Бракованные изделия, возвращенные от потребителя, часто подвергаются различным механическим испытаниям для того, чтобы оценить целостность детали. Для этого используют два подхода. Во-первых, проводят испытания на растяжение, удар или сжатие на реальной детали или на вырезанных из него образцах. Полученные результаты затем сопоставляют с данными аналогичных измерений, выполненных на изделиях, оставшихся целыми.

Во-вторых, бракованные детали измельчают и из полученного порошка методами прессования или литья под давлением получают новые стандартные образцы, которые и испытываются по известным методикам. Полученные таким образом результаты сравниваются с опубликованными характеристиками свежего материала. Однако количество доступного для испытаний материала очень часто делает невозможным изготовление образцов методом литья под давлением.

Если произошло преждевременное разрушение изделия, то необходимо оценить долговечность, проведя испытания при циклической нагрузке в условиях растяжения или изгиба.

15.3.6. Термический анализ

Методы термического анализа широко используются при анализе причин разрушения. Дифференциальная сканирующая калориметрия, вообще, по-видимому, остается наиболее широко распространенным методом анализа, поскольку с ее помощью удается определить самые ключевые характеристики полимера. К их числу относятся: температура плавления, теплота фазового перехода, температура стеклования, степень сшивания. Как говорилось ранее, метод Фурье-инфракрасной спектроскопии не позволяет установить различия между полимерами, относящимися к одной и той же группе химических соединений. В этих случаях метод дифференциальной сканирующей калориметрии служит важным подсобным способом идентификации полимера. Этим методом легко установить различия между разными типами полиамидов (6 или 66), полиэфиров (полиэтилентерефталат или полибутилентерефталат), полиацеталей (гомо- или сополимеры), поскольку все сравниваемые полимеры имеют различные точки плавления.

На рис. 15.39 показаны термограммы полиэтилентерефталата или полибутилентерефталата, из которых отчетливо видно различие температур плавления этих полиэфиров [36].

Метод дифференциального термического анализа также позволяет измерить теплоту плавления, которая представляет собой просто количество энергии, затрачиваемое на плавление материала. Этот параметр важен, поскольку он связан со степенью кристалличности полимера. Степень кристалличности для кристаллизующихся полимеров в очень сильной степени влияет на их физические свойства. В общем случае увеличение степени кристалличности приводит к возрастанию предела прочности, жесткости и обеспечивает лучшую сопротивляемость воздействию химических агентов. Очень часто разрушение деталей происходит из-за того, что степень кристалличности полимера была слишком низкой, что обусловлено неудовлетворительным выбором технологического режима переработки исследуемого материала.

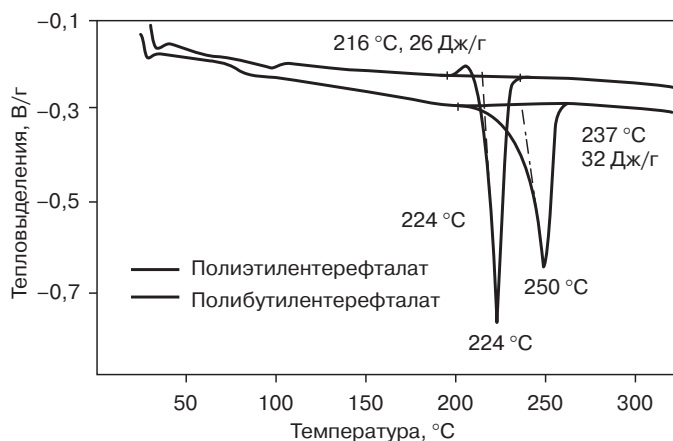


Рис. 15.39. Термограммы, полученные методом дифференциального термического анализа, которые отчетливо показывают значительную разницу между температурами плавления различных полиэфиров (с разрешения *ASM International*)

Результаты измерения температуры стеклования позволяют судить о деструкции материала, а также о присутствии или отсутствии зародышеобразователей в полимере [36].

Окислительная деструкция определяется с помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии по величине индукционного периода окисления, который позволяет судить о содержании антиоксиданта в материале. Пониженное содержание антиоксиданта может ускорить термическую деструкцию расплава при переработке, а также делает полимер более уязвимым к воздействию ультрафиолетового облучения, что является основной причиной охрупчивания изделий из полиолефинов.

Температура стеклования полиамида 6 может варьироваться в широких пределах в зависимости от содержания влаги в полимере. Метод дифференциального термического анализа позволяет определить содержание воды и ее влияние на деструкцию полиамидов [37].

Использование метода дифференциального термического анализа применительно к термореактивным смолам позволяет оценить степень структурирования. Недостаточно плотное сшивание приводит к резкому снижению механических свойств, что может явиться причиной разрушения изделия [38].

Термогравиметрический анализ широко применяют для определения относительного содержания добавок, таких как наполнители, армирующие добавки, пластификаторы, вспенивающие добавки т. д.

Важность применения метода термомеханического анализа часто недооценивают, хотя он может помочь понять критические особенности структуры полимеров как часть исследования причин разрушения. Этот метод позволяет оценить величины коэффициента термического расширения, температуру стеклования, а также величину остаточных напряжений [39].

Детальное обсуждение возможностей использования методов дифференциального термического, термомеханического и термогравиметрического анализа интересующиеся могут найти в главе 7.

15.3.7. Методы неразрушающих испытаний

Методы неразрушающего контроля полезны для определения наличия трещин, разрывов и соединений. В самом простом варианте эти методы состоят в визуальном осмотре, измерении размеров, взвешивании, определении поверхностных дефектов, ослабленных линий соединений и т. п. Для исследования причин разрушения пластмассовых изделий также используют такие неразрушающие методы испытаний, как ультразвук, акустическую эмиссию и рентгеноструктурный анализ.

15.3.8. Фрактография (по ASTM C1145)

Фрактография представляет собой один из наиболее ценных методов анализа причин разрушения полимерных изделий. Этот метод отличается от микроструктурного анализа, основанного на рассмотрении микротомных срезов, исследуемых с помощью микроскопа. При фрактографическом анализе рассматриваются поверхности

разрушения изделий. Основной задачей, решаемой с помощью этого метода, является установление связей между физическими и механическими явлениями, имеющими место в процессе разрушения. Характерный размер поверхности, исследуемой этим методом, варьируется от крупномасштабных площадей, хорошо видимых невооруженным глазом, и вплоть до микроскопических размеров, составляющих всего несколько микрон.

Наиболее часто используемым оборудованием при фрактографическом анализе являются световой и электронный микроскопы. Важное отличие электронной микроскопии от оптической состоит в большей глубине поля наблюдения при сканировании в электронном микроскопе. Поэтому метод сканирующей электронной микроскопии позволяет получить трехмерные изображения всей поверхности, позволяя обнаружить такие дефекты, как образовавшиеся бороздки и включения [40].

Исследование поверхностей, по которым произошло разрушение, и анализ картины образовавшихся трещин позволяет высказать суждения о природе происхождения трещин и направлении их распространения, механизме разрушения и действовавших при этом напряжений. На микроскопическом уровне все наблюдаемые разломы можно отнести к одной из двух категорий — хрупкому и пластическому разрушению. Пластическое разрушение характеризуется образованием вырывов с поверхности и большими пластическими деформациями. При хрупком разрушении не наблюдается сколько-нибудь заметных пластических деформаций, и для распространения трещин требуются затраты значительно меньшей энергии.

Фрактографический анализ позволяет обнаружить неожиданный эффект хрупкого разрушения полимера, обычно проявляющего свойства пластического материала.

Практика показывает, что существуют четыре типичные базовые особенности поверхности разрушения, обнаруживаемые при фрактографическом анализе:

- ветвления трещин;
- волнообразная структура;
- линии Валнера;
- образование усталостных борозд.

Ветвление на поверхности разлома представляет собой трещины, которые развиваются от места их зарождения, но не доходят до поверхности изделия. Типичный пример ветвления трещин показан на рис. 15.40.

Волнообразная структура хорошо видна у края поверхности разлома. Наблюдаемая картина, характерная для поверхности разлома этого типа, показана на рис. 15.41, причем по ней можно проследить направление к месту зарождения разрушения.

Линии Валнера представляют собой полосы также волнообразного характера, распространяющиеся от места начала разрушения. Как и в предыдущем случае, по ним можно судить об области, с которой начинается разрушение изделия. Линия Валнера образуется вследствие пересечения фронта распространяющейся трещины с поперечным упругим импульсом, который вызывает мгновенное изменение направления фронта развития трещины. Образование линий Валнера нехарактерно для наполненных полимерных материалов.

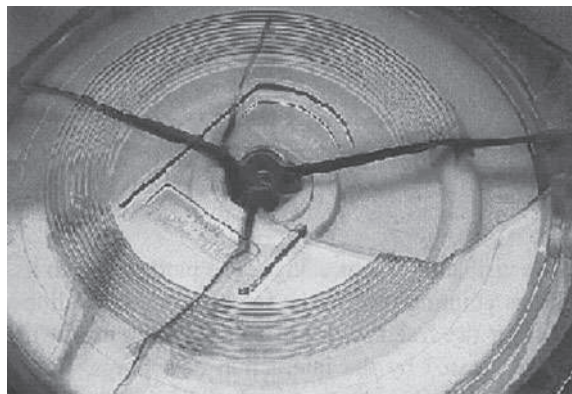


Рис. 15.40. Ветвление трещин (с разрешения *Eastman Chemical Company*)

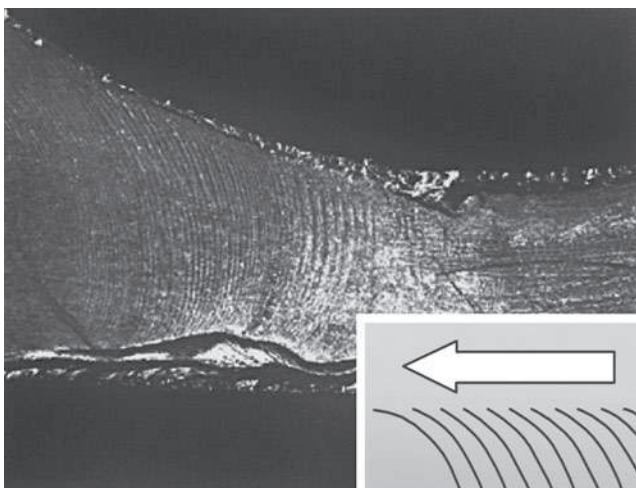


Рис. 15.41. Картина поверхности разлома с образованием волнообразной структуры (с разрешения *Eastman Chemical Company*)

Пример поверхности разлома с образовавшимися линиями Валнера показан на рис. 15.42, где также видна область образования очага разрушения.

На рис. 15.43 показана система бороздок, образовавшихся вследствие усталостного разрушения ручки задвижки, изготовленной из поликарбоната.

15.3.9. Моделирование условий применения

Во многих случаях для выявления причин разрушения оказывается необходимым поставить деталь, аналогичную разрушенной, в те же самые условия, при которых эксплуатировалась испытуемая деталь. Это касается воздействия химических агентов или факторов окружающей среды. Такой метод моделирования позволяет получить ценную информацию относительно причин разрушения.

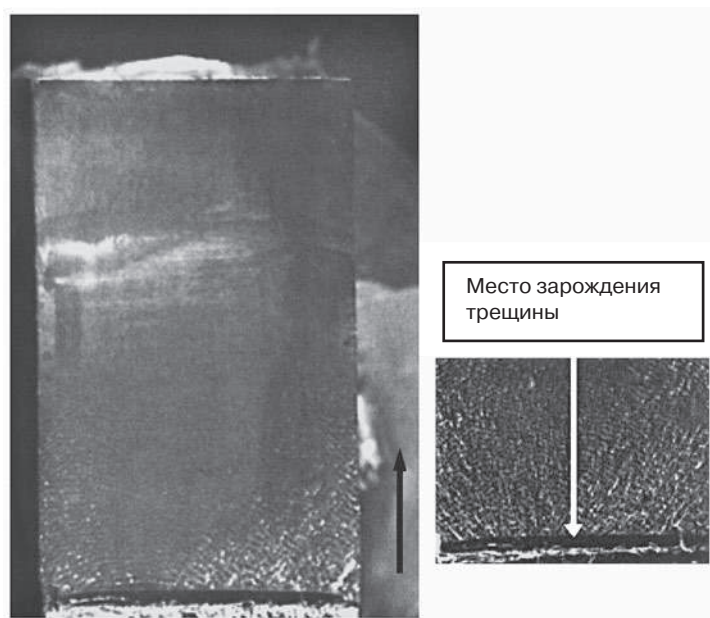


Рис. 15.42. Линии Валнера и очаг разрушения (с разрешения *Eastman Chemical Company*)

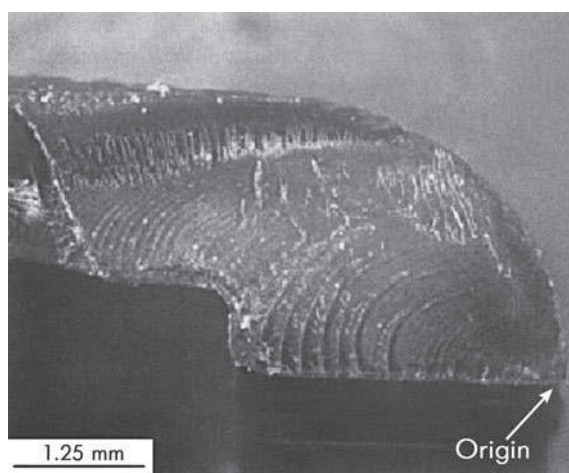


Рис. 15.43. Бороздки на поверхности разлома, возникшие вследствие усталостного разрушения ручки задвижки, изготовленной из поликарбоната (с разрешения *IMR Test Lab.*)

15.4. Пример оформления протокола анализа разрушения изделия

А. Введение

В жилом комплексе произошло неожиданное разрушение сточных и дренажных труб, изготовленных из АБС-пластика. Выход их строя труб выразился в образовании трещины по окружности на стыке трубы и соединительной муфты вдоль края уплотнения. Было выполнено исследование для установления причин разрушения.

Настоящий доклад представляет результаты этого исследования.

Б. Методика

В объем исследования входит визуальный осмотр трубы и фитинга, определение соответствия показателей свойств исследуемых труб требованиям стандарта *ASTM D2661* («Требования, предъявляемые к дренажным и сточным трубам из АБС-пластика, тип 40»), а также самого материала требованиям стандарта *ASTM D1788* («Требования, предъявляемые к жесткому АБС-пластику»). Для того чтобы оценить качество использованного материала, из трубы вырезали кусочки, которые спрессовывали в пластинки. Поскольку малое количество доступного материала исключало возможность приготовления образцов методом литья под давлением, их получали компрессионным формованием.

При испытаниях материала определяли: теплостойкость под нагрузкой (согласно *ASTM D648*), ударную прочность по Изоду (согласно *ASTM D256*), предел прочности и относительное удлинение при разрыве (согласно *ASTM D638*) и удельный вес (согласно *ASTM D792*).

Кроме того, дополнительно измеряли индекс текучести (согласно *ASTM D1238*), а также температуры переходов методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Остаточное содержание мономера определяли методом Фурье-инфракрасной спектроскопии, используя 100 сканов. Морфологические исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа.

В. Результаты и их обсуждение

Все визуально обнаруженные случаи разрушения, равно как и случаи, о которых было сообщено, происходили вследствие образования трещины по окружности трубы в месте ее стыка с соединительной муфтой по краю уплотнения. Характер разрушений указывает, что их первопричиной было взаимодействие полимера, находящегося под действием напряжений, с растворителем, который выделялся из уплотнения.

Было установлено, что труба не отвечала требованиям *ASTM D2661*. Наименьшая толщина трубы и величина наружного диаметра в некоторых случаях были меньше нижнего допустимого предела. Жесткость всех образцов несколько превышала минимальные требования, но гладкость поверхности труб не соответствовала требованиям стандарта. Во всех случаях образцы не выдерживали испытаний на ударную нагрузку.

Таким образом, проведенные испытания показали, что свойства труб не отвечают требованиям стандарта *ASTM D2661*. Ни один образец не обладал достаточной ударной прочностью. Теплостойкость под нагрузкой и предел прочности (в пределе

текучести) были выше минимальных требуемых значений. Удельный вес всех испытанных материалов был выше, чем контрольного образца. Это явилось следствием наличия пигмента и иных посторонних включений, которые не должны были присутствовать в исходном сырье. В одном из образцов было обнаружено присутствие металлических частиц. Эти выводы также подтверждаются анализом зольности, которая была выше, чем у контрольного образца.

Значения показателя текучести расплава были значительно выше, чем у контрольного образца. Завышенные значения этого показателя свидетельствуют о низком молекулярном весе материала, что, возможно, было связано с использованием при переработке чрезмерно большой доли вторичного полимера. Содержание мономера колебалось от образца к образцу, что также свидетельствует о том, что в процессе переработки не использовалось свежее сырье.

Тщательное исследование одного из образцов показало, что в материале имелись три различных слоя. Наружный и внутренний слои были изготовлены из одного и того же материала, а средний слой — из другого материала. Для более детального исследования этих слоев были применены методы Фурье-инфракрасной спектроскопии и электронной микроскопии. Оказалось, что инфракрасные спектры обоих крайних слоев значительно отличаются от спектра центрального слоя, и это различие связано с различным содержанием мономера. В материале, образующем центральный слой, также содержалось большое количество посторонних включений. Методом электронной микроскопии были получены аналогичные результаты.

Г. Выводы

Природа разрушения указывает на то, что оно явилось результатом образования трещин вследствие воздействия растворителя на полимер. Это явление было четко установлено, хотя детальный механизм процесса остался не выявленным. Такой тип разрушения не свойственен трубам из АБС-пластика, изготовленным с применением свежего сырья, отвечающего необходимым требованиям. Непосредственной причиной разрушения явилось использование вторичного полимера, что противоречит требованиям стандарта *ASTM*. Фактором, который ответственен за недостаточную стойкость к воздействию растворителя, явились неудовлетворительный характер распределения эластомерных частиц в материале, а также его низкая молекулярная масса.

Д. Заключение

Разрушение труб явилось следствием воздействия растворителя, содержащегося в уплотнении, на АБС-пластик, использованный для изготовления труб.

Стойкость материала, использованного для изготовления труб, к воздействию растворителя, была ниже, чем у труб, изготовленных из качественного сырья.

Пониженное сопротивление воздействию растворителя было связано с тем, что использовался материал с низкой стойкостью к растворителю.

Использованные трубы из АБС-пластика по своим характеристикам не отвечали требованиям стандарта *ASTM D2661*, которым были промаркированы трубы.

Сырье, использованное для изготовления труб, не отвечало требованиям стандарта *ASTM D2661*.

Вполне вероятно ожидать дальнейшего разрушения труб.

Литература

1. Ogando J. «the Misunderstood Material» *Design News* (Feb. 2004).
2. Computer Aided Material Preselection by Uniform Standards, www.campusplastics.com
3. The Plastics Web, www.ides.com
4. Tobin W. *Plastics Design Forum* (Jan./Feb. 1997), p. 48.
5. Plastics Pipe Institute, Technical Report, TR-21 «Thermal Expansion and Contraction in Plastic Piping System».
6. Malloy R. *Plastic Part Design for Injection Molding*, Hanser Publications, Inc., Cincinnati, OH, 1994, p. 125–130.
7. Mehta K.S. «Designing Premature Failure Out of Injection Molded Parts» *SPE ANTEC*, 38 (1992).
8. Mehta K.S. «Pandora's Medical Device—A Systematic Approach to Identify and Correct Part Design Problems» *SPE, Plastics South Conference Proceedings* (1986).
9. «Polymer Degradation» Article ID: 171, <http://www.azom.com>
10. «Plastics Product Failure» *Cycle Time Tips*, Vol. 11, Ashland, Inc., 2005.
11. Martes S. «Why Dry? Why Brittle?» *Cycle Time Tips*, Vol. 33, Ashland, Inc.
12. Ezrin M. *Plastics Failure Guide: Causes and Prevention*, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, OH, 1996, p. 154.
13. Miller, p. 29.
14. Ibid, p. 32.
15. IMR test Lab article, www.imrtest.com
16. Basdekis C.H. *ABS Plastics*, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1964, p. 22.
17. «Technical Tidbits» *Bruch Wellman*, 2(6), June 2000.
18. «Failure Mode of Plastics» www.zeusinc.com
19. «Introduction to Thermal Degradation» Zeus polymer minute, www.zeusinc.com
20. Jansen J. «The Plastic Killer» *Adv. Mater. Processes* (June 2004), p. 50.
21. Wright D. *Failure of Plastics and Rubber Products*, Rapra Technology Ltd., Shropshire, UK, 2001, p. 221.
22. Vogt J.P. «Testing of Mechanical Integrity Assures Service Life of Plastics Parts» *Plastics Design & Processing* (March 1976), p. 13.
23. Mehta K.S. «Experimental Stress Analysis for Molded Parts» *SPE ANTEC* (1986).
24. Corby T.W. and Redner A. «How to Use Experimental Stress Analysis» *Plastics Design Forum* (Jan./Feb. 1981).
25. *Fundamentals of Polariscope and Polarimeters*, Powerpoint Presentation, Strainoptics Technologies, Inc.
26. *Introduction to Stress Analysis by the Photoelastic Coating Technique*, Technical Bulletin IDCA-I, Photoelastic Division, Vishay Intertechnology, Inc.
27. *Reflection Polariscope*, Technical Bulletin S-103-A, Photoelastic Division, Vishay Intertechnology, Inc.

28. Hollman J.P. *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York, 1971, p. 333–334.
29. Dally J.W. and Riley W.E. *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1965.
30. Durelli A.J., Phillips E.A. and Tsao C.H. *Introduction to Theoretical and Experimental Analysis of Stress and Strain*, McGraw-Hill, New York, 1958.
31. Measurement Group, Technical Bulletin, Vishay Intertechnology, Inc.
32. «Polycarbonate: Testing for Chemical Resistance Under Stress» *Injection Molding*, April, 1996.
33. Vogt, Reference 27, p. 12.
34. Levy S. «Product Testing, Insurance Against Failure» *Plastics Design Forum* (July-Aug. 1984), p. 83.
35. Sessions M.L. *Microtoming, Engineering Design with Dupont Plastics*, E.I. Dupont Co., Wilmington, DE, 1977, p. 12.
36. Jansen J. «Plastic Component Failure Analysis» *Adv. Mater. Processes* (May 2001), p. 58.
37. «Thermal Analysis» Application Examples, Mattler-Toledo, Technical Literature.
38. Jansen, Reference 41, p. 59.
39. Jansen, Reference 41, p. 57.
40. Zamanzadeh M., Gibbon D. and Larkin E.A. *Reexamination of Failure Analysis*, MATCO Associates, Inc., Pittsburgh, PA, 2004.

Общие источники

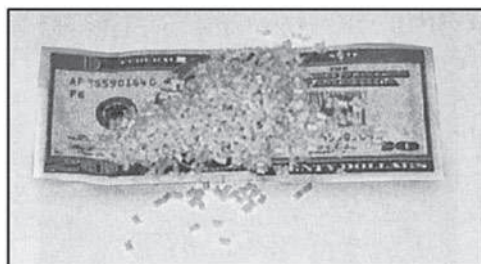
1. Dally J.W. and Riley W.F. *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1965.
2. Hetenyi M. *Handbook of Experimental Stress Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1950.
3. Kuske A. and Robertson G. *Photoelastic Stress Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 1974, p. 263–274.
4. Bell R.G. and Cook D.C. «Microtoming, an Emerging Tool for Analyzing Polymer Structures» *Plast. Eng.* (Aug. 1979), p. 18.
5. Frocht M.M. *Photoelasticity*, John Wiley & Sons, New York, 1941.
6. Leven M.M. *Photoelasticity*, Pergamon Press, New York, 1963.
7. GE Plastics. Technical Literature, www.geplastics.com

15.5. Примеры исследований

Ниже будут рассмотрены следующие исследования:

- Был ли использован поперечный полимер?
- Идентификация дефектов в изделиях, полученных литьем под давлением.
- Украденная рецептура
- Разрушение труб в системах водоснабжения
- Анализ причин разрушения труб, изготовленных из поливинилхлорида.
- Анализ причин разрушения корпуса фильтра для воды.

Разнообразные исследованные ситуации

Случай 1. Был ли использован поддельный полимер¹?

Описание ситуации

Компания *ABC* обратилась к компании *Polymer Solution Incorporated* с вопросом, существуют ли какие-либо различия между двумя образцами, изготовленными из полиацетата, и обозначаемыми как образец *A* и образец *B*. Материал, из которого был изготовлен образец *A*, был поставлен основным производителем этого полимера. Материал, из которого был изготовлен образец *B*, был предоставлен новым производителем, который предлагал свой материал как инновационную замену существующего полимера. Поставщик материала, из которого был изготовлен образец *B*, утверждал, что он разработал новый технологический процесс синтеза, и в связи с этим просил предоставить ему значительные инвестиции.

Основываясь на некоторых источниках информации, кредитные организации выражали серьезные сомнения в том, что действительно был получен новый полимер. Вместо этого высказывались подозрения, что на самом деле для изготовления образца *B* был использован тот же самый полимер, что и для образца *A*, который заново упаковали и представили как новый материал, полученный на пилотной установке.

Если образцы *A* и *B* были получены на различном оборудовании по разным технологическим схемам, то между ними должны были бы существовать определенные различия. Компанию *Polymer Solution Incorporated* просили сравнить химический состав обоих образцов, определить основные химические и физические свойства сопоставляемых образцов, и установить, может ли действительно материал, из которого изготовлен образец *B*, рассматриваться как новый материал.

В результате испытаний было установлено, что никаких существенных различий между материалами, из которых изготовлены образцы *A* и *B*, нет, так что речь идет о подделке.

Общий подход к анализу

Для того чтобы прийти к сформулированному выше выводу фирма *Polymer Solution Incorporated* использовали испытания для сравнения двух представленных образцов с помощью следующих методов:

¹ Описание этого случая было подготовлено J. Brooks, J. Todd и J. Rancourt из *Polymer Solution Incorporated*, Blacksburg, VA, 24060.

- реология расплавов;
- ядерно-магнитно резонансная спектроскопия;
- Фурье-инфракрасная спектроскопия;
- экстракция и анализ добавок;
- газовая хроматография.

Исследования реологических свойств двух сопоставляемых образцов полиацеталей были выполнены для получения зависимостей эффективной вязкости от скорости сдвига. Измерения выполняли на приборе AR-1000 (производства фирмы *TA Instruments*), который представляет собой ротационный прибор с параллельными плоскостями в измерительном узле, работающий в режиме контролируемых напряжений сдвига (рис. 15.1.1).

Повторно измеренные кривые течения обоих образцов представлены на рис. 15.1.2.

На кривых течения обнаруживается существование плато значений вязкости при скоростях сдвига ниже 1 с^{-1} , и область снижения эффективной вязкости, начинающаяся при скоростях сдвига порядка 5 с^{-1} .

Если говорить о значениях вязкости в области плато, точке перехода к области, в которой вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига, и угле наклона кривой течения в этой области, то кривые течения обоих образцов, по крайней мере качественно, выглядят совершенно аналогично.

Количественное сравнение кривых течения было проведено с использованием модели Вильямсона. При этом определялись следующие два параметра: наибольшая ньютоновская вязкость, определяемая как величина эффективной вязкости,



Рис. 15.1.1. Прибор AR-1000 производства фирмы *TA Instruments* с контролируемыми напряжениями сдвига

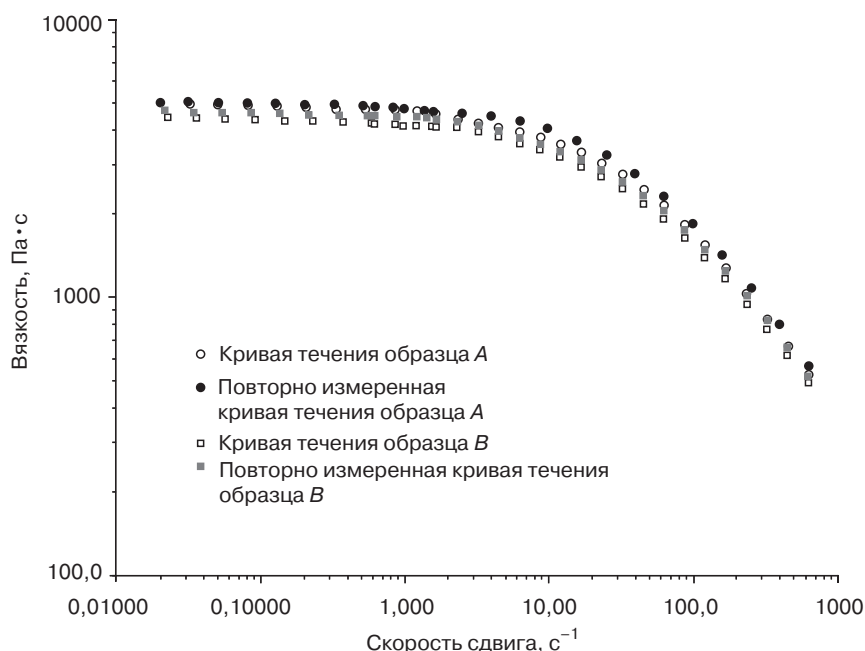


Рис. 15.1.2. Сравнение кривых течения образцов А и В при 190 °С

полученная экстраполяцией в области бесконечно малых скоростей сдвига, и «индекс скорости», который отвечал тангенсу угла наклона в области, в которой вязкость убывала с ростом скорости сдвига в области высоких скоростей. Эти два параметра очень чувствительны к различиям в характере молекулярно-вещного распределения полимеров.

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в табл. 15.1.1.

Как видно, различия в измеряемых параметрах сравниваемых образцов минимальны, и статистически эти различия несущественны.

Таблица 15.1.1. Параметры кривых течения сравниваемых образцов

	Вязкость при нулевой скорости сдвига, Па·с		«Индекс скорости»	
	Образец А	Образец В	Образец А	Образец В
Первый опыт	5000	4669	0,8261	0,7712
Повторный опыт	4863	4411	0,7912	0,7763
Среднее значение	4932	4540	0,8087	0,7738
Стандартное отклонение	97	182	0,0247	0,0036
<i>T</i> -тест	0,1156		0,1864	

Анализ концевых групп и молекулярных весов (применение метода ЯМР)

Исследуемые образцы без какой-либо дальнейшей обработки были растворены в дейтерированном диметилсульфоксиде при 150 °С. Результаты измерения протонных ЯМР-спектров представлены на рис. 15.1.3 и 15.1.4.

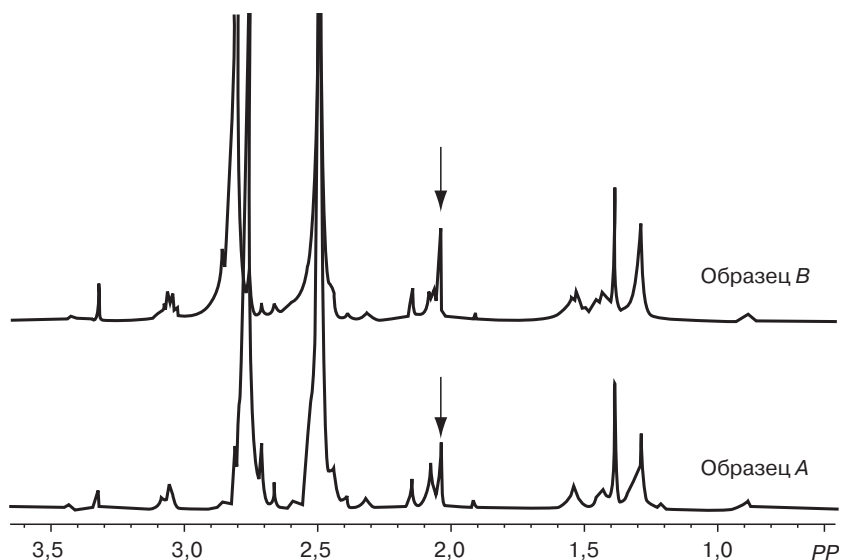


Рис. 15.1.3. ЯМР-спектры для двух сравниваемых образцов

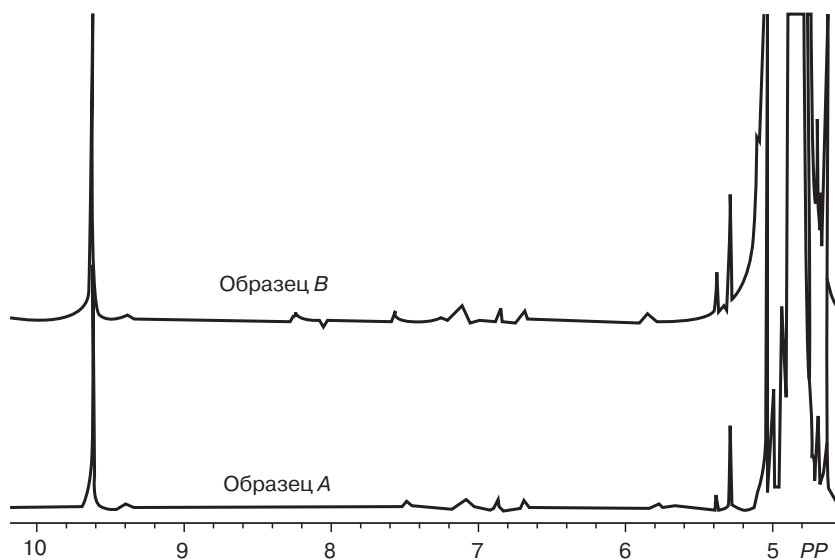


Рис. 15.1.4. ЯМР-спектры для двух сравниваемых образцов

Пики в спектрах, отмеченных на рис. 15.1.3 стрелками, обусловлены резонансом протонов в метильных группах, имеющих на концах полиацетальной цепи, в макромолекулах.

Среднечисловые значения молекулярных весов для обоих образцов были рассчитаны по площади под этими пиками, принимая, что в каждой полимерной цепи имеются по две концевые ацетатные группы. Рассчитанные значения среднечисловых молекулярных масс M_n и степени полимеризации DP_n приведены ниже:

Образец	DP_n	M_n , г/мол
<i>B</i>	3330	100 000
<i>A</i>	3200	96 000

Полученные значения средних молекулярных весов вполне соответствуют высковязкой марке полиацетала, используемой как инженерный пластик. Как видно, значения M_n и DP_n для сопоставляемых образцов не слишком сильно отличаются друг от друга. Различие в значениях молекулярного веса составляет всего 4%. Допустимая ошибка при использовании метода ЯМР для определения концентрации концевых групп составляет никак не меньше 4%.

Большое количество пиков, наблюдаемых в ЯМР-спектрах двух сравниваемых образцов, которые появляются от присутствия добавок и загрязнений, практически совпадают по их химическому сдвигу (положению по оси x) и величине (положению по оси y). Эти результаты являются сильным аргументом в пользу того, что состав добавок, используемых для обоих материалов, один и тот же или практически идентичен.

Максимум в спектре в области от 2,75 до 2,85 *ppm* (частей на миллион) обусловлен резонансом на протонах остатков растворителя (диметилсульфоксида), использованного для приготовления образцов, и никак не отражает различия в составах сопоставляемых полимеров. Из-за химического взаимодействия между растворителем и водой химический сдвиг, отвечающий диметилсульфоксиду, очень чувствителен к концентрации воды и температуре. Поэтому некоторое различие в положении этого пика на двух спектрах, скорее всего, объясняется слабой разницей в концентрации воды или небольшими колебаниями температуры в процессе получения ЯМР-спектров. Присутствие воды, скорее всего, также ответственно, по крайней мере, частично, за широкий максимум в области от 4,8 до 5,9 *ppm*.

Фурье-инфракрасный анализ прессованных полимерных пленок (рис. 15.1.5)

Из полученных для испытаний образцов путем прессования при 190 °С между двумя хромированными стальными пластинками были получены пленки. Толщина пленок составляла около 0,25 мм. Эти пленки анализировались методом Фурье-инфракрасной спектроскопии.

Основные полосы поглощения в инфракрасном диапазоне не вошли в рассматриваемый диапазон частот, поскольку использовались относительно толстые пленки. Основной интерес, однако, представляют вторичные полосы поглощения, которые со-

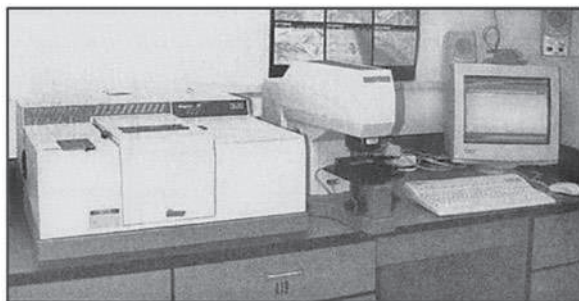


Рис. 15.1.5. Фурье-инфракрасный спектрометр

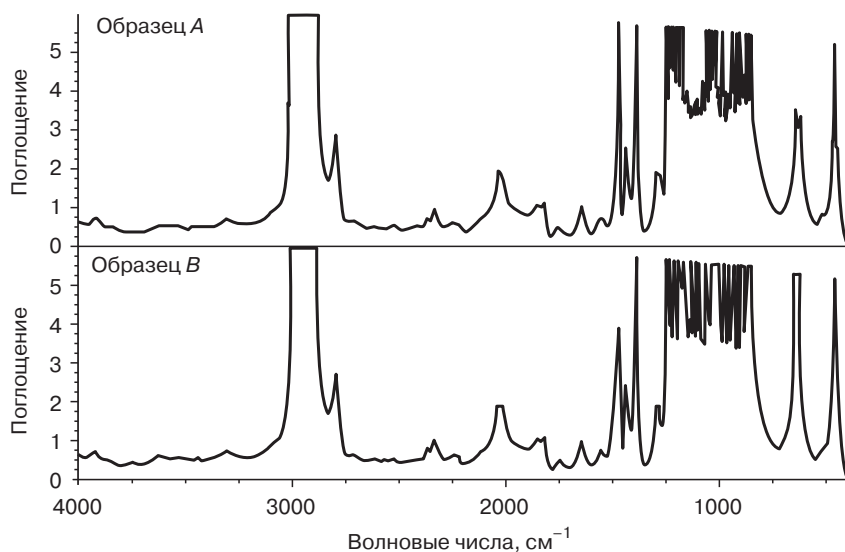


Рис. 15.1.6. Инфракрасные спектры сопоставляемых образцов

держат информацию относительно типа и концентрации добавок в композиции. Если наложить два спектра, представленные на рис. 15.1.6, как это сделано на рис. 15.1.7, то можно увидеть, что спектры практически точно совпадают между собой.

Этот результат является очень сильным подтверждением, что пакет добавок, использованный в образцах *А* и *В* один и тот же.

Экстракция и анализ добавок

Образцы *А* и *В* растворили в кипящем этиленгликоле (при 200 °С) и затем высадили тетрагидрофураном. При этом сформировался осадок чистого полимера в виде геля. Эта методика позволила очень полно выделить все введенные в полимер добавки. Полученный экстракт в смеси этиленгликоль/тетрагидрофуран профильтровали через мембранный фильтр с размером пор 0,2 мкм. Профильтрованный экстракт поместили на стеклянной подложке в печь при 130 °С и выдержали в ней до образования пленки.

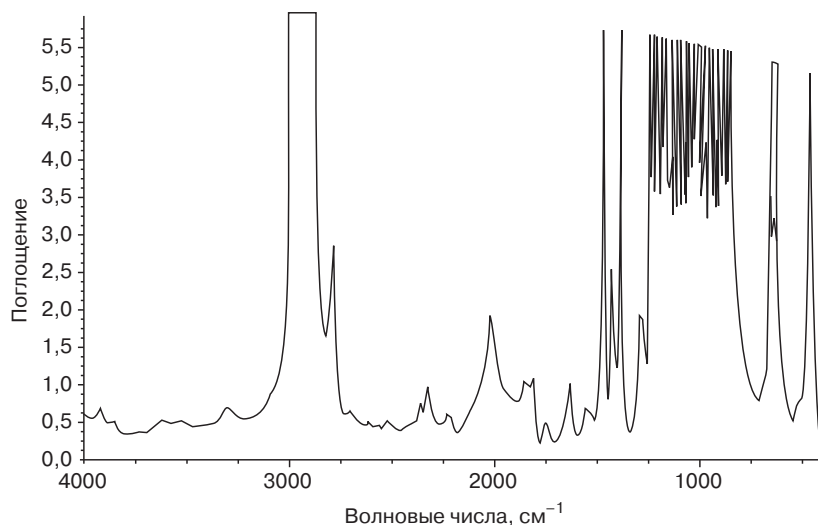


Рис. 15.1.7. Фурье-инфракрасный спектр поглощения

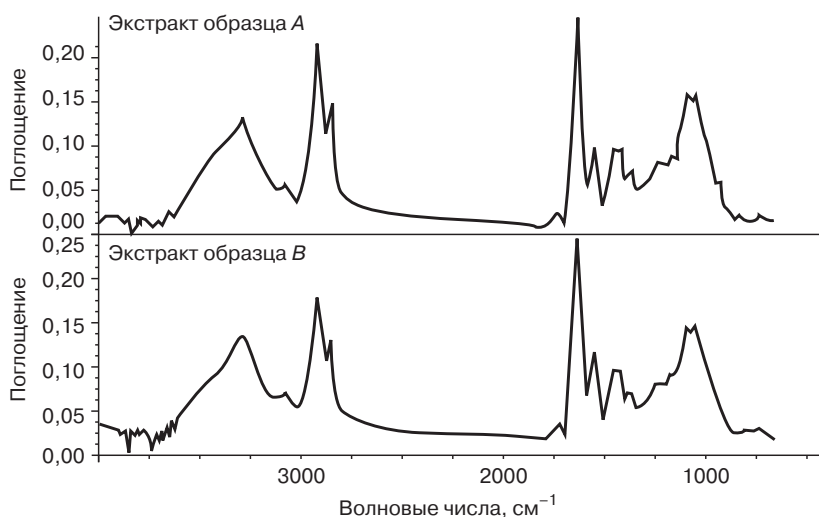


Рис. 15.1.8. ATR-FTIR спектры фильтрованных экстрактов

Эту пленку исследовали методом ослабленной Фурье-инфракрасной спектроскопии в отраженных лучах (*Attenuated Total Reflectance Fourier-transform infrared Spectroscopy, ATR-FTIR*). Полученные этим методом спектры показаны на рис. 15.1.8, а их наложение для двух сопоставляемых образцов представлено на рис. 15.1.9.

Как видим, положение полос поглощения (по шкале x) и их высота (по шкале y) в ATR-FTIR спектрах для обоих экстрактов практически идентичны. Эти результаты спектрального анализа дают убедительное свидетельство того, что пакет добавок в обеих композициях был одним и тем же.

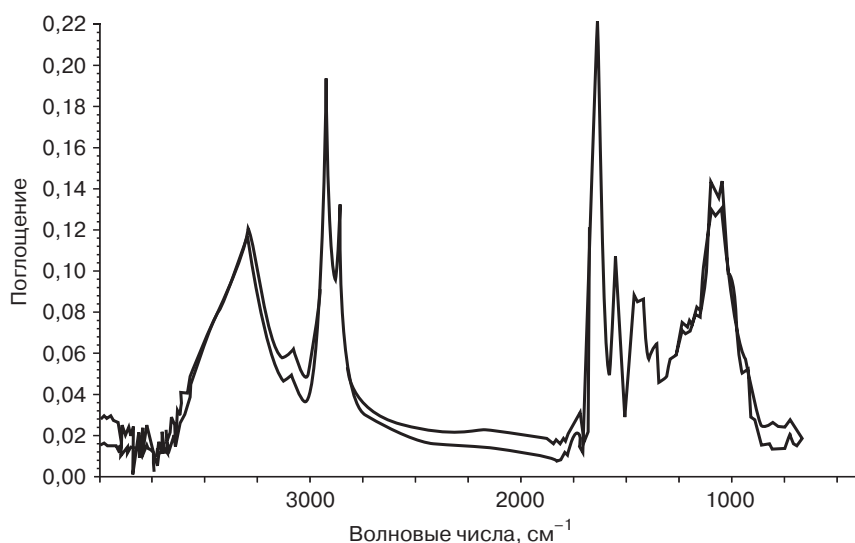


Рис. 15.1.9. Наложение спектров двух сопоставляемых образцов

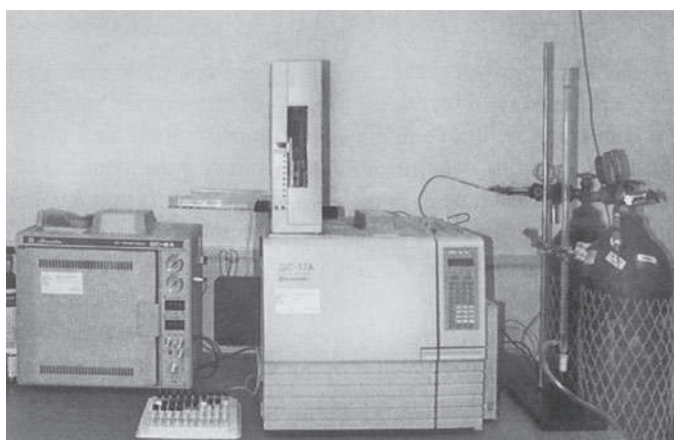


Рис. 15.1.10. Газовый хроматограф

Далее экстракты из обоих образцов были исследованы методом газовой хроматографии с использованием неполярных газохроматографических колонок (рис. 15.1.10).

Основной стабилизатор, добавляемый в полимер, недостаточно летучий, и не определяется методом газовой хроматографии. Однако газовая хроматография является наиболее чувствительным методом для определения малых добавок.

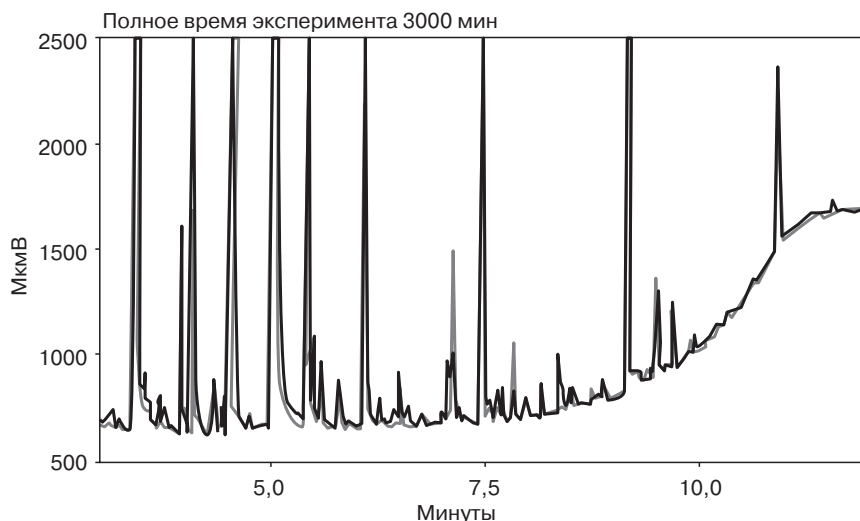


Рис. 15.1.11. Хроматограммы двух сопоставляемых образцов, полученные методом газовой хроматографии экстрактов

На рис. 15.1.11 представлены наложенные друг на друга хроматограммы экстрактов двух сопоставляемых полимеров.

Как видно из сравнения хроматограмм, основные пики для обоих экстрактов оказались вполне идентичными. Газовые хроматограммы представляют собой химические «отпечатки пальцев» исследованных образцов. Каждый компонент, присутствовавший в материале, в данной колонке при выбранных условиях эксперимента элюируется за строго определенное время. Даже если не знать, какова химическая природа вещества, проявляющегося в виде отдельных пиков, всегда можно утверждать, одинаковы или различны эти вещества. Например, использование газохроматографического анализа в судебной практике позволяет проследить за происхождением материала, найденного на месте преступления.

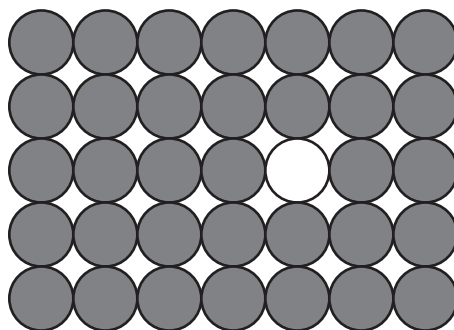
И мошенничество безусловно является преступлением!

Можно видеть, что существуют небольшие различия в высоте пиков обоих экстрактов, но абсолютное большинство пиков, появляющихся в образце *В*, присутствуют и в образце *А*. Эти пики связаны с наличием остатков инициатора или других загрязнений, находившихся в аппарате в процессе полимеризации, а также добавок и загрязнений в самих добавках, следов деструкции полимера, загрязнений в использованных растворителях или в лабораторной посуде. Процесс экстракции из обоих полимеров проводился параллельно. При этом использовалась одна и та же посуда. Тот факт, что одни и те же пики появились в хроматограммах обоих полимеров, ясно указывает на их идентичность, вплоть до мельчайших следов добавок и загрязнений. Все это убедительно свидетельствует о том, что оба образца имеют одно и то же происхождение, или же были произведены по одному и тому же процессу с использованием одних и тех же исходных материалов и добавок, которые, в свою очередь, имеют один и тот же источник происхождения.

Заключение

Полученный набор экспериментальных данных приводит к заключению, что образцы *A* и *B* неразличимы. Таким образом, так называемый «новый технологический процесс» сводился к переупаковке обычных партий полиацеталей, которые производятся в больших количествах хорошо известным производителем этой продукции.

Случай 2. Идентификация дефектов в изделиях, полученных литьем под давлением¹



Компания *Polymer Solution Incorporated* получила для исследования изделие из кремнийорганической смолы медицинского назначения, в котором на крыше появилось небольшая обесцвеченная область. Представляло интерес выяснить состав этого пятна, чтобы определить причины его появления. Испытания показали, что это пятно образовано сплавом кобальта, хрома и молибдена, погруженного в силиконовую матрицу. Этот сплав использовался в параллельном процессе, осуществлявшемся на том же производстве, и в данном случае попал в изделие как загрязнение.

Общий подход к анализу

Для того чтобы прийти к сформулированному выше заключению, компания *Polymer Solution Incorporated* использовала два экспериментальных метода:

- оптическую микроскопию;
- сканирующую электронную микроскопию (рис. 15.2.0), дополнительно укомплектованную спектро스코пом по анализу распределения энергии.

Прежде всего, с помощью оптического микроскопа дефект был рассмотрен и описан. Место расположения загрязнения заключено в белый овал (рис. 15.2.1).

Для того чтобы охарактеризовать область, в которой было обнаружено загрязнение, был использован сканирующий электронный микроскоп, снабженный приставкой для спектроскопии с разделением по энергии электронов. Этот аналитический метод идеально подходит для определения неорганических веществ, особенно если они находятся в пределах небольшой области. При сканировании пучком электронов удается резко повысить разрешающую способность наблюдения, а определение

¹ Описание этого случая было подготовлено В. Startt и J. Rancourt из *Polymer Solution Incorporated*, Blacksburg, VA, 24060.

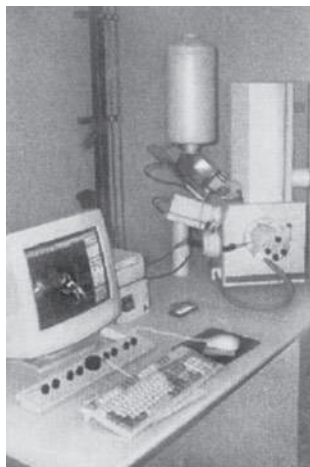


Рис. 15.2.0. Сканирующий электронный микроскоп

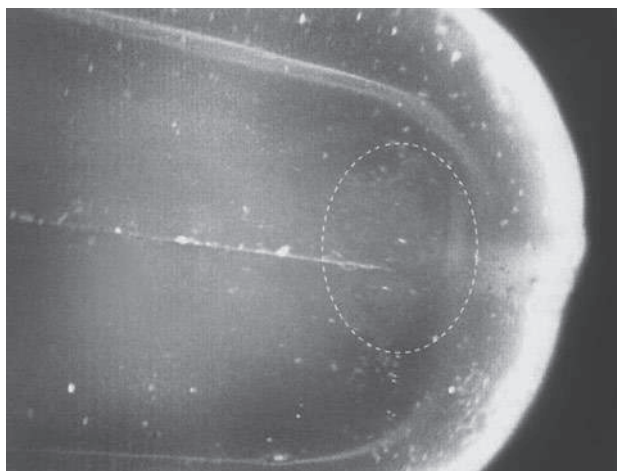


Рис. 15.2.1. Оптическая микрофотография верхней части детали, в которой овалом показано место расположения загрязнения (увеличение $\times 32$)

энергетического спектра дает полную информацию о присутствии тех или иных химических элементов. Можно даже построить карту распределения химических элементов в исследуемой области.

Образец был исследован с помощью сканирующего электронного микроскопа (см. рис. 15.2.0). Электронный спектр, определенной для области, в которой нет загрязнений, показан на рис. 15.2.2. Как видим, в этой области нет иных элементов, кроме кремния, кислорода и алюминия. Наличие кремния и кислорода отражает химический состав полимера, а появление алюминия, по-видимому, связано с переносом частичек алюминия с камеры электронного микроскопа или подставки для образца.

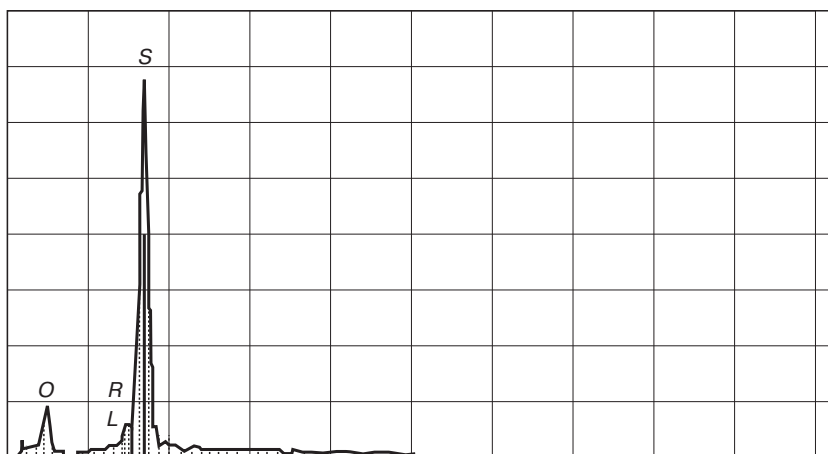


Рис. 15.2.2. Энергетический спектр, измеренный для области, в которой загрязнения отсутствуют

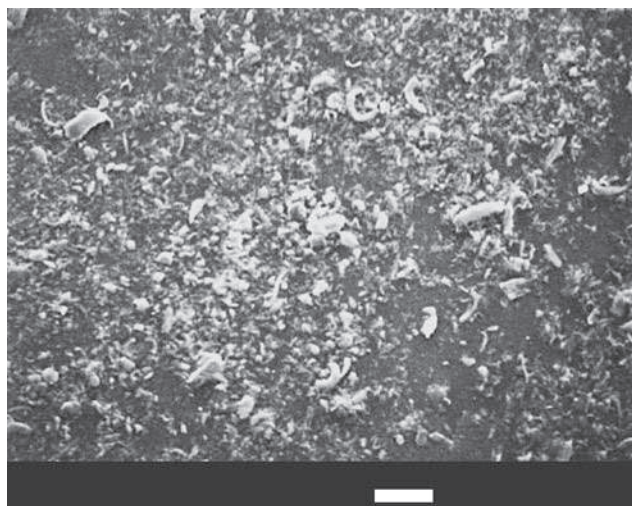


Рис. 15.2.3. Электронно-микроскопическая фотография области, в которой присутствуют посторонние включения (увеличение $\times 500$)

Электронно-микроскопический снимок области, в которой были обнаружены примеси, показан на рис. 15.2.3. Здесь видно множество белых точек, внедренных в поверхность изделия.

Результаты измерения энергетического спектра обширной области, в которой были обнаружены загрязнения, представлены на рис. 15.2.4. Анализ указал на присутствие в этой области атомов кремния, кислорода, алюминия, кобальта, хрома и молибдена.

Далее, одна посторонняя частичка была изолирована и исследована отдельно. Используемый прибор позволяет локализовать область исследования, ограничив

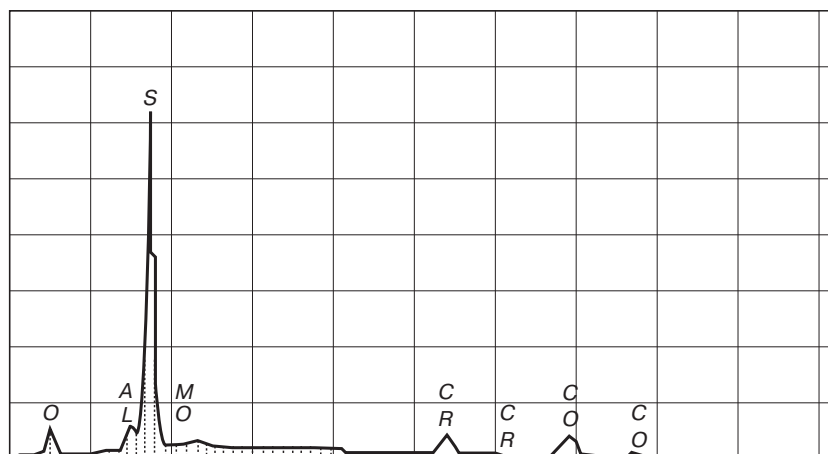


Рис. 15.2.4. Электронный спектр, полученный при исследовании обширной области, содержащей посторонние включения

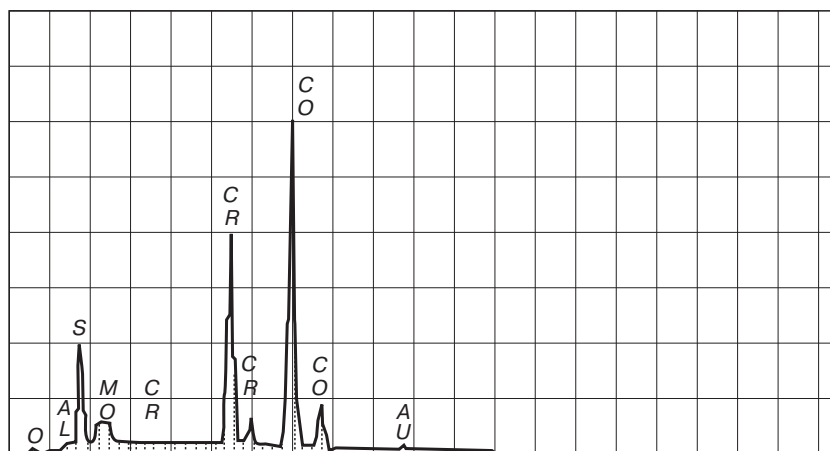


Рис. 15.2.5. Электронный спектр, полученный при исследовании индивидуальных частиц включений

ее очень небольшой областью на поверхности изделия. Такой метод исследования показал, что в посторонних включениях присутствуют кобальт, хром и молибден в гораздо более высоких концентрациях (рис. 15.2.5), чем это было установлено при анализе широкой области (рис. 15.2.4).

Иллюстрацией распределения химических элементов по сканируемой поверхности образца служит карта, относящаяся к области, содержащей посторонние включения. Электронная микрофотография этой области представлена на рис. 15.2.6, а карта распределения химических элементов для той же области, к которой относится микрофотография на рис. 15.2.6, показана на рис. 15.2.7. Из этого рисунка становится понятно, что посторонние включения в кремнийорганической матрице состоят из кобальта, хрома и молибдена.

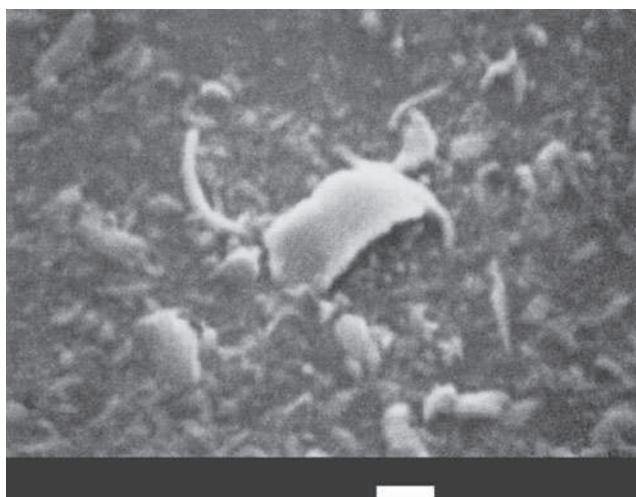
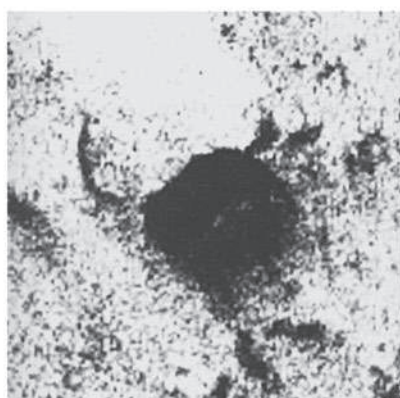
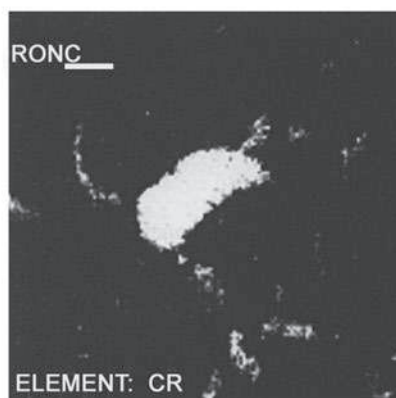


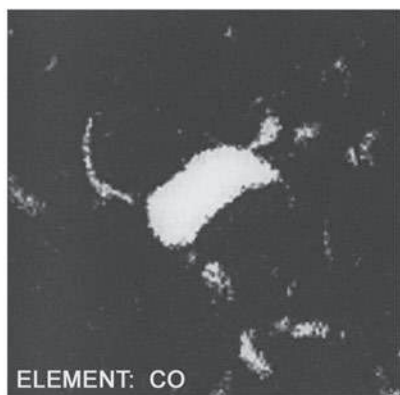
Рис. 15.2.6. Электронная микрофотография области, содержащей постороннее включение (увеличение $\times 2000$)



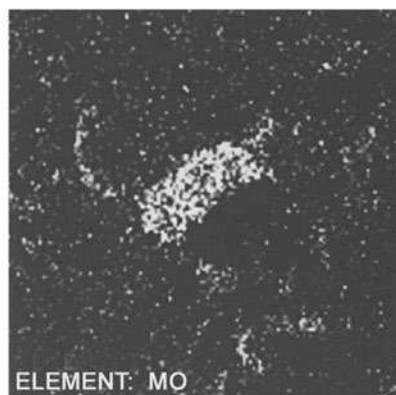
Кремний



Хром



Кобальт



Молибден

Рис. 15.2.7. Карта распределения химических элементов для области, представленной на рис. 15.2.6

Таблица 15.2.1. Атомные концентрации (в %) обнаруженных химических элементов

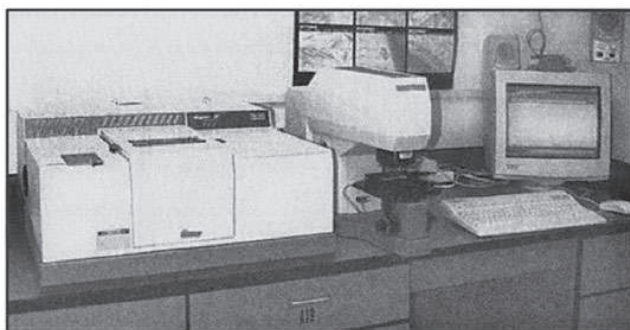
Химический элемент	В спектре сравнения	В посторонней частице
Кремний	30,66	25,68
Кислород	66,36	0,76
Алюминий	2,99	2,29
Кобальт	НО ^а	45,22
Хром	НО ^а	20,44
Молибден	НО ^а	5,60

^а НО — не обнаружено.

Распределение этих трех элементов в посторонних частицах соответствует составу сплава из кобальта, хрома и молибдена.

В табл. 15.2.1 представлены количественные результаты анализа атомного содержания каждого из указанных химических элементов в чистой поверхности и в постороннем включении.

Случай 3. Украденная рецептура¹



Бывший сотрудник компании *A* после увольнения организовал свою собственную компанию (компанию *B*) и организовал у себя производство специального покрытия. Компания *A*, однако, заподозрила, что в действительности ее бывший сотрудник украл рецептуру покрытия, принадлежащую фирме *A*. К компании *Polymer Solution Incorporated* обратились с поручением проанализировать и сравнить состав покрытий, выпускаемых фирмой *A* и новой фирмой *B* с тем, чтобы объективно решить идентичны или различны эти составы.

После детального анализа фирма *Polymer Solution Incorporated* пришла к выводу, что степень подобия использованных рецептов столь высокая, что, скорее всего, речь идет об одной и той же рецептуре. Случайное совпадение здесь совершенно невероятно.

¹ Описание этого случая было подготовлено J. Todd и J. Rancourt из *Polymer Solution Incorporated*, Blacksburg, VA, 24060.

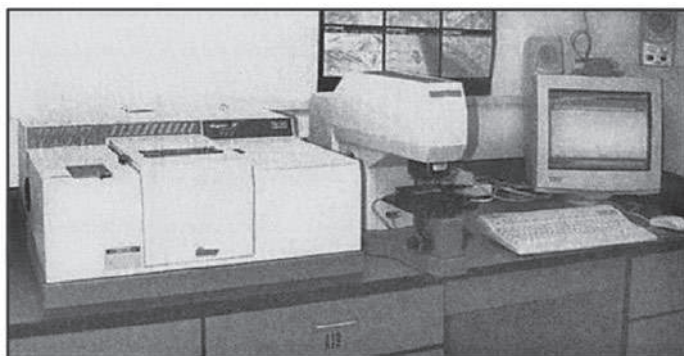


Рис. 15.3.0. Фурье-инфракрасный спектрометр

Общий подход к анализу

Для того чтобы убедиться в идентичности сравниваемых рецептов компания *Polymer Solution Incorporated* использовали следующие два метода:

- Фурье-инфракрасную спектроскопию (прибор показан на рис. 15.3.0);
- капиллярную газовую хроматографию.

Было взято примерно 19 мл каждого образца покрытия. Образцы поместили в стеклянные трубочки и подвергли центрифугированию, продолжавшемуся до тех пор, пока не начал отделяться твердый осадок, что позволило отделить твердые компоненты от жидкости, состав который представлял интерес для исследования. Частицы талька и кремния могли помешать определению инфракрасных спектров. Затем первые два миллилитра, очищенные от твердых включений, были изъяты из верхней части трубочек. Это процедура заняла приблизительно 15–20 мин.

Две-три капли жидкости из каждой трубочки были помещены на стеклянные подложки, используемые как предметные стекла в микроскопии. Эти образцы использовали для выполнения Фурье-инфракрасной спектроскопии сопоставляемых рецептов.

Приблизительно 40–50 мкл каждой жидкости, взятых из верхней части трубочек, налили в 2-мл стеклянный автоматический держатель образцов газового хроматографа и разбавили примерно 1,8 мл хлороформа.

Фурье-инфракрасная спектроскопия

Методом Фурье-преобразования были получены инфракрасные спектры сравниваемых образцов. Эти спектральные характеристики представляют собой индивидуальные «отпечатки пальцев» органических химических соединений или их смесей, которые выражены в форме набора пиков (максимумов поглощения), каждый со своей интенсивностью (по оси y) и положением по оси длин волн (по оси x). Каждый пик в спектре соответствует максимуму поглощенной энергии, соответствующему определенным химическим связям или функциональным группам. Для каждого химического соединения или смеси веществ характерны свои уникальные комбинации межатомных связей и составляющих их химических групп.

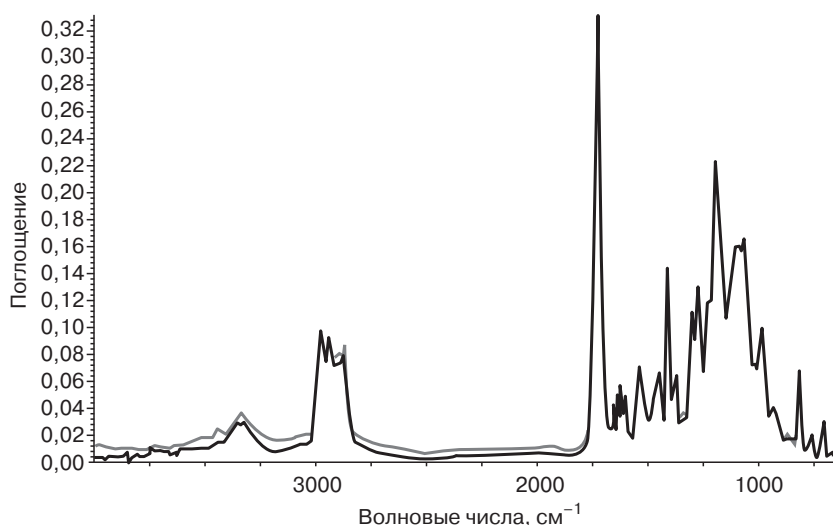


Рис. 15.3.1. Сопоставление инфракрасных спектров образца A1 при повторных измерениях

На рис. 15.3.1 представлены результаты повторного снятия спектра для образца A1. Как и ожидалось, рис. 15.3.1 ясно демонстрирует практическую идентичность спектров при повторных измерениях.

Сопоставление инфракрасных спектров образцов A1 и B1 показано на рис. 15.3.2.

Как видим, оба спектра практически одинаковы как по положению пиков в спектре (по оси x), так и по их интенсивности (по оси y). Совпадение положения пиков по оси x является убедительным свидетельством в пользу того, что обе сравнивае-

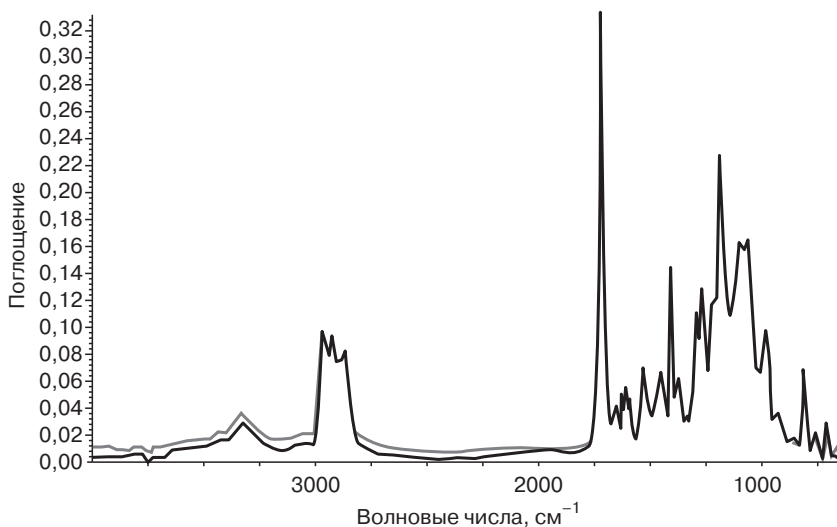


Рис. 15.3.2. Сравнение инфракрасных спектров образцов A1 и B1

мые рецептуры одинаковы. Одинаковая высота пиков по оси *y* говорит о том, что и концентрации компонент в обеих рецептурах одинаковы. Если бы концентрации компонент были различными, это безусловно привело бы в разнице высоты пиков инфракрасных спектров на рис. 15.3.2. Незначительное различие спектров может быть следствием: 1) некоторого слабого различия в составах исследуемых композиций; 2) неточностью измерений, обусловленной возможными ошибками используемой экспериментальной техники.

Полученные инфракрасные спектры могут быть сопоставлены со спектрами, имеющимися в библиотеке данных для сходных рецептур. Для сравнения различных спектров были предложены различные количественные алгоритмы. Эти алгоритмы сравнения основаны на сопоставлении интенсивностей наблюдаемых пиков. Алгоритмы такого рода наиболее часто используют для поисков в библиотеке спектров, наиболее близких к полученному экспериментально. Их применение указывает на меру относительной схожести различных спектров. Чем выше показатель подобия, тем ближе сравниваемые спектры. Оценка в 100 единиц указывает на полную идентичность спектров.

Для сопоставления спектров были взяты четыре образца от каждой рецептуры. И для каждого из них были выполнены дублирующие измерения. Таким образом, было получено восемь спектров, которые были собраны в специальной библиотеке. Далее был применен алгоритм, устанавливающий степень подобия сопоставляемых восьми спектров. Результаты такого анализа представлены в табл. 15.3.1. Чем ниже показатель подобия, тем менее подобны два спектра. Вообще говоря, значения показателя подобия 90 и выше считаются хорошим подтверждением идентичности спектров.

Во всех исследованных случаях были получены значения показателя подобия спектров между 96,97 и 100. Значения показателя 100 отвечают случаю полного совпадения спектров, что может быть только в том случае, если спектр сравнивается сам с собой. Наиболее высокие значения показателя подобия были получены для спектров, полученных при повторных измерениях одного и того же образца. Это имело место для образцов *A2*, *B1* и *B2*. При сравнении образцов *A1* и *B1* оказалось, что показатель подобия между ними даже выше, чем при дублирующих измерениях спектра одного и того же образца. Другими словами, спектры для этих образцов оказались даже более близкими, чем при повторных измерениях спектра одного и

Таблица 15.3.1. Показатели подобия инфракрасных спектров, полученных в результате повторных измерений одного и того же образца и спектров сравниваемых образцов

	<i>A1</i> (1)	<i>A1</i> (2)	<i>A2</i> (1)	<i>A2</i> (2)	<i>B1</i> (1)	<i>B1</i> (2)	<i>B2</i> (1)	<i>B2</i> (2)
<i>A1</i> (1)	100,0	98,01	97,73	96,97	99,02	98,85	97,79	97,69
<i>A1</i> (2)		100,0	97,65	97,90	99,23	99,30	97,85	97,95
<i>A2</i> (1)			100,0	99,61	98,37	98,33	99,73	99,74
<i>A2</i> (2)				100,0	98,26	98,36	99,58	99,69
<i>B1</i> (1)					100,0	99,68	98,53	98,57
<i>B1</i> (2)						100,0	98,52	98,56
<i>B2</i> (1)							100,0	99,78
<i>B2</i> (2)								100,0

того же образца. Показатель подобия спектров образов *A1* и *B1* лежит между 98,85 и 99,30. Конечно, это очень высокая степень совпадения спектров. Все это означает, что существует полная идентичность рецептур образов *A1* и *B1*.

Газовая хроматография

Четыре образца покрытия были проанализированы методом газовой хроматографии на капиллярных колонках. Метод газовой хроматографии основан на разделении летучих компонент смеси вследствие различной скорости их прохождения через колонку, в которую подается газовый поток. Капилляры в газовой хроматографии представляют собой очень длинные узкие трубки, при прохождении через которых обеспечивается очень хорошая степень разрешения химических компонент в смеси. Термин *разрешение* означает возможность установления отличия одного химического вещества от другого. Если два химических вещества проходят через газовую колонку за одно и то же время, то установить различие между ними не удастся. Если же для двух веществ требуется разное время их прохождения через колонку, то это и означает, что удастся осуществить разделение компонент. На выходе из колонки устанавливается детектор, который определяет концентрацию вещества, то есть его относительное содержание в смеси.

Каждому отдельному веществу, выходящему из колонки, отвечает свой пик со своим положением (временем задержки) по оси *x*, а высота этого пика по оси *y* пропорциональна концентрации этого компонента. Нелетучие компоненты не проходят через колонку.

Параметры процесса газохроматографического разделения приведены в табл. 15.3.2.

Образцы индивидуальных компонент, использованные компанией *A* при составлении технологической рецептуры, были предоставлены для исследования фирме *Polymer Solution Incorporation*. Список этих компонент и их сокращенные обозначения приведены в табл. 15.3.3.

Каждое из веществ, перечисленных в таблице, растворяли в хлороформе и пропускали через колонку с тем, чтобы установить времена задержки для каждого вещества из рецептуры, используемой для получения покрытий. Следует заметить, что

Таблица 15.3.2. Параметры процесса газохроматографии, использованные при анализе

Параметр	Значение
Использованный прибор	<i>Shimadzu GC-17A</i> с газопламенным ионизирующим детектором (<i>FID</i>)
Колонки	Капиллярные колонки <i>Restek Rtx-5</i> длина 15 м, диаметр 0,25 мм, толщина пленки 0,25 мкм
Температурный режим	Выдержка при 75 °C в течение 1 мин Нагревание до 300 °C со скоростью 15 °C в мин Выдержка при 300 °C в течение 9 мин
Технология подачи	Раздельная подача с коэффициентом 100:1
Объем образца	1 мкл

Таблица 15.3.3. Список индивидуальных компонент, использованных при создании рецептуры для формирования покрытий компанией А

Аббревиатура	Химическое срединение
AM1	Акриловый мономер 1
AM2	Акриловый мономер 2
AM3	Акриловый мономер 3
AM4	Акриловый мономер 4
AO	Акриловый олигомер
PI1	Фотоинициатор 1
PI2	Фотоинициатор 2
VM	Модификатор вязкости

олигомерный продукт *AO* и модификатор вязкости *VM* недостаточно летучи, чтобы их можно было исследовать методом газовой хроматографии. Однако в каждом из них присутствуют очень небольшие примеси летучих веществ, которые детектируются этим методом.

В табл. 15.3.3 не вошли частички кремнезема, покрытые воском, и добавки талька, поскольку они не растворимы ни в одном растворителе и, следовательно, не могут быть впрыснуты в колонку, так что их нельзя анализировать методом газовой хроматографии.

Хроматограммы двух сопоставляемых рецептур, используемых для получения покрытий, представлены на рис. 15.3.3 и 15.3.4 соответственно.

Область, относящаяся к первым пяти минутам хроматографирования, на этих рисунках не представлена, поскольку в этой области обнаруживается только пик, обусловленный присутствием хлороформа, который был использован как растворитель для исследуемых образцов. Аналогичным образом, не показана область, отвечающая

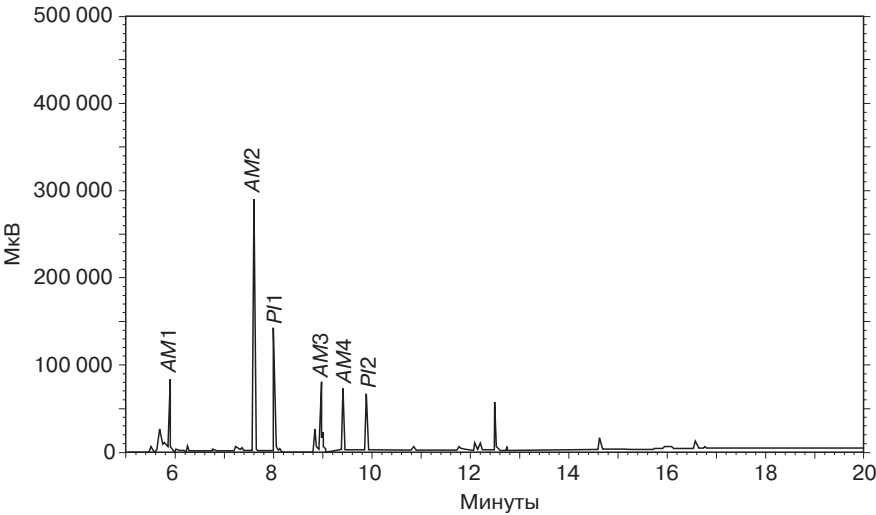


Рис. 15.3.3. Хроматограмма образца A1

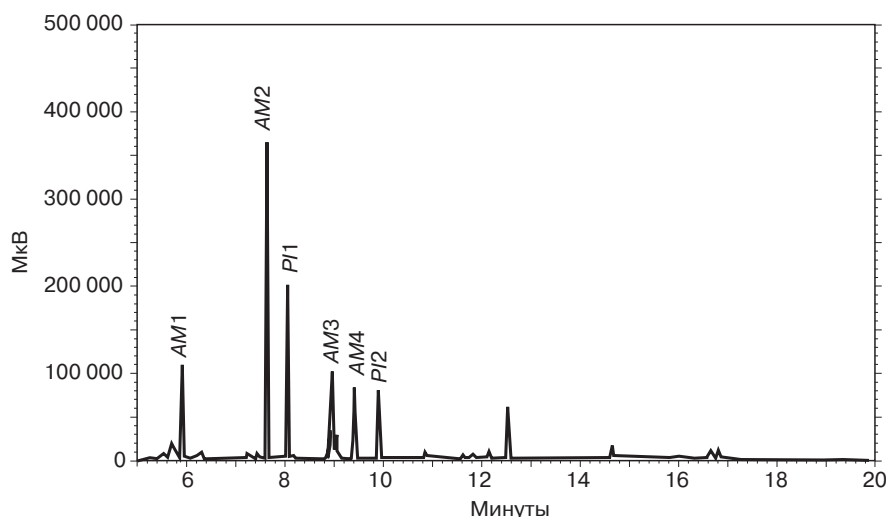


Рис. 15.3.4. Хроматограмма образца *B1*

последним пяти минутам, поскольку в этой области вообще нет заметных пиков. Пики, отвечающие основным компонентам, промаркированы на рис. 15.3.3 и 15.3.4.

Обе полученные хроматограммы очень похожи друг на друга в отношении как положения, так и относительной высоты пиков. Это указывает на то, что химические составы обеих рецептур практически совпадают. На хроматограммах детектируется примерно 31 пик. Эти пики относятся как к основным компонентам, перечисленным в табл. 15.3.3, так и к компонентам, присутствующим в рецептурах в минимальных количествах. Эти небольшие пики соответствуют загрязнениям, присутствующим в качестве добавок в основных компонентах рецептуры.

Концентрации всех компонент, подсчитанные как отношение площади под каждым пиком к суммарной площади под всеми пиками, приведены в табл. 15.3.4 для сопоставляемых образцов *A1* и *B1*.

Вообще говоря, каждый пик на хроматограмме отвечает индивидуальному химическому соединению. Тем не менее иногда два или более вещества характеризуются одним и тем же временем задержки, и в этом случае соответствующий пик образуется наложением нескольких веществ. Таким образом, 31 пик на хроматограмме отвечает, по крайней мере, 31 индивидуальному веществу. Из их числа 6 пиков отражают наличие основных компонент в рецептуре (они показаны жирным шрифтом). Что касается остальных пиков, характеристики которых показаны в таблице в скобках, то они относятся к загрязнениям и добавкам, которые содержатся в композициях в минимальных количествах.

Совершенно замечательным представляется совпадение содержания основных компонент в рецептурах *A* и *B*, причем совпадают и пики, соответствующие второстепенным компонентам.

Все это означает, что химический состав рецептур *A1* и *B1* практически идентичен.

Таблица 15.3.4. Сопоставление относительного содержания летучих компонент, содержащихся в образцах *A1* и *B1*, вычисленных по площади под соответствующими пиками хроматограмм.

Пик №	Идентификация пика или его происхождение	Время задержки, мин	Площадь под пиком, %	
			<i>A1</i>	<i>B1</i>
1	(<i>AM1</i>)	5,52	0,37	0,34
2	(<i>AO</i>)	5,70	6,05	5,64
3		5,79	0,41	0,00
4	<i>AM1</i>	5,91	7,04	7,15
5		6,20	0,15	0,00
6	(<i>AM1</i>)	6,26	0,31	0,63
7		6,78	0,00	0,00
8	(<i>AM3</i>)	7,25	0,47	0,31
9		7,29	0,36	0,30
10		7,40	0,45	0,63
11	<i>AM2</i>	7,63	29,00	30,50
12	<i>PI1</i>	8,05	13,15	14,25
13		8,16	0,25	0,37
14	<i>AM3</i>	8,96	15,04	15,72
15	(<i>VM</i>)	9,13	0,00	0,13
16	<i>AM4</i>	9,42	6,40	5,70
17	<i>PI2</i>	9,91	5,96	5,60
18	(<i>AM2</i>)	10,85	0,70	0,69
19		11,59	0,15	0,32
20	(<i>AM3</i>)	11,70	0,16	0,17
21	(<i>AM3</i>)	11,80	0,67	0,56
22	(<i>AM3</i>)	11,85	0,29	0,25
23		12,11	1,32	0,97
24	(<i>AM4</i>)	12,19	0,77	0,43
25	(<i>AO</i>)	12,53	5,68	4,69
26		12,76	0,25	0,00
27	(<i>AM2</i>)	14,61	1,59	1,31
28	(<i>AM3</i>)	16,00	1,19	1,01
29	(<i>AM4</i>)	16,57	1,21	1,12
30	(<i>AO</i>)	16,77	0,61	1,21
31		19,74	0,00	0,00
Итого:			100,00	100,00

Примечание. Цифры, выделенные жирным шрифтом, относятся к основным компонентам в исследуемых рецептурах. Величины в скобках отвечают примесям или загрязнениям, имеющимся в основных компонентах

Сопоставление содержание основных компонент в сравниваемых рецептурах дается в табл. 15.3.5.

Как видим, различие в площади под пиками для сопоставляемых образцов *A1* и *B1* составляет от 0,1 до 1,5%, что вновь демонстрирует полное подобие рецептур этих образцов.

Следует заметить, что метод газовой хроматографии не позволяет оценить относительное содержание нелетучих компонент в сравниваемых композициях.

Таблица 15.3.5. Сопоставление содержания основных компонент в образцах *A1* и *B1*, используемых для формования покрытий

Идентификация пика или его происхождения	Время задержки, мин	Площадь под пиком, проценты		Различие площади пиков, %
		<i>A1</i>	<i>B1</i>	
(AO)	5,70	6,0	5,6	0,4
AM1	5,91	7,0	7,2	–0,1
AM2	7,63	29,0	30,5	–1,5
PI1	8,05	13,2	14,2	–1,1
AM3	8,96	15,0	15,7	–0,7
AM4	9,42	6,4	5,7	0,7
PI2	9,91	6,0	5,6	0,4
(AO)	12,53	5,7	4,7	1,0

Случай 4. Разрушение труб, изготовленных из полимерных материалов, в системах водоснабжения¹

Краткое введение

Разрушение изделий из пластмасс, используемых в промышленности, домашнем хозяйстве и в коммерческих целях, представляет собой довольно частое явление. Во многих случаях это происходит в системах транспортировки воды, и это приводит к тяжелым последствиям. Разрушение может происходить из-за неправильного выбора материала, перегрузкам при эксплуатации или недостатков технологического процесса получения изделий. Следует также принимать во внимание такие факторы, как воздействие химических агентов, влияние окружающей среды, изменение температуры, старение материала.

О пластмассах

Уникальные свойства полимерных материалов сделали их в настоящее время одним из наиболее востребованных продуктов. Их низкий вес, легкость формования из них изделий, относительно низкая стоимость, жесткость или, напротив, гибкость, высокие изоляционные характеристики — вот только некоторые из свойств полимеров, которые позволили использовать их как новые материалы или как заменители существующих материалов. Такие изделия, как виниловая наружная отделка в строительстве, бутылки для воды, фильтры, корпуса компьютеров, поливинилхлоридные трубы, разовая упаковка, панели автомобилей, детали двигателей — вот только некоторые примеры изделий, которые с успехом изготавливаются из пластмасс.

Полимеры используются, наверное, уже целое тысячелетие. Индейцы Южной Америки использовали натуральный каучук для изготовления контейнеров для хранения воды и обуви. Благодаря созданию новых материалов и разработке оборудования для их переработки, за последние 50 лет создана мощная промышленность

¹ Описание этого случая было подготовлено Paul Gramann, Antoine Rios и Bruce Davis из *The Madison Group: PPRS, Madison, WI 53719*.

пластмасс. Почти каждый из нас может вспомнить о каком-либо изделии, которое раньше изготавливалось из металла или дерева, а теперь для этого используется пластмасса.

Разрушение пластмасс

Пластмассы представляют собой уникальные материалы, которые при одних условиях обладают пластичностью, а при небольших изменениях этих условий становятся хрупкими. Стандартный пример такого поведения — это «Силли-Путти» (*«Silly Putty»*). Если растягивать кусочек этого материала, то он может тянуться неограниченно долго (то есть ведет себя как пластичный материал). Однако если попытаться растягивать этот же кусочек быстро, то он разорвется (хрупкое поведение). Если снижать температуру, то уменьшается и скорость деформации, при которой происходит переход от пластического к хрупкому поведению материала. В сущности, полимерные материалы обладают очень важным свойством, которое отсутствует у других материалов, а именно сильной зависимостью их свойств от температуры и времени (или скорости) деформирования. Это очень важное свойство, которое следует учитывать при проектировании изделий из пластмасс. Если конструктор не учитывает эту особенность пластмасс, то готовое изделие может выдерживать нагрузку при одних условиях и разрушаться при других, причем эти условия могут весьма незначительно отличаться друг от друга.

Аналогичным образом, каждый может вспомнить ситуации, когда пластмассовое изделие разрушалось. Выход из строя детали, изготовленной из пластмассы, может происходить по различным причинам. Поэтому важно понять, как именно происходит разрушение того или иного полимерного изделия. Случилось ли это, потому что был выбран материал, не отвечающий нужным требованиям? Произошло ли разрушение из-за ошибок при конструировании изделия? Было ли изделие поставлено в условия, когда произошли неожиданные изменения в окружающей среде?

Возможно, конструкция изделия была специально сделана такой, чтобы в определенных условиях в нем образовалась трещина. Примером этого является удар спортивного автомобиля об стенку трека при заездах «Формулы 1». Тогда когда на изделие такого типа обрушивается такой удар, пластмассовая обшивка должна воспринять энергию удара, которая рассеивается путем образования трещин так, чтобы не пострадал водитель. Этот случай относится к пластическому разрушению изделия. Впрочем, водитель, который при ударе выбрасывается из машины, возможно, придерживается иного мнения.

Обычные причины разрушения пластмассовых изделий, которые не исчерпывают всех возможных случаев, это:

- образование трещин под воздействием окружающей среды;
- воздействие химических агентов;
- воздействие ионизирующего излучения;
- окисление;
- неправильный выбор условий переработки;
- неверная оценка свойств материала.

К числу сравнительно новых причин разрушения, обсуждаемых в настоящее время, относится присутствие дезинфицирующих веществ в воде, добавляемых для уничтожения бактерий. Некоторые исследования показали, что такие химические вещества, как хлор и хлорамин оказывают вредное воздействие на пластмассы, используемые для изготовления труб в системах канализации и водоснабжения.

Анализ причин разрушения пластмасс

Анализ причин разрушения изделий из пластмасс необходимо проводить поэтапно. Конечно, прежде всего, необходимо установить истинную причину разрушения. Обычно это далеко не тривиальная задача и для ее решения требуется затратить много сил и времени. Здесь необходимо собрать как можно больше информации о предыстории события. К такой информации относится определение длительности работы изделия, когда и при каких обстоятельствах деталь вышла из строя, каким воздействием материал подвергался раньше, под какой нагрузкой или под действием каких напряжений использовалось изделие, изменялись ли раньше какие-либо из этих обстоятельств. Информация такого рода может иметь решающее значение для понимания причин разрушения изделия. Так, например, если выяснится, что изделие из пластмассы промывалось растворителем, к которому данный материал не стоек, то следует обратить на это особое внимание, чтобы понять, не явилось ли это причиной разрушения.

Следующий этап для выяснения причин разрушения состоит в визуальном анализе разрушенного изделия. Неприятные особенности внешнего вида могут указать на ошибки, допущенные при формовании изделия. Так, следы прожогов могут свидетельствовать о деструкции полимера при его переработке. Деструкция макромолекул может неблагоприятно сказаться на механических свойствах материала. Аналогичным образом, следы раковин также указывают на то, что выбор условий переработки при изготовлении изделия был неправильным.

Визуальный осмотр также может показать, что изделие эксплуатировалось потребителем неправильно. Так, глубокие отметины на поверхности свидетельствуют о перегрузке детали при ее эксплуатации. Наличие посторонних жидкостей на детали могут быть основанием для дальнейшего исследования: не была ли эта жидкость причиной нежелательного химического воздействия на полимер.

Во многих случаях при анализе причин разрушения важным элементом исследования является идентификация марки полимера и состава композиции. При этом следует определить не только тип полимера, но и то, какие были использованы добавки, наполнители и армирующие элементы. Это необходимо сделать, поскольку в качестве первой причины разрушения изделия следует рассмотреть возможность использования непригодного материала. Аналогичным образом причиной разрушения может стать то, что при получении композиции не были использованы важные компоненты, такие, например, как модификаторы ударной прочности, которые повышают пластичность материала. Существуют различные технические методы, которые с большой точностью позволяют установить тип полимера и все компоненты, из которых состоит полимерный материал [1]. Более того, эти методы могут подсказать также, какова была предыстория переработки материала при формовании изделия.

Разрушение поливинилхлоридных труб

Пластмассовые трубы, тьюбинги и разнообразные профильные изделия — это замена меди, стали и алюминия. Детали такого типа широко используются в различных областях промышленности, включая строительство, автомобилестроение, а также в производстве товаров народного потребления, в устройстве лужаек и садов, окон и дверей, мебели, уплотнений, электротехнических товаров. Один из полимеров, наиболее широко используемых во всех этих областях, — это поливинилхлорид (ПВХ). Этот материал стал популярным для самых разных применений, потому что его свойства можно варьировать в очень широких пределах в зависимости от вводимых в него добавок. Материалы на основе ПВХ могут быть высокопрочными, жесткими и твердыми. Они могут обладать высокими электроизоляционными характеристиками, отличаться высокой стойкостью к различным химическим агентам, быть самогасящимися — и все это при сравнительно низкой стоимости. При этом в зависимости от типа используемого пластификатора и его количества можно очень резко изменить свойства материала и сделать его ударостойким с относительно низкой твердостью и жесткостью.

Трубы, изготовленные из непластифицированного ПВХ, — обладают высокой прочностью, жесткостью и хорошо противостоят действию химических агентов. Эти свойства делают их привлекательными для наземного и подземного водоснабжения. Однако при похолодании свойства материала резко изменяются. Прежде всего резко к худшему изменяется ударная прочность труб. Это означает, что при пониженных температурах значительно снижается способность ПВХ рассеивать энергию удара, что приводит к опасности разрушения. Очень наглядно это явление выражается при представлении зависимости ударной прочности ПВХ как функции температуры (рис. 15.4.1).

Наиболее интересная часть этой зависимости лежит в заштрихованном поле. Именно это поле объясняет многие особенности поведения полимера. Здесь видно, насколько драматично снижается ударная прочность с понижением температуры.

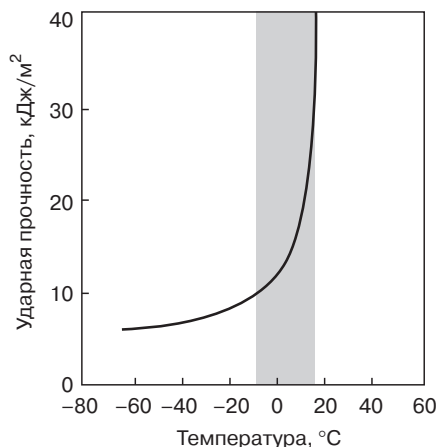


Рис. 15.4.1. Температурная зависимость ударной прочности ПВХ

Ударная прочность при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в четыре раза ниже, чем при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а такие низкие температуры — обычное явление во многих регионах мира. Это явление относится к числу тех, с которыми не встречаются при использовании металлов, и которое часто игнорируется при использовании пластмасс.

Можно попытаться улучшить ситуацию, вводя в полимер добавки, в данном случае пластификаторы. Это смещает заштрихованную область (см. рис. 15.4.1) влево и тем самым способствует повышению ударной прочности в низкотемпературной области. Однако улучшение одного свойства зачастую приводит к ухудшению других. В данном случае снижается жесткость. На рис. 15.4.2 сплошной линией показана температурная зависимость модуля упругости (как характеристики жесткости). Пунктирная линия показывает температуру, при которой начинается резкое снижение жесткости. Для ПВХ это $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изделия из ПВХ обычно и не используются при температурах, превышающих $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако, если в полимер — как было сказано выше — вводятся пластификаторы, эта предельная температура, при которой падает жесткость материала, смещается в сторону более низких значений.

Здесь необходимо искать компромисс в том, сколько пластификатора можно добавлять, и надо ли его вводить вообще для конкретных задач применения изделий и условий окружающей среды. При изготовлении труб из ПВХ следует обеспечить максимально возможную прочность, жесткость и сопротивление воздействию окружающей среды при минимальной цене. Использование пластификаторов, как правило, увеличивает стоимость продукции, и их обычно не применяют при изготовлении труб из ПВХ. Введение в композицию других добавок, таких как карбонат кальция, способствует снижению стоимости, но, к сожалению, при этом материал становится еще более хрупким, то есть кривая, показанная на рис. 15.4.1, смещается влево, увеличивая опасность хрупкого разрушения.

Пример разрушенной трубы из ПВХ показан на рис. 15.4.3. Визуальный осмотр показывает, что в этом случае мы имеем дело не с пластическим, а с хрупким разрушением изделия.

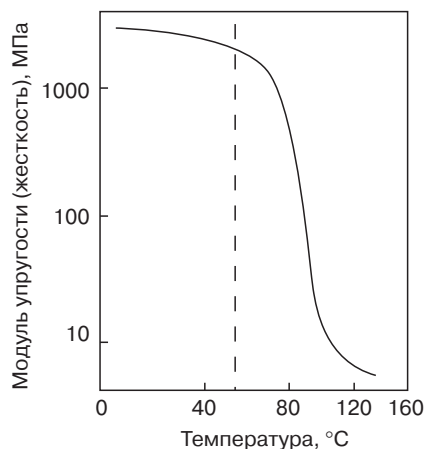


Рис. 15.4.2. Температурная зависимость жесткости ПВХ



Рис. 15.4.3. Разрушенная труба из ПВХ

Как общее правило, хрупкое разрушение происходит очень быстро, в противоположность пластическому разрушению, развивающемуся во времени, как, например, это происходит при деформировании *Silly-Putty*.

Было установлено, что труба, показанная на рис. 15.4.3. находилась при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, то есть при таких условиях окружающей среды, когда хрупкое разрушение было неизбежным. Усилие, действовавшее на трубу от внешнего удара или от внутреннего давления жидкости в трубе, было настолько большим, что произошло ее хрупкое разрушение. В данном случае выход изделия из строя не был связан с ошибкой конструктора при выборе материала или некачественными технологическими параметрами переработки полимера, а был обусловлен условиями применения изделия, не отвечающими его возможностям.

Существует множество методов испытаний для определения правильности подбора материала, предназначенного для изготовления труб. Одним из таких методов является термогравиметрический анализ. Этот метод часто используют для определения состава полимерной композиции. Метод состоит в том, что небольшой образец материала постепенно нагревают до очень высокой температуры. При достижении определенных температур отдельные компоненты композиции начинают разлагаться. При термогравиметрическом анализе точно измеряются изменения веса образца по мере повышения температуры. На рис. 15.4.4 показан пример результатов термогравиметрического анализа образца из ПВХ композиции [2].

На представленной диаграмме разложение различных компонент в композиции определяется посредством изменения веса образца. Далее, обращаясь к библиотеке, содержащей результаты анализа различных веществ, можно установить природу пиков на диаграмме, которые по их положению на температурной шкале соответствуют температурам разложения известных веществ.

Разрушение муфт на трубопроводах

Пластмассовые муфты часто используют для присоединения транспортирующих рукавов к туалетам, стокам и иным компонентам водопроводной системы. На рис. 15.4.5 и 15.4.6 приведены фотографии, показывающие характерные случаи разрушения пластмассовых муфт, с помощью которых присоединяются рукава, усиленные стальной оплеткой. На муфтах видны окружные трещины, распространяющиеся по всей поверхности. Они появляются у последнего витка нарезки внутри муфты. Эта область отвечает месту действия максимальных напряжений, которые создаются здесь при установке муфты в месте соединения участков трубопроводной линии.

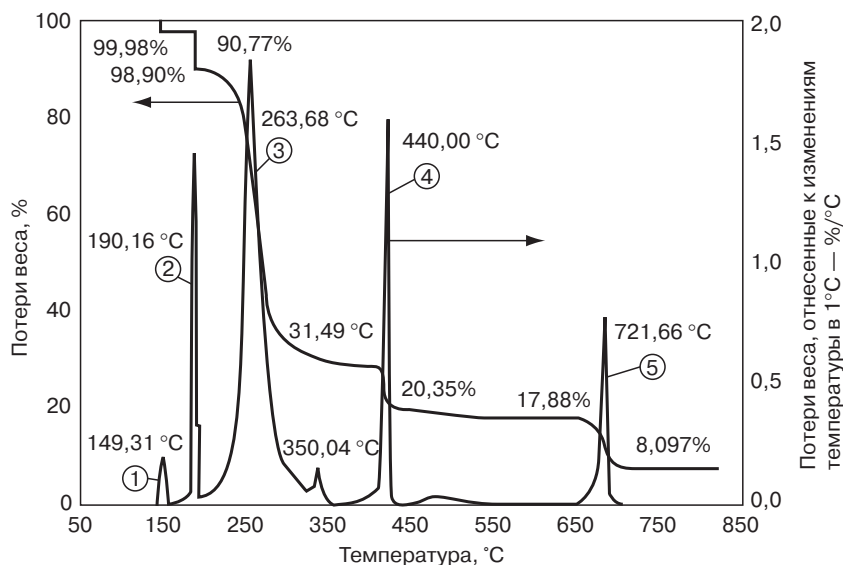


Рис. 15.4.4. Термогравиметрический анализ образца ПВХ [2]: 1) летучие — вода, мономеры, растворители; 2) пластификатор — диоктилфталат; 3) образование хлористого водорода; 4) распад С–С-связей; 5) образование CO_2

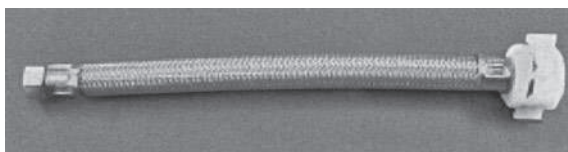


Рис. 15.4.5. Рукав со стальной оплеткой, на конце которого закреплена треснувшая муфта

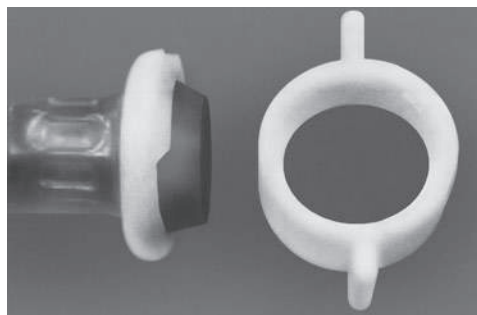


Рис. 15.4.6. Треснувшая муфта на конце рукава

На рис. 15.4.7 показан закрытый конец поверхности, в которой образовалась трещина. Эта трещина возникла у основания последнего витка нарезки (это наблюдение было также подтверждено с использованием метода электронной сканирующей микроскопии).

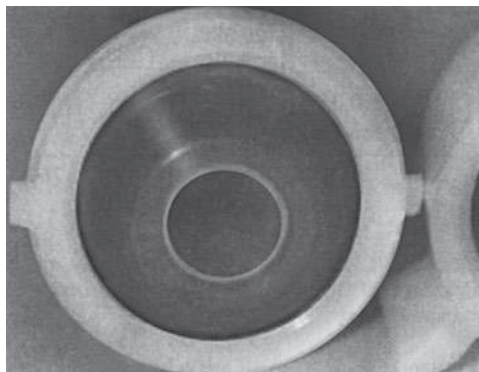
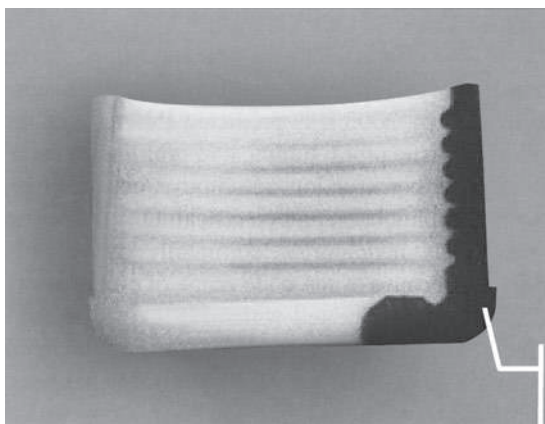


Рис. 15.4.7. Треснувшая муфта. Вид со стороны закрытого конца соединения

Гладкий и резко выраженный характер скола указывает на то, что в рассматриваемом случае имело место хрупкое разрушение. Образование трещины вначале происходило медленно, а затем наступил катастрофический рост трещины. Появление трещины, скорее всего, было связано с приложением чрезмерно больших усилий при установке муфты и ее затяжке по резьбе. Как изделие реагирует на эти усилия, зависит от многих факторов, и свойства материала — один из них. Если напряжения слишком велики по всему поперечному сечению изделия, то появляются микротрещины. Они медленно развиваются по мере ослабления усилия затяжки, пока рост трещины не перейдет в катастрофическое разрушение изделия.

Скорее всего, предел текучести материала, который был использован для изготовления этой муфты, был недостаточно велик, чтобы не произошло разрушение муфты при нормальных условиях ее установки и условий эксплуатации. Как следствие этого, вместо того чтобы деформироваться пластически, наступило хрупкое разрушение.

На рис. 15.4.8 показано поперечное сечение соединительной детали при отсутствии трещин. Эта конструкция изделия очень похожа, если не вообще идентична,



Уменьшение толщины стенки в области действия высоких напряжений

Рис. 15.4.8. Поперечное сечение соединительной гайки

конструкции разрушенной муфты. Стенка в том месте, в котором произошло разрушение, относительно тонкая, причем сразу же за областью действия максимальных напряжений имеет место уменьшение толщины стенки.

Лучшим вариантом усовершенствования конструкции было бы увеличение толщины стенки в области действия высоких напряжений вместо уменьшения (см. рис. 15.4.8.). Следовало бы также подумать о применении более пластичного материала, который бы лучше воспринимал действующие в этой области напряжения.

Литература

1. Sepe M. «Materials Troubleshooting» a chapter in *Injection Molding Handbook*, edited by Osswald T.A., Turng T. and Gramann P.J., Hanser, Munich (2002).
2. Osswald T. and Menges G. *Material Science of Polymers for Engineers*, Hanser, Munich, 1995.

Случай 5. Анализ причин разрушения труб, изготовленных из поливинилхлорида¹

От редактора перевода

Содержание этого раздела — «Анализа причин разрушения труб, изготовленных из поливинилхлорида», было изложено в предыдущем разделе при рассмотрении Случая 4, включая рисунки 15.5.1–15.5.5.

Поэтому здесь текст повторяться не будет.

Дополнительно были высказаны следующие соображения.

Для того чтобы убедиться в правильности механизма разрушения труб, который был предложен на основании проведенного анализа, можно применить расчет напряжений методом конечных элементов. Такой подход к анализу позволит конструктору с уверенностью судить, что произойдет с изделием, если поместить его в реальные условия эксплуатации при нормальных и экстремальных воздействиях. На рис. 15.5.6 и 15.5.7 показано, в каком месте предположительно должно произойти разрушение трубы, обусловленное действием чрезмерно высокого внутреннего давления.

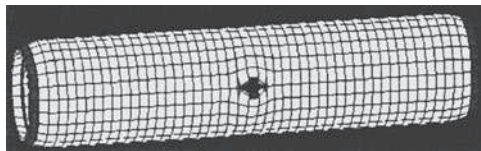


Рис. 15.5.6. Определение места разрушения трубы под действием избыточного внутреннего давления, выполненное методом анализа конечных элементов. Вид с торца трубы

¹ Этот раздел публикуется с разрешения *The Madison Group*. *Примечание:* этот анализ и его описание являются собственностью *The Madison Group* и не могут копироваться или распространяться иным путем без предварительного разрешения *The Madison Group*.

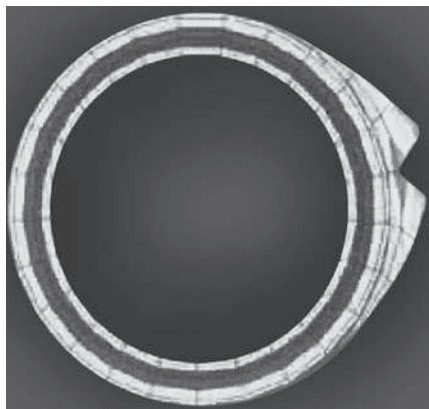


Рис. 15.5.7. Определение места разрушения трубы под действием избыточного внутреннего давления, выполненное методом анализа конечных элементов. Вид с торца трубы.

Случай 6. Анализ причин разрушения корпуса фильтра для воды¹

Проведенный анализ никоим образом не подразумевает, что какие-либо иные или вообще все пластмассовые трубы разрушаются аналогичным образом. Каждый случай разрушения уникален и требует самостоятельного анализа.

Для анализа причин разрушения был предоставлен корпус фильтра для воды. На исследуемом образце была обнаружена трещина вблизи нижней крышки (рис. 15.6.1 и 15.6.2).

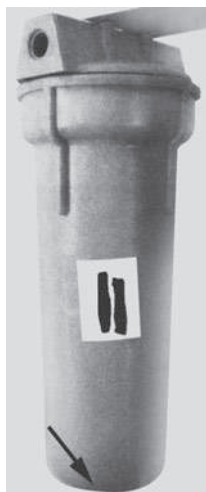


Рис. 15.6.1. Разрушенный корпус фильтра для воды

¹ Этот раздел публикуется с разрешения *The Madison Group*. *Примечание:* этот анализ и его описание являются собственностью *The Madison Group* и не могут копироваться или распространяться иным путем без предварительного разрешения *The Madison Group*.

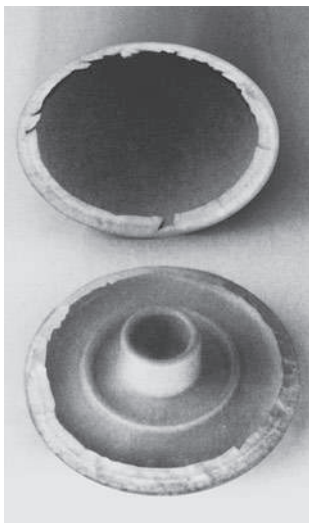


Рис. 15.6.2. Крышка разрушенного фильтра для воды

Трещина проходит по всей окружности, фактически полностью отделяя нижнюю крышку от тела корпуса. Произошедшее разрушение вызвало интенсивную утечку воды в доме, где был установлен фильтр.

При анализе напряжений и усилий, которые возникали в корпусе при его эксплуатации, были установлены две основные причины, которые могли привести к чрезмерно высоким напряжениям. Эти напряжения в резьбе, возникшие при установке фильтра, и напряжения, обусловленные внутренним давлением воды. Напряжение в резьбе возникли при затяжке по резьбе в момент установки корпуса фильтра на его основание. Был проведен структурный анализ (рис. 15.6.3), который позволил установить, в какой области действовали максимальные напряжения.

Максимальные напряжения возникают на внутреннем сгибе крышки корпуса. Это именно то место, в котором в действительности произошло разрушение изделия. Здесь на минимальном радиусе (в области концентрации напряжений) действуют максимальные напряжения, а стенка изделия самая тонкая.

Дальнейший анализ позволил выявить дефекты, обусловленные технологией изготовления корпуса фильтра. На рис. 15.6.3 и 15.6.4 видна рябь на поверхности изделия, а также области, в которых перемешивание материала было некачественным.

Рябь на поверхности изделия возникает на стадии заполнения формы, а неровности поверхности могут быть источниками концентрации напряжений, что в итоге инициирует развитие трещин. Плохое перемешивание компонент полимерной композиции приводит к неоднородностям в материале, которые также могут быть концентраторами напряжения, причиной появления ослабленных мест и деструкции полимера.

Дефекты, обусловленные недостатками технологического процесса литья, в данном случае являются сопутствующими факторами, влияющими на возможность разрушения изделия. Другой важный фактор — это выбор материала. Можно предложить

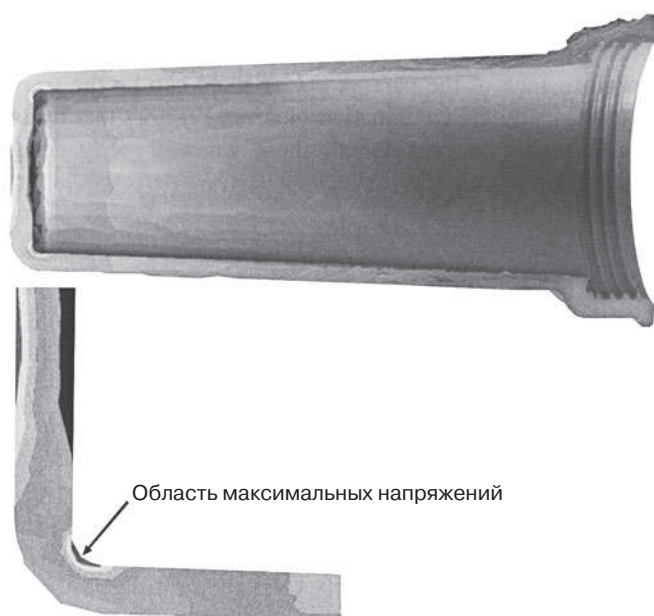


Рис. 15.6.3. Структурный анализ для обнаружения места действия максимальных напряжений



Рис. 15.6.4. Дефекты процесса литья — рябь на поверхности и плохое смешение

тысячи марок полимерных материалов, которые могут быть использованы в рассматриваемом случае. Для правильного выбора подходящего материала необходимо знать конкретные условия применения. Избежать выхода изделия из строя можно, соблюдая необходимый баланс между требованиями к свойствам материала и его ценой. Материал, выбранный для изготовления корпуса фильтра, должен включать в свой состав наполнители (тальк). Применение наполнителей снижает стоимость материала, но в то же время способствует снижению его прочности.

Важным фактором является также правильная технология переработки полимера. Переработчики предпочитают работать с формами, имеющими низкую температуру, и маловязкими расплавами. Это позволяет ускорить технологический процесс. Если вязкость материала мала, то это позволяет быстрее заполнять форму. Но маловязкие материалы — это полимеры с относительно низкими молекулярными массами, что приводит к понижению механических характеристик изделий. Понижение же температуры формы приводит к многочисленным проблемам при ее заполнении.

Обычно к разрушению изделия приводит наложение различных факторов. Поэтому при правильном подходе к конструированию изделия необходимо учесть все возможные обстоятельства его изготовления и использования.

Случай 7. Разнообразные исследованные ситуации¹

Ниже будет рассмотрен ряд примеров, которые показывают, как фирма *Microbac's Hanser Laboratopries Division* применяла различных аналитические методы для анализа причин разрушения полимерных изделий.

Случай А: Ошибки при применении детали

Фирма *Hanser* получила для исследования от районной компании штата, занятой обслуживанием канализационных сетей, три образца 12-дюймовых труб, изготовленных предположительно из АБС-пластика. Трубы получали методом соэкструзии; наружный слой состоял из АБС-пластика, наполненного портланд-цементом. Обследование образцов после их получения показало, что в трудах имеются поврежденные области, образованные аксиально ориентированным материалом, которые при кольцевом сжатии трубы изгибались. Изгиб происходил в вертикальном направлении, что соответствовало направлению силы тяжести в системе, заполненной жидкостью.

Оказалось, что повреждение АБС-пластика происходило под воздействием химических агентов, причем наблюдались очевидные проявления размягчения материала, что обусловлено воздействием растворителя. Вследствие размягчения АБС-пластик изменял свои размеры и форму.

Основным способом для анализа причин разрушения было использование газового хроматографа, связанного с масс-спектроскопией продуктов, выделяемых из исследуемого образца. Анализ показал, что на стенке трубы имеется перхлорэтилен в количестве, превышающем 1000 ppm (частей на миллион), причем растворитель скапливался как в верхней, так и в нижней части трубы. Также был найден трихлорэтилен. Известно, что перхлорэтилены используются в качестве чистящих средств, и разрушение труб в системе канализации (рис. 15.7.1) происходило непосредственно под коммерческим предприятием, занимающимся чисткой. Муниципалитет произвел проверку и подтвердил, что предприятие сливало использованные растворители прямо в систему канализации, так что оно было признано ответственным за проведение ремонтных работ поврежденных труб.

¹ Для получения дополнительной информации можно связаться с д-ром Ким Бауман, директором по развитию фирмы *Microbac laboratories, Inc.*, kbaughman@microbac.com



Рис. 15.7.1. Сечение разрушенной трубы, изготовленной из АБС-пластика, которое произошло вследствие длительного воздействия растворителей в чистящем составе

Случай Б: Некачественное изготовление

Клиент предоставил многочисленные образцы 4-дюймовых муфт, соединяющих поливинилхлоридные трубы, причем уплотнение создавалась с помощью вяжущего раствора. Соединительные муфты были взяты из систем, использующихся для транспортировки натрийгипохлорида. Клиент жаловался, что в соединительных узлах возникают протечки при внутреннем давлении 80 фунт/дюйм².

Соединительные муфты были разрезаны и подвергнуты анализу. Целью анализа было, прежде всего, сопоставление полученных результатов анализа с требованиями стандарта *ASTM*, который определяет, каким образом правильно соединять изделия из поливинилхлорида с помощью вяжущих растворов.

Были обнаружены многочисленные нарушения существующих требований, а именно хорошо заметная недостаточная пропитка, плохое проплавление (возможно из-за отсутствия грунтовки), неполное покрытие и, возможно, присутствие загрязнений в клее (в виде песка, грязи, мусора). Фирме, монтировавшей исследованную систему, пришлось переделать ее без дополнительной оплаты.

Случай В: Неправильная конструкция

Фирма *Hauser* получила два образца 2-дюймовых тройников, соединенных с поливинилхлоридом с помощью вяжущего раствора, которые вышли из строя при их эксплуатации. Эти тройники были частью устройств в парке развлечений, которые использовались для периодического разбрызгивания воды. Тройники были установлены на вертикальном ответвлении от 2-дюймовой распределительной линии



Рис. 15.7.2. Усталостное разрушение тройника под действием циклических ударов воды при разбрызгивании струи

на расстоянии около 6 дюймов от оси линии, где они были повернуты на 90 град. Система работала на очищенной (пригодной для питья) воде.

На фирме *Hauser* был проведен анализ причин разрушения, и было установлено, что образцы были правильно изготовлены, и система была собрана без нарушений. Был подобран подходящий материал, и его прочность отвечала требуемым нормам. Рассмотрение разломов показало, что напряжения, которые привели к разрушению, могли появиться только в процессе применения деталей.

Выход изделия из строя был обусловлен длительным воздействием напряжений, превысивших порог долговечности материала. Это было связано с действием крутящего момента от 6-дюймового плеча, на котором водяная струя действовала как периодические удары молотка. Это и приводило к разрушению деталей (рис. 15.7.2).

Разрушения могли быть устранены путем использования гораздо более жесткой системы установки фитинга и/или использованием подшипника, блокирующего передачу усилия через длинное плечо на ответвление трубы, что позволило бы снизить или исключить напряжения, действующие на тройник.

Случай Г: Замена материала

Производитель тележек для гольф-клуба правильно сконструировал все компоненты своего нового изделия. Одним из новых элементов конструкции было введение блока трехточечного мягкого крепления. Азиатский производитель изготовил и представил для утверждения отлитый прототип этого изделия. Этот прототип были испытан и признан исключительно качественным. Далее была получена первая партия изделий, которые были переданы профессиональным игрокам в гольф. По истечении нескольких недель компания получила ряд рекламаций, связанных с выходом этого блока из строя.

Первоначальным вариантом исправления ситуации была установка дополнительных шайб для предотвращения выскакивания заклепок. Однако выход из строя деталей продолжался,

Исследования, выполненные методом дифференциального термического анализа и Фурье-инфракрасной спектроскопии, показали что прототип был изготовлен из полиацетала, а серийная продукция из полиамида 6. Причина ошибки состояла в том,

что производитель при изготовлении прототипа полагал, что наилучшим материалом для изготовления блока крепления был бы полиацеталь, в то время как конструктор считал, что следует использовать полиамид 6. В течение имевших место переговоров заказчик ориентировался на изготовление узлов крепления из полиамида.

Обратите внимание, что в ходе переговоров выбор материала никогда не был зафиксирован в письменной форме.

Впоследствии детали начали отливать из полиацетала, и никаких рекламаций от потребителя больше не поступало.

Случай Д: Образование трещин под воздействием окружающей среды

Клиент, производящий эскалаторы по специальному заказу, обнаружил, что на деталях, изготовленных из желтого поликарбоната, появляются трещины. Эти детали вворачивались в стальные ступени эскалатора для того, чтобы сделать края ступеней более заметными для пассажиров. Края становились хрупкими, и на них появлялись трещины через три месяца эксплуатации. Это происходило только при первичной установке эскалатора.

Анализ разрушенных деталей показал, что в них присутствует избыточное количество хлора, которого не было в деталях в исходном состоянии.

Было обнаружено, что производитель моющих средств для эскалаторов предложил новую рецептуру, в которой было высокое содержание хлорированных углеводородов. Комбинация напряжений в местах установки винтов, мест под головками винтов, в которых скапливалась жидкость, и хлорированных углеводородов оказала ужасающее воздействие на поликарбонат. Дальнейшее исследование показало, что трещины в поликарбонате образуются по всей поверхности изделий; просто в области установки креплений они появляются раньше.

Замена моющего средства сняло проблему.

Случай Е: Плохая конструкция изделия

Потребитель представил для анализа посуду для приготовления фондю, произведенный в Китае и продаваемый в Европе, с жалобой на то, что пластмассовые ручки кастрюли отваливаются в процессе работы. Согласно картинке, изображенной на упаковке, потребитель заполнял посуду растительным маслом и доводил масло до кипения. При перемещении кастрюли с кухонной плиты к столу обе ручки отваливались. При этом кипящее масло пролилось и серьезно пострадал человек.

Ручки были соединены с кастрюлей шпильками с резьбой, изготовленными в виде вставок при литье ручек. Эти вставки имели большие зубцы, помогавшие их установке.

Внешний осмотр ручек показал, что на них имеются явные следы плавления. Использование метода дифференциальной сканирующей калориметрии показало, что температура стеклования материала лежит вблизи $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. С помощью Фурье-инфракрасной спектроскопии было установлено, что материал, из которого изготовлены ручки, представляет собой бутадиен-стирольный сополимер. Точка размягчения по Вика этого материала равна $103\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, физические свойства использованного материала совершенно не пригодны для тех целей, для которых он был применен. Хотя мы называем эту ошибку плохой конструкцией изделия, ее можно

также отнести к необоснованной замене материала, поскольку вряд ли опытный конструктор предложил бы делать ручки из этого материала.

Случай Ж: Плохое выполнение технологического процесса

Клиент представил для анализа трубу, изготовленную из полиэтилена и предназначенную для транспортировки природного газа. Труба разрушилась после 13 лет эксплуатации вследствие медленного прорастания трещины через стенку. Образец был описан и предоставлен для исследования. Основным объектом исследования был материал, из которого была изготовлена труба. Методом оптической микроскопии было обнаружено, что в материале имелись загрязнения, которые привели к снижению прочностных характеристик стенки трубы, а также инициировали образование и распространение трещины. Исследования, выполненные методом Фурье-инфракрасной спектроскопии, показали, что посторонние включения были целлюлозой. Кроме того, в непосредственной близости от места разлома была обнаружены следы кремнийорганической смазки.

Было найдено, что в цехе, в котором производились трубы, находились мешки с кремнийорганической смазкой. Кусочки от этих мешков попали в полимер, что, в конечном счете, и привело к разрушению трубы.

16. Контроль качества

16.1. Введение

Американский толковый словарь определяет качество как некую характеристику или оценку некоторого свойства или показателя. Согласно Джурану [1]: «Качество — это универсальная концепция, применимая к любым товарам и услугам, которая определяет их большую или меньшую пригодность для применения». Пригодность для применения — это относительная мера того, насколько удачно данный продукт отвечает целям потребителя. Контроль качества — это регулируемая правилами процедура, с помощью которой измеряются реальные характеристики продукта, результаты измерений сопоставляются со стандартными показателями и определяется разница между ними [2].

Контроль качества — это средство, с помощью которого оценивается каждый шаг производства продукта для того, чтобы быть уверенными, что свойства конечного продукта будут отвечать желаемым требованиям. Некоторые изделия настолько сложны, что если в процессе производства составных элементов возникают минимальные отклонения, то это может привести к невозможности сборки конечного изделия. Это означает, что производитель должен оценить критичность каждого этапа производства. Затем он должен решить, в какой точке следует провести инспекцию процесса и каковы должны быть способы контроля для того, чтобы конкретная деталь и конечный продукт в целом удовлетворяли предъявляемым требованиям.

В наши дни действия повсеместных правил и законов единственный способ для производителя чтобы выжить и предлагать товар, обеспечивающий получение прибыли — это постигать и ясно понимать научно обоснованные требования к контролю качеству продукции. Положение здесь особенно уникально для производителей и переработчиков полимерных материалов. Большинство производимых материалов — это новые материалы, и их состав не определен строго и однозначно. Процессы получения и переработки этих материалов отличаются от традиционных технологий, поскольку у новых продуктов нет долгой предыстории. И наконец, очень быстрый прогресс индустрии пластмасс создает серьезные проблемы в подготовке новых специалистов.

Правильно организованный контроль качества позволяет решить ряд проблем. Во-первых, он удовлетворяет потребителя. Во-вторых, он позволяет соблюдать все существующие правила и контрактные обязательства. И еще более важно то, что такой контроль служит как сигнальная система, указывающая на непредвиденные проблемы, что уменьшает дорогостоящие рекламации.

В случае пластмасс контроль качества — это не только инспектирование и испытания продукта после того, как он выходит с производственной линии или

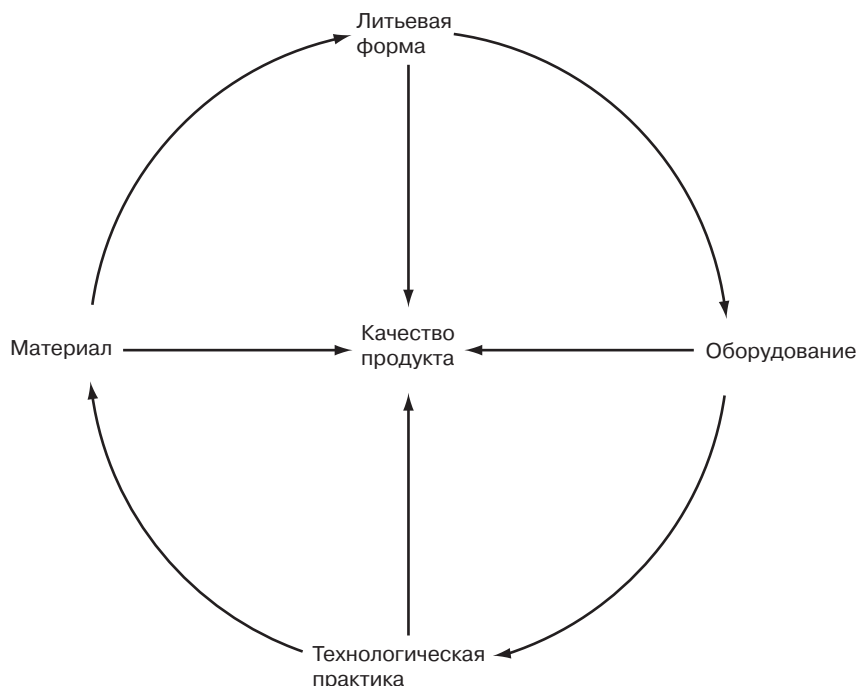


Рис. 16.1. Взаимосвязь различных факторов, определяющих качество готового продукта

конструкции после ее сборки. Многие факторы и неизвестные свойства, например, длительная усадка после литья, играют важную роль в окончательном определении качества готового изделия.

На рис. 16.1 представлена графическая иллюстрация, показывающая взаимное влияние основных факторов и их роль в определении качества продукта.

В настоящей главе будут рассмотрены статистические методы контроля качества, которые являются важным аспектом этой проблемы, а также будет обсуждено построение системы контроля качества в целом.

16.2. Статистические методы контроля качества

Статистические методы контроля качества — это относительно новый подход к проблеме. Оригинальные концепции в этом вопросе были сформулированы В. Шухартом из *Bell Telephone Laboratories* в начале 1930-х годов. До этого времени существовал только один путь оценки качества — это испытание всех изделий. Таким образом, качество оценивалось непосредственно для данного конкретного изделия. Никаких подходов к оценке качества на стадии технологического процесса не было. Статистические методы контроля качества основаны на том, что контролируются, скорее, свойства продукта на различных стадиях технологического процесса, нежели отдельные

изделия. Попросту говоря, чем более тщательно контролируется сам технологический процесс, тем меньше вероятность появления брака и рекламаций [3].

Существуют два основных аспекта технологического процесса. Согласно одному из них, создаются карты, в которых отражаются стадии технологического процесса. Эти карты называют «картами контроля переменных параметров», и их целью является контроль как текущих, так и конечных свойств изделия. Другой подход к статистическому контролю качества основан на оценке тех или иных конкретных характеристик получаемого продукта в целях определения того, годится ли он для дальнейшего использования или нет. Этот аспект контроля является основанием для научно обоснованного принятия или выбраковки продукта.

16.2.1. Карты контроля параметров процесса

В идеале каждый производитель заинтересован в том, чтобы можно было осуществлять контроль технологического процесса до такой степени, чтобы это позволило бы обеспечить постоянное производство идентичных продуктов день за днем. В реальной жизни это невозможно. Трудности контроля обусловлены внутренними колебаниями параметров процесса, обусловленными износом оборудования и инструмента, квалификацией оператора, изменением внешней среды. Статистический анализ, основанный на использовании карт контроля параметров процесса, позволяет решить следующие задачи:

1. Дать статистическую оценку, поддается ли процесс контролю или нет.
2. Если параметры процесса выходят за заданные пределы, то система контроля сигнализирует о необходимости анализа причин этого явления и необходимости введения коррекций.
3. Указать на причины отклонения параметров от заданных значений.
4. Снизить стоимость инспекции изделий.
5. Улучшить качество продукции и снизить количество брака и рекламаций.
6. Организовать устойчивое ведение технологического процесса.
7. Исследовать возможности производственного процесса.
8. Проверить реалистичность требований, предъявляемых к изделию.

В последние годы в промышленности пластмасс усилилась тенденция к автоматизации высокоскоростных процессов. Было создано много высокоскоростных литьевых машин с коротким циклом формования и высокопроизводительных экструдеров. Не столь уж необычной стала 64-гнездная литьевая машина с 3-секундным циклом формования, которая производит 70 000 изделий в час. Также известны 3000-тонные литьевые машины, которые за один цикл позволяют получать изделия весом, превышающим 100 фунтов. Некоторые крупные экструдеры могут выпускать 8- и 10-дюймовые трубы, перерабатывая 2000 фунтов полимера в час. Очевидно, что при использовании столь высокопроизводительного оборудования совершенно недопустимо выходить за рамки установленных технологических параметров или выпускать большое количества брака.

Статистические методы анализа играют особенно важную роль в контролировании таких процессов, поскольку высококонкурентный рынок не принимает выпуск брака и предъявление рекламаций.

А. Карты контроля переменных параметров процесса (\bar{x} и R -карты)

Прежде чем обсуждать применение методов статического контроля качества в производстве изделий из полимеров, следует определить основные термины.

\bar{x} — средняя, среднеарифметическая величина. Это есть среднее значение некоторого параметра x , который был измерен для n изделий:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}.$$

Например, пусть вес крышек для бутылей составлял 7, 3, 9, 5 и 6 грамм. Тогда среднее значение веса представляет собой сумму весов отдельных крышек, деленное на их число:

$$\bar{x} = \frac{7+3+9+5+6}{5} = 6.$$

R —разброс. Эта величина представляет собой разность между максимальным и минимальным значением параметра x в исследованной группе изделий. В приведенном выше примере разброс равняется шести. Усредненное значение разброса \bar{R} — это среднее значение разбросов для нескольких партий изделий.

На рис. 16.2, *a* показан типичный пример карты контроля переменных параметров процесса (\bar{x} и R -карты). Центральная линия для значений \bar{x} представляет собой среднее значение параметра \bar{x} для нескольких партий изделий. Его обычно обозначают как $\bar{\bar{x}}$ (x с двумя верхними черточками).

Центральная линия на графике значений параметра R представляет среднее значение разброса ряда партий. Верхняя и нижняя линии определяют верхний и нижний пределы значений контролируемого параметра.

Вообще говоря, пределы контролируемого параметра определяются утроенным значением стандартного отклонения 3σ , отсчитываемым от средней линии. Это означает, что вероятность отклонения контролируемого параметра от среднего значения, лежащая в пределах ± 3 стандартных отклонений, составляет 99,73% от измеренной величины. Эта же мысль может быть выражена несколько по-иному: отклонения от средней величины для 99,73% значений измеряемого параметра для исследованных деталей не превышают ± 3 стандартных отклонений.

Данные, представленные на рис. 16.2, *б*, иллюстрируют полученные результаты.

Пример. Представим себе, что мы только что установили экструдер, намереваясь выпускать трубы с внутренним диаметром 2 дюйма. При этом должна выдерживаться номинальная толщина стенок, равная 82 мил (мил — тысячная доля дюйма). Тем не менее, как и в любом технологическом процессе возможны вариации значений этих параметров. Эти вариации могут быть обусловлены множеством факторов, в частности колебаниями свойств перерабатываемого материала, неустойчивостью температуры расплава, нормальным износом головки, изменениями скорости вращения шнека и скорости тянущего устройства.

При инспекции качества труб требуется через каждый час отрезать по пять образцов, измерять толщину стенки и взвешивать эти образцы.

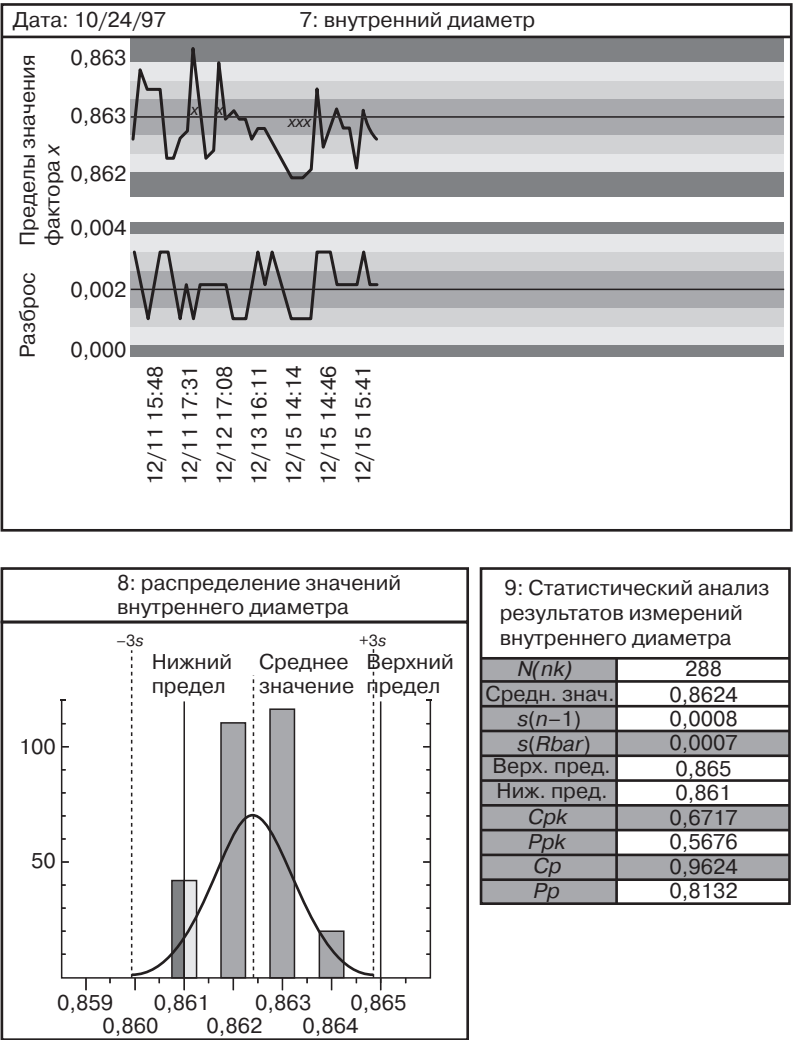


Рис. 16.2, а. Типичный пример карты контроля переменных параметров процесса

На рис. 16.2, б представлены значения толщины труб, измеренные в понедельник утром, вскоре после запуска экструдера. Значения толщины измеряли в течение следующих 24 часов и выражали в милах. Рассчитывали следующие параметры, которые позволили построить карты контроля переменных процесса.

Значение $\bar{\bar{x}}$ находили как:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\text{Сумма средних значений для всех партий образцов}}{\text{Сумма числа исследованных образцов}} = \frac{\sum \bar{x}}{n} = \frac{2050}{25} = 82.$$

Карта контроля переменных параметров (\bar{x} или R)																									Деталь № 1048	Карта № 1													
Наименование продукта (изделия)												Оператор													Допустимые пределы														
Оператор		Оборудование										Измерительный прибор										Единицы измерения			Положение нуля														
Дата		9-5-81																																					
Время		7,00	8,10	9,15	10,00	11,05	12,10	1,15	2,10	3,05	4,10	5,15	6,20	7,00	8,10	9,05	10,10	11,00	12,10	1,05	2,15	3,10	4,15	5,00	6,05	7,10													
	1	82	78	82	76	86	80	82	78	86	80	82	78	82	80	81	80	85	83	84	82	80	83	82	80	82													
	2	86	80	88	78	82	78	86	80	82	78	84	80	82	82	82	82	82	81	80	81	82	82	84	82	84													
	3	84	80	86	80	84	78	84	80	84	78	82	80	84	82	85	83	81	84	83	84	81	81	82	83	83													
	4	82	78	92	78	86	80	82	78	86	80	82	78	82	84	83	81	83	83	82	81	84	80	83	83	81													
	5	86	84	82	78	82	84	86	84	82	84	80	82	80	84	80	82	84	83	82	82	83	83	84	80	84													
Сумма		420	400	430	390	420	400	420	400	420	400	410	400	410	410	415	405	414	413	411	411	410	410	410	411	410													
Среднее значение		84	80	86	78	84	80	84	80	84	80	82	80	82	82	83	81	82,8	82,6	82,8	82,2	82	82	82	82,2	82													
Разброс R		4	6	10	4	4	6	4	6	4	6	4	6	4	4	4	3	4	3	4	3	4	4	4	4	4													
Примечания																																							

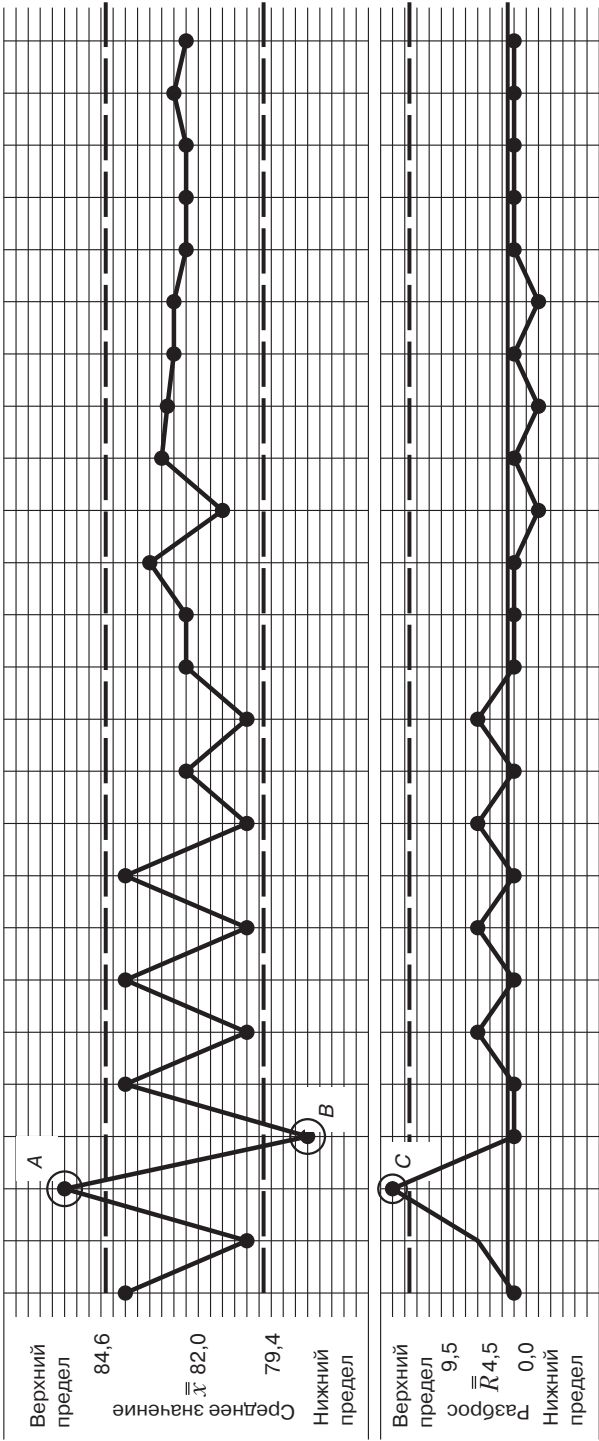


Рис. 16.2, б. Карта, иллюстрирующая колебания измеряемого параметра

Значение \bar{R} находили как:

$$\bar{R} = \frac{\text{Сумма разбросов для всех партий}}{\text{Сумма числа исследованных образцов}} = \frac{\Sigma R}{n} = \frac{113}{25} = 4,52.$$

Верхний и нижний пределы измерений (UCL и LCL соответственно) при построении карты для \bar{x} вычисляли как

$$UCL = \bar{x} + A_2 \bar{R} = 82 + 0,577(4,52) = 84,6;$$

$$LCL = \bar{x} - A_2 \bar{R} = 82 - 0,577(4,52) = 79,4.$$

В этих формулах A_2 — это коэффициент, используемый для вычисления пределов отклонений при построении карты контроля переменных процесса для \bar{x} .

В табл. 16.1 приведены значения этого коэффициента, использованные для определения пределов отклонений, при построении карт для средних величины и разброса. Величины n в этой таблице — это количество образцов в каждой исследованной серии. Для рассматриваемого примера эта величина равна пяти.

Верхний и нижний пределы отклонений для карты разброса значений рассчитываются по аналогичным формулам:

$$UCL = D_2 \bar{R} = 2,155(4,52) = 9,55;$$

$$DCL = D_3 \bar{R} = 0(4,52) = 0.$$

Таблица 16.1. Коэффициенты, используемые для построения карт контроля переменных параметров процесса

Количество образцов в партии, n	Расчет средних величин	Карта разброса параметров		
	Коэффициенты для определения предельных значений	Коэффициенты для расчета центральной линии	Коэффициенты для расчета предельных значений	
	A_2	d_2	D_3	D_4
2	1,880	1,128	0	3,267
3	1,023	1,693	0	2,575
4	0,729	2,059	0	2,282
5	0,577	2,326	0	2,115
6	0,483	2,534	0	2,004
7	0,419	2,704	0,076	1,924
8	0,373	2,847	0,136	1,864
9	0,337	2,970	0,184	1,816
10	0,308	3,078	0,223	1,777
11	0,285	3,173	0,256	1,744
12	0,266	3,258	0,284	1,716
13	0,249	3,336	0,308	1,692
14	0,235	3,407	0,329	1,671
15	0,223	3,472	0,348	1,652

Все цифры в таблице взяты по оригиналу из: B. Mason, *Statistical Technique in Business and Economics*. Воспроизведено с разрешения Richard D. Irvin, Inc.

В этих формулах, как и раньше, значения коэффициентов D_3 и D_4 , используемые для расчетов верхнего и нижнего пределов при построении карты разбросов, взяты из табл. 16.1.

Вся описанная информация и результаты расчетов позволили построить карту контроля качества для величин \bar{x} и R , как это показано на рис. 16.2, б.

Интерпретация. Исследование построенных карт контроля качества для средних величин показало, что если воспользоваться результатами контроля пяти образцов из каждой серии, то можно с уверенностью утверждать, что среднеарифметическое значение толщины 99,73% труб лежит в пределах от 79,4 до 84,6 мил. Аналогичное заключение может быть сделано по картам разброса измеренных значений. Построенные карты также показывают, что в двух точках, обозначенных как *A* и *B*, процесс вышел за допустимые пределы. Эти недопустимые отклонения объясняются неустойчивостью при запуске оборудования. Как видно, далее процесс стабилизировался, и никаких отклонений за допустимые пределы не происходило. Анализ карты разбросов показал, что отклонения за допустимые пределы наблюдался в точке *C*, которая также относилась к периоду запуска оборудования, после чего процесс стабилизировался.

Карта контроля качества для того же самого процесса была построена также несколько дней позднее (рис. 16.3).

Как видно, вплоть до точки *D* параметры процесса укладывались в допустимые пределы. Однако за точкой *D* процесс полностью отклонился от требуемых

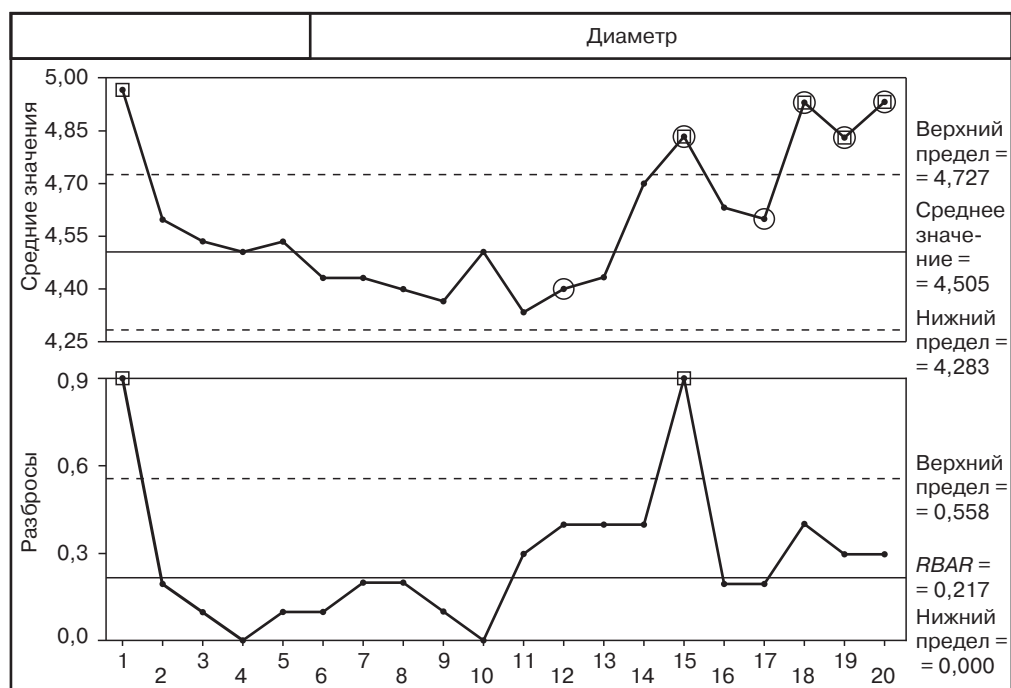


Рис. 16.3. Карта контроля качества, из которой виден выход параметров за допустимые пределы, связанный с колебаниями перерабатываемого материала

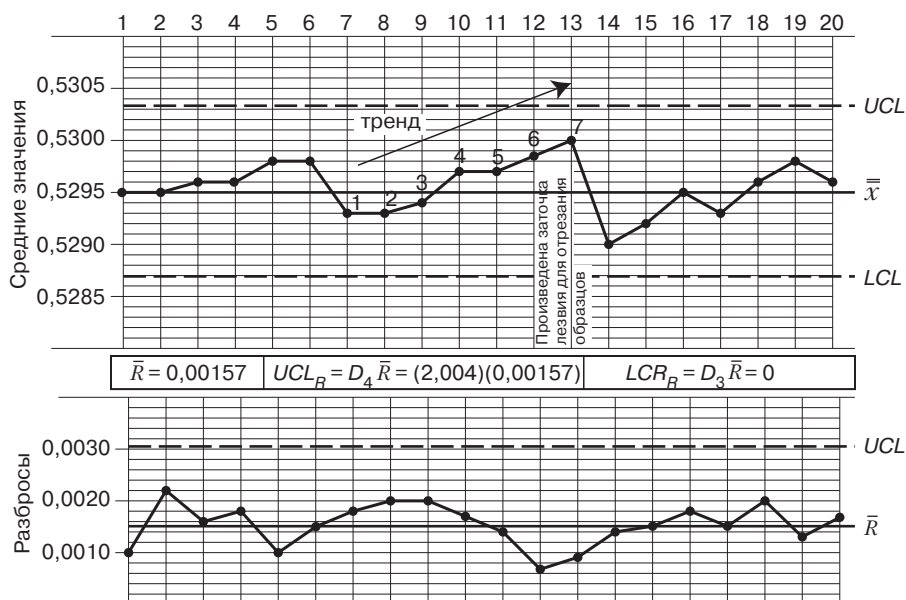


Рис. 16.4. Карта качества для параметра \bar{x} , показывающая тренд в его изменении

параметров. Небольшое обследование показало, что в точке D произошла замена сырья — полиэтилена высокой плотности — на материал иной марки с несколько отличным индексом расплава от нового поставщика. Именно различия в характеристиках используемого сырья привело к столь значительному отклонению измеряемых параметров.

На рис. 16.4 показана карта контроля качества для параметра \bar{x} , на которой отчетливо видна определенная тенденция (тренд) в его изменении. Анализ причин возникновения такого тренда привел к выводу, что он связан с износом инструмента. Небольшое, но постоянно возрастающее увеличение толщины стенки прослеживалось в течение длительного времени.

Из вышеизложенного обсуждения ясно, что правильная интерпретация карт контроля качества позволяет сделать осмысленные выводы относительно понимания роли перерабатывающего оборудования, технологии процесса и качества используемого инструмента.

Б. Карты контроля оценок характерных признаков

Под характерным признаком («атрибуцией») понимают такую характеристику или свойство продукта, которая может быть оценена как соответствующая или несоответствующая предъявляемым требованиям [4]. При составлении карт качества, в которых представляются данные по рассматриваемому признаку, указывается только наличие или отсутствие данного признака или дефекта. Наиболее часто используемые приспособления для оценки характерного признака — это мерительный инструмент, который дает ответ в терминах «Да» или «Нет». В отличие от карт качества,

в которых действительно представлены результаты измерений, при составлении карт по характерному признаку в качестве оцениваемого параметра используется количество бракованных изделий или отношение количества бракованных изделий к их общему количеству.

Некоторые простые примеры, иллюстрирующие этот подход, — это наличие или отсутствие прогаров, раковин или недоливов в изделиях, качество нарезки — рассмотрение дефектов такого рода позволяет сказать, годятся ли детали для дальнейшего использования или нет. К числу таких характеристик относится и цвет изделия, визуальная оценка которого показывает, удовлетворяет ли цвет предъявляемым требованиям или нет.

Такой тип контроля продукции совершенно незаменим, в особенности когда речь идет о производстве огромных количеств изделий, когда измерения параметров индивидуальных образцов становятся непрактичным, требующими больших затрат времени и средств. Контроль по конкретным характеристикам качества также незаменим, когда технология измерений связана с разрушением изделия. Одно из важнейших преимуществ таких карт состоит в их простоте и легкости восприятия, независимо от квалификации обслуживающего персонала.

P-карты. Одним из наиболее общеупотребительных вариантов карт контроля качества по характерному признаку является представление данных по проценту брака, или так называемые *P-карты*. Такие карты строятся на основании результатов анализа достаточно большого количества изделий. Наиболее удобным количеством является 60 или 100 образцов. Далее оценивается количество некачественных изделий, и рассчитывается процент брака в серии образцов P , средний процент брака по общему количеству образцов в ряде партий \bar{P} , а также верхний UCL и нижний LCL пределы процента брака в различных партиях:

$$P = \frac{\text{Количество бракованных образцов в партии}}{\text{Количество обследованных образцов}};$$

$$\bar{P} = \frac{\text{Сумма процента брака во всех исследованных партиях}}{\text{Общее количество исследованных образцов}};$$

$$UCL = \bar{P} + 3\sqrt{\frac{\bar{P}(1-\bar{P})}{n}};$$

$$LCL = \bar{P} - 3\sqrt{\frac{\bar{P}(1-\bar{P})}{n}}.$$

Если при таком расчете значение LCL получается отрицательным (меньшим нуля), то на карте качества оно принимается равным нулю, так как процент бракованных изделий не может быть меньше нуля.

C-карты. Этот тип карт, известный также под названием «*C-bar*» карты, представляет собой особый тип карт контроля качества по характерному признаку. В отличие от *P*-карт, которые представляют процент бракованных изделий, *C*-карты характеризуют число обнаруженных дефектов в расчете на единицу выпущенной продукции.

Например, черное пятнышко и глубокая раковина — это два разных дефекта для *C*-карты, но один дефект для *P*-карты, поскольку вне зависимости от того, обнаружен ли один или два дефекта в изделии, это одно изделие признается бракованным.

Верхний и нижний пределы по контролируемому параметру для *C*-карт рассчитываются по формуле

$$\text{Предел отклонения} = \bar{C} \pm 3\sqrt{\bar{C}},$$

где \bar{C} — величина, отвечающая средней линии на *C*-карте.

16.2.2. Метод отбора проб

Метод отбора проб играет важную роль при статистическом анализе качества продукции. Техника отбора проб должна дать случайную выборку образцов из данной партии, которая, основываясь на результатах анализа этой выборки, позволила бы сказать, следует ли принять или отвергнуть данную партию продукции.

В противоположность мнению, что только 100 %-ный контроль позволяет на 100% оценить качество, такой подход не только непрактичен, но и нереалистичен и неэффективен, и, кроме того, невозможен, если контроль связан с разрушением изделия. Правильный отбор образцов для анализа не только снижает стоимость процедуры контроля качества, но и обеспечивает более надежную оценку, поскольку исключает фактор усталости и скуки при контроле. Здесь, однако, необходимо понять, что метод отбора проб — это не сам «контроль качества», а лишь способ выполнения определенных действий. Основываясь на плановом отборе проб, контролер приходит к заключению о том, следует ли принять или вернуть данную партию товара.

А. Теория методики отбора проб

Разработка методики отбора проб основана на необходимости придти к компромиссу между желанием потребителя иметь абсолютно качественный товар и невозможностью для производителя производить идеальный продукт из-за ограниченных возможностей и колебаний параметров в ходе технологического процесса. Поскольку в принципе невозможно иметь ноль процентов брака, следует согласиться с некоторой приемлемой величиной процента некачественной продукции. Теоретически план отбора проб должен позволить отклонить все партии, в которых стандартное отклонение от предъявляемых требований выше согласованных требований, и принять все партии, в которых этот показатель не превышает этого отклонения.

На рис. 16.5 показана диаграмма, соответствующая такой идеальной методике отбора проб.

Согласно этому плану, все партии, в которых содержатся более 5% бракованных изделий, должны быть отбракованы, а все партии, в которых процент брака меньше 5%, должны быть приняты. Между тем выполнение такого плана, в котором в любое время проводится столь четкое разграничение между отбракованными и принимаемыми партиями, невозможно. Даже при 100 %-ном контроле невозможно провести абсолютного разграничения между качественными и бракованными партиями продукции. Другими словами, всегда существует вероятность того, что качественная партия

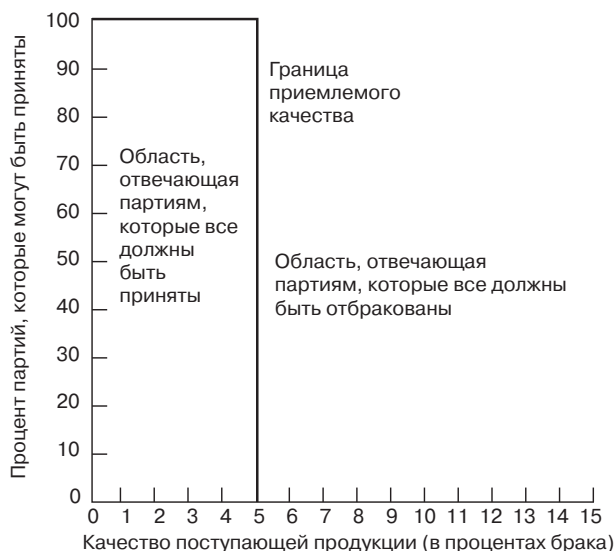


Рис. 16.5. Идеальный план отбора проб

будет забракована, а некачественная принята при любом плане отбора образцов. Чем меньше количество проанализированных образцов, тем выше вероятность ошибочных заключений. При этом вероятность правильной оценки тем выше, чем более высоко качество продукции, и она становится все меньше по мере ухудшения качества.

Этот факт является основой для построения графика, известного под названием операционной характеристической кривой. Обычно ее обозначают символом ОК. Такая кривая представляет собой зависимость качества поступающей продукции, выраженной в процентах бракованных партий, как функция от вероятности того, что партия, отобранная в соответствии с принятым планом, окажется качественной. Партия, в которой нет бракованных изделий, принимается всегда. Напротив, партия, в которой содержится 100% бракованных изделий, не может быть принята никогда.

В зависимости от плана отбора проб и качества поступающей продукции вероятность того, что данная продукция будет принята (или забракована) может возрастать или уменьшаться. Типичная операционная характеристическая кривая показана на рис. 16.6. Она отвечает количеству отбираемых проб, равному $n = 100$, и параметру приемлемости $c = 2$. В данном случае эти цифры означают следующее. Количество отбираемых проб равно 100, а максимально допустимое количество бракованных образцов равно 2.

Кривая, изображенная на рис. 16.6, показывает, что если в партии имеется 1% бракованных изделий, то в соответствии с условиями отбора проб ($n = 100$, $c = 2$), такая партия должна быть приемлема в 93% случаев. Если же было обнаружено 5% бракованных изделий, то можно ожидать, что такой товар окажется приемлемым лишь в 12% случаев. Очевидно, что для каждого плана отбора проб получается своя характеристическая кривая, устанавливающая вероятность риска получения бракованного товара.

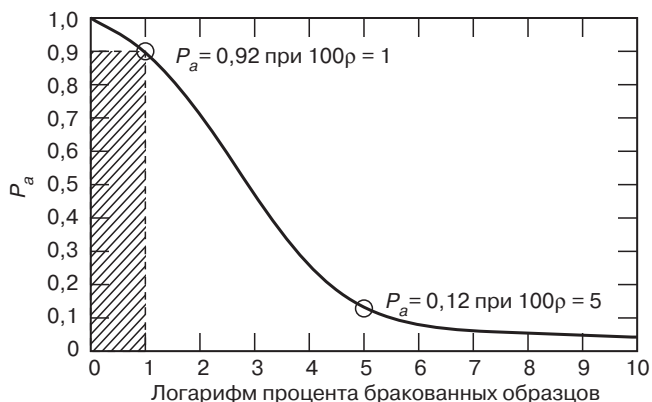


Рис. 16.6. Типичная операционная характеристическая кривая (воспроизведено с разрешения Richard D. Irwin, Inc.)

На операционной характеристической кривой можно выделить две точки, которые условно относятся к областям, в которых продукция является неприемлемой или бракованной. Они трактуются как (а) риск производителя и (б) риск потребителя. Под риском производителя понимается вероятность того, что будет забракован качественный товар. Любой производитель стремится к тому, чтобы этот риск был как можно меньше. Под риском потребителя имеется в виду вероятность того, что принятая продукция окажется некачественной. Это вероятность того, что принятый товар окажется неудовлетворительного качества и должен быть возвращен производителю.

Потребитель может быть вынужден возвращать забракованную продукцию производителю очень часто, если в соответствии с принятым им планом контроля риск производителя будет высоким.

Баланс между рисками производителя и потребителя устанавливается из экономических соображений.

Б. Типы планов отбора проб

Наиболее часто используют три плана отбора проб:

- однократный;
- двукратный;
- многократный.

Однократный отбор проб. Этот план отбора проб применяют тогда, когда есть уверенность в том, что результаты анализа дадут достаточно оснований для суждения о качестве продукции. Партия считается удовлетворительного качества, если количество принятых образцов AC не ниже установленной нормы и, соответственно, количество забракованных образцов, RE , не превышает допустимого уровня.

Двукратный отбор проб. Этот план отбора проб применяют, если в результате первичной инспекции было принято соответствующее решение провести повторную проверку партии. Окончательное решение о приемке или отбраковке партии принимается

Количество партий	Отбор проб	Количество образцов, отбираемых из партии	Общее количество образцов	1% АС	Продолжение РС
2–8	Первичный	2	2	0	1
9–15	Первичный	3	3	0	1
16–25	Первичный	5	5	0	1
26–50	Первичный	8	8	0	1
51–90	Первичный	13	13	0	1
91–150	Первичный	20	20	0	1
151–280	Повторный	20 20	20 40	0 1	2 2
281–500	Повторный	32 32	32 64	0 1	2 2
501–1200	Повторный	50 50	50 100	0 3	3 4
1201–3200	Повторный	80 80	80 160	1 4	4 5
3201–10,000	Повторный	125 125	125 250	2 6	5 7
10001–35000	Повторный	200 200	200 400	3 8	7 9
35001–150000	Повторный	315 315	315 630	5 12	9 13

Рис. 16.7. План двукратного отбора проб

после повторной инспекции. На рис. 16.7 приведен типичный пример плана двукратного отбора проб, а на рис. 16.8 показана процедура принятия решений.

Множественный отбор проб. Этот метод является дальнейшим развитием метода двукратного отбора проб. Испытания продолжают до тех пор, пока количество забракованных образцов продолжает оставаться в пределах между значениям АС и RE.

В. Классификация планов отбора проб

Все планы отбора проб делятся на три категории:

- план «Допустимый уровень качества партии» (*AQL, Acceptable Quality Level*);
- план «Допустимый процент брака в партии» (*LTPD, Lot Tolerance Percent Defective*);
- план «Предел среднего уровня выходного качества» (*AOQL, Average Outgoing Quality Limit*).

Детальное рассмотрение всех этих планов выходит за рамки задач настоящей книги. Ниже будет рассмотрен только план первый отбора проб.

Г. План отбора проб ДУКП

План отбора проб «Допустимый уровень качества партии» (ДУКП) определяется как оценка максимального процента бракованных изделий, устанавливаемая как среднее значение для данного технологического процесса. Если говорится о 4% ДУКП,

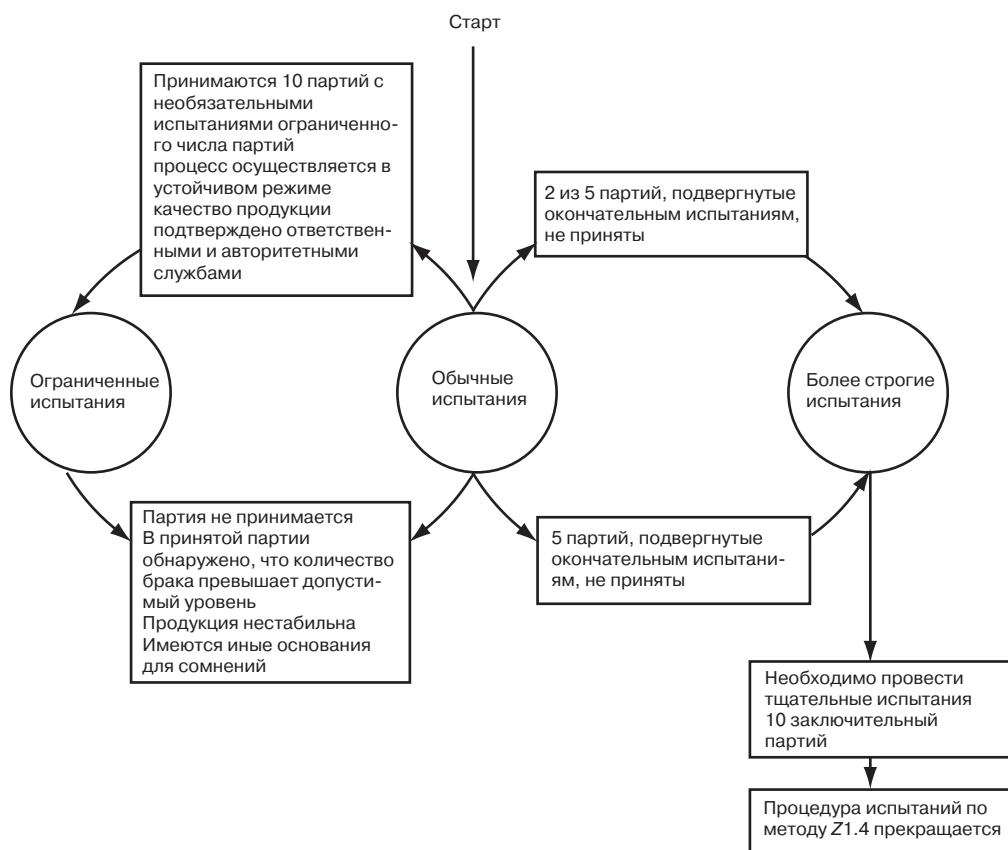


Рис. 16.8. Процедура принятия решений

то это означает, что процент брака не должен превышать 4%. Реализация этого плана направлена на то, чтобы избавить поставщика от опасности возврата качественного товара. Риск для потребителя получить некачественный товар определяется по операционной характеристической кривой для плана ДУКП. Если установленный риск производителя при поставке продукции составляет 5%, то вероятность получения партий качественного товара равен 95%. Для 2% плана ДУКП отбраковка составляет 2% и при этом принимается 95% товара.

План отбора проб ДУКП наиболее широко применяется в промышленности и при государственной приемке.

Наиболее хорошо известное описание плана ДУКП содержится в публикации *Sample Producers and Table for Inspection by Attributes MIL-STD-105 E*. В 1995 г. правила приемки *ANSI/ASOC Z1-4* заменены на *MIL-STD-105 E* с минимальными изменениями.

Д. Использование таблиц

При использовании таблиц, по которым производится отбор проб, рекомендуется применять следующую процедуру.

1. Определите размер партии.
2. Выберите и установите уровень контроля; если этот уровень заранее не оговорен, то выберите уровень II. В некоторых компаниях выбор уровня контроля основывается на предшествующем опыте. Так, если поставщик в прошлом обычно поставлял качественный товар, то можно ограничиться уровнем I (сокращенный объем контроля). Уровень контроля III применяется, если в прошлом поставлялся во многих случаях в основном «плохой» товар. Специальные уровни контроля — от S-1 до S-4 применяют, если речь идет о дорогостоящей продукции или если оценка качества основывается на разрушающих испытаниях изделий, или если производится оценка продукции, которая представляет собой репрезентативные образцы.
3. По табл. 16.2 определите буквенный код принимаемой методики испытаний.
4. Выберите план отбора образцов согласно договоренности. Если предварительные условия не оговорены, то используйте метод однократного отбора проб.
5. Исходя из согласованного уровня контроля, буквенного кода методики, плана отбора проб и установленных значений по плану ДУКП определите значения долей приемлемого и отбраковываемого товара. Если значения показателя по плану ДУКП не оговорены, то начните с уровня брака, равного 2,5%.

Пример. Основываясь на следующей информации, определите размер образцов и доли приемлемой и бракованных партий при (1) однократном и (б) двукратном методе отбора проб.

Таблица 16.2. Размеры партии и буквенные коды

Размеры партий или лотов	Специальные уровни контроля				Обычные уровни контроля		
	S-1	S-2	S-3	S-4	I	II	III
2–8	A	A	A	A	A	A	B
9–15	A	A	A	A	A	B	C
16–25	A	A	B	B	B	C	D
26–50	A	B	B	C	C	D	E
51–90	B	B	C	C	C	E	F
91–150	B	B	C	D	D	F	G
151–280	B	C	D	E	E	G	H
281–500	B	C	D	E	F	H	J
501–1,200	C	C	E	F	G	J	K
1201–3200	C	D	E	G	H	K	L
3201–10000	C	D	F	G	J	L	M
10001–35000	C	D	F	H	K	M	N
35001–150000	D	E	G	J	L	N	P
150001–500000	D	E	G	J	M	P	Q
500001 и более	D	E	H	K	N	Q	R

Размер партии: 1000 единиц.

Уровень контроля; нормальный.

ДУКП: 1,0.

Решение. Из табл. 6.2 находим, что партии в размере 1000 единиц при уровне контроля II соответствует буквенный код *J*.

Далее:

1. По табл. 16.3 (для однократного отбора проб и уровня контроля II) находим, что в буквенном коде *J* и ДУКП, равном 1,0, количество образцов должно составлять при числе $AC = 2$ и числе $RE = 3$. Таким образом, положительное решение о приеме партий продукции должно приниматься, если количество брака не превышает 2, а решение об отбраковке — если количество брака составляет 3 или больше.
2. По табл. 16.4 для двукратного отбора проб и нормального уровня контроля находим, что в буквенном коде *J* и ДУКП, равном 1,0, количество образцов при первичных испытаниях должно составлять 50 и при этом $AC = 0$ и $RE = 3$.

Вторая серия должна содержать 50 образцов и для обеих серий $AC = 3$ и $RE = 4$.

При этом следует придерживаться такой методики. Положительное решение о приеме партий продукции должно приниматься, если количество брака равно 0, а решение об отбраковке — если количество брака составляет 3 или больше. Если же количество брака лежит между 0 и 3, например, равно 2, то по результатам повторных испытаний положительное решение о приеме партий продукции должно приниматься, если количество брака не превышает 3, а решение об отбраковке — если количество брака составляет 4 или больше.

Е. План отбора проб ДПБП

План «Допустимый процент брака в партии» (ДПБП) определяется как план отбора образцов, согласно которому устанавливается допустимый предел брака, которая представляет собой некую границу между партиями удовлетворительного и неудовлетворительного качества. Показатель 2, согласно ДПБП, означает, что, как правило, отбраковывается 2% партий. Если риск потребителя (согласно этому плану) принимается равным 10%, то это означает, что вероятность отклонения таких партий по плану ДПБП составляет 90%. Так, например, если показатель по плану *LTPD* равен 6, то в продукции содержится 6% брака в течение 10% времени, в течение которого осуществляется контроль, и в течение этого же времени отбраковывается 90% партий.

Ж. План отбора проб ПСУВК

План отбора проб «Предел среднего уровня выходного качества (ПСУВК) подразумевает усредненную оценку качества при выходном контроле всей продукции, включая все принятые партии и все отбракованные партии после того, как для всех отбракованных партий была произведена 100%-ная проверка, и все бракованные образцы были заменены на качественные изделия. Допустимый предел по плану ПСУВК определяется как максимально возможный показатель качества для всех оцениваемых входных величин при выбранном плане контроля. Другими словами ПСУВК определяет наихудшее допустимое качество продукции, оцениваемое в течение длительного времени.

Так, например, показатель 2,5 по плану ПСУВК означает, что мы должны быть уверены, что в продукции, поступающей в течение длительного времени, уровень брака не превышает 2,5%.

План отбора проб ПСУВК предложен для того, чтобы на определенном уровне защитить потребителя от риска получения некачественной продукции. Это план подразумевает малую вероятность приема бракованной продукции, если ее качество превышает требуемый показатель по плану ПСУВК.

16.23. Возможности технологического процесса

А. Введение

Под возможностями технологического процесса понимается способность получения стабильного продукта, отвечающего предъявляемым требованиям, несмотря на вариации технических параметров. Возможности процесса могут быть установлены только на основании его статистического анализа. Это осуществляется путем исключения всех регулируемых факторов при сохранении обычных случайных возмущений. Устойчивость процесса состоит в том, что на технологической карте отсутствуют точки, выходящие за допустимые пределы отклонения параметров, и при этом отсутствуют нестатистические колебания или тренды в изменении контролируемых параметров даже в установленных пределах.

Таблица 16.3. План однократного отбора проб при нормальном уровне контроля

Бук- венный код	Размер партии	Приемлемые уровни качества (обычный уровень контроля)													
		0,010		0,015		0,025		0,040		0,065		0,10		0,15	
		п	б	п	б	п	б	п	б	п	б	п	б	п	б
A	2	↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓	
B	3														
C	5														
D	8	↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓	
E	13														
F	20														
G	32	↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓	
H	50														
J	80														
K	125	↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓	
L	200														
M	315														
N	500	↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓	
P	800														
Q	1250														
R	2000	↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓	

↓ — используйте сначала план отбора проб выше стрелки; если рекомендуемое количество образцов равно или превосходит количество изделий в партии, примените 100% контроль;

↑ — используйте сначала план отбора проб ниже стрелки;

п — условие приемлемости партий;

б — условие отбраковки.

Таблица 16.4. План двукратного отбора проб при нормальном уровне контроля

Бук- венный код	Образец	Размер партии	Общее коли- чество образ- цов	Приемлемые уровни качества (обычный уровень контроля)																																																																																																											
				0,010	0,015	0,025	0,040	0,065	0,10	0,15	0,25	0,40	0,65	1,0																																																																																																	
				П Б	П Б	П Б	А Б	П Б	П Б	П Б	П Б	П Б	П Б	П Б	П Б																																																																																																
A				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																																																																																		
B	Первич. Вторич.	2 2	2 4											↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																																																																									
C	Первич. Вторич.	3 3	3 6																																																																																																												
D	Первич. Вторич.	5 5	5 10																																																																																																												
E	Первич. Вторич.	8 8	8 16																				↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																																																																
F	Первич. Вторич.	13 13	13 26																													↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																																																							
G	Первич. Вторич.	20 20	20 40																																						↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																																														
H	Первич. Вторич.	32 32	32 64																																															↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																																					
J	Первич. Вторич.	50 50	50 100																																																								↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																												
K	Первич. Вторич.	XO 80	80 160																																																																	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																			
L	Первич. Вторич.	125 125	125 250																																																																										↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																										
M	Первич. Вторич.	200 200	200 400																																																																																			↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																	
N	Первич. Вторич.	315 315	315 630																																																																																												↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓								
P	Первич. Вторич.	500 500	500 1000	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																																																																																			
Q	Первич. Вторич.	800 800	800 1600										↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓																																																																																										
R	Первич. Вторич.	1250 1250	1250 2500																			↓																																																																																		↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Первич. – Первичные испытания;

Вторич. – Повторные испытания;

↓ – используйте сначала план отбора проб выше стрелки; если рекомендуемое количество образцов равно или превосходит количество изделий в партии, примените 100%-ный контроль;

↑ – используйте сначала план отбора проб ниже стрелки;

n – условие приемлемости партий;

б – условие отбраковки;

* – используйте соответствующий план однократного отбора проб (или же в случае необходимости план двукратного отбора проб).

Приемлемые уровни качества (обычный уровень контроля)																															
1,5		2,5		4,0		6,5		10		15		25		40		65		100		150		250		400		650		1000			
П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б	П	Б		
↓		↓		↓		✱		↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓		↓			
				✱		↑				0 1 2 2		0 3 3 4		1 4 4 5		2 5 6 7		3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		17 22 37 38		25 31 56 57			
		✱		↑		↓		0 1 2 2		0 3 3 4		1 4 4 5		2 5 6 7		3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		17 22 37 38		25 31 56 57				↑	
✱		↑		↓		0 1 2 2		0 3 3 4		1 4 4 5		2 5 6 7		3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		17 22 37 38		25 31 56 57				↑			
↑		↓		0 1 2 2		0 3 3 4		1 4 4 5		2 5 6 7		3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		↑		↑		↑				↑			
0 1 2 2		0 3 3 4		1 4 4 5		2 5 6 7		3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		↑		↑		↑		↑				↑					
0 3 3 4		1 4 4 5		2 5 6 7		3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		↑		↑		↑		↑		↑				↑					
1 4 4 5		2 5 6 7		3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		↑		↑		↑		↑		↑		↑				↑					
2 5 6 7		3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑				↑					
3 7 8 9		5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑				↑					
5 9 12 13		7 11 18 19		11 16 26 27		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑				↑					
7 11 18 19		11 16 26 27		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑				↑					
11 16 26 27		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑				↑					
↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑		↑				↑					

полученных картах нет выбросов за пределы допустимых границ разбросов данных, и не наблюдается какого-либо тренда в изменении рассматриваемых характеристик, то стабильность такого технологического процесса может быть количественно оценена с помощью определенных статистических показателей.

Если ставится задача определения стабильности процесса по отношению к тем или иным показателям качества, то требуется, чтобы в 300 последовательных изделиях, проверенных последовательно, не было обнаружено дефектов, по отношению к которым оценивается качество продукции.

В. Индекс устойчивости процесса, C_{pk}

Индекс C_{pk} представляет собой статистическую оценку, которая позволяет указать на стабильность процесса по отношению к допустимым границам разброса тех или иных показателей. Этот индекс показывает, возможно ли с помощью рассматриваемого процесса производить продукцию требуемого качества.

Под индексом устойчивости процесса понимает наименьшую из двух следующих величин:

$$(a) \frac{USL - \bar{X}}{3\sigma} ; (б) \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma}.$$

Если $C_{pk} = 1$, то это означает, что в одном миллионе изделий можно ожидать появления 2700 штук бракованных изделий. Даже значение $C_{pk} = 1,5$ рассматривается как прекрасный показатель качества. Значение $C_{pk} = 2$ показывает, что можно ожидать появления 3–4 бракованных изделий в партии из одного миллиона штук. Значение индекса устойчивости процесса, равное 1,33, обычно принимается как минимально допустимый уровень. Целью любого производителя является достижение значения $C_{pk} = 2,0$.

Если указанный выше критерий не достигается, то необходимо проводить контроль всех 100% изделий. При этом инженерные службы производителя должны будут провести тщательное обследование контроля для выявления причин недопустимого разброса показателя качества изделий. До тех пор пока эти причины не устранены, следует продолжать контроль всех 100% выпускаемых изделий.

Поскольку 100 %-ный контроль неэффективен с экономической точки зрения и не дает гарантий в отбраковке дефектной продукции, такой подход должен рассматриваться лишь как срочная временная мера, но ни в коем случае ни как нормальный метод контроля технологического процесса.

Указанный выше критерий следует рассматривать как минимально допустимый уровень, так что следует принимать меры для улучшения этого показателя.

После того как были достигнуты требуемые показатели качества и продемонстрирована устойчивость процесса, необходимо принять решения относительно дальнейшего использования этого процесса и приемки готовой продукции, как это представлено в табл. 16.5.

Таблица 16.5. Исследование процесса

Значения индекса устойчивости процесса C_{pk}			
Процесс находится под контролем	Значение C_{pk} меньше 1,00. Проверяется 100% изделий	Значение C_{pk} лежит в диапазоне 1,00–1,33 Изделия принимаются	Значение C_{pk} превышает 1,33. Изделия принимаются
Процесс не контролируется	Непрерывная проверка всех 100% изделий	Сортируются изделия, начиная с последнего, которое проверялось	Изделия принимаются
Идентификация и исправления в специальных случаях			
Процесс не контролируется и одна или несколько точек выходят за допустимые пределы		Идентификация и исправления в специальных случаях; сортируются изделия, начиная с последнего, которое проверялось	

16.4.2. Компьютеризированный сбор данных и их анализ

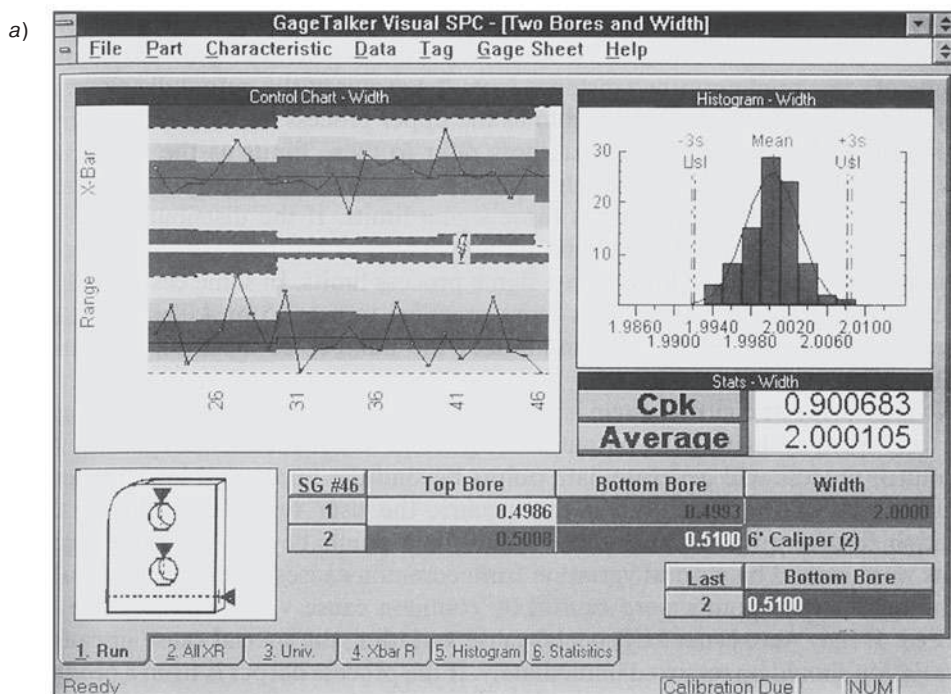
Сбор и обработка экспериментальных данных перестали быть утомительной процедурой с тех пор, когда стали доступными персональные компьютеры и программное обеспечение *SPC/SOC*. Единственное, что требуется от оператора — это ввести исходные данные либо вручную, либо с помощью автоматических датчиков, соединенных с компьютером. Данные анализируются путем представления разброса данных, технологических карт, расчета значений сигма, определения индекса устойчивости, построения гистограмм или иных статистических методов. Визуально обнаруживаемые дефекты анализируются по методам оценки качества, и результаты представляются количественно или в виде технологических карт.

На рис. 16.9, а показан типичный вид изображения, получаемого с помощью программного обеспечения *SPC/SOC*.

16.3. Введение в статистический контроль процесса

16.3.1. Цель статистического контроля параметров

Целью статистического контроля параметров процесса (*SPC, Statistical Process Control*) является оценка протекания процесса в правильном режиме, или, если процесс становится неуправляемым, подать сигнал. Процесс, находящийся под контролем, обеспечивает получение качественного продукта. В таком случае можно с уверенностью полагать, что и в дальнейшем будут получаться изделия необходимого качества. Если же процесс выходит из-под контроля, то мы не можем ничего сказать о том, каким в дальнейшем будет качество продукта. Если процесс осуществляется в правильном режиме, то не следует ничего предпринимать, поскольку процесс устойчив, и качество получаемой продукции лежит в требуемых пределах.



б)

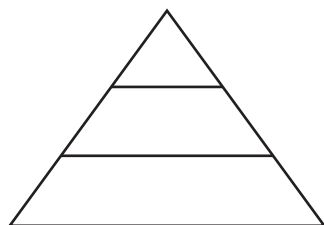


Рис. 16.9. а — результаты компьютерной обработки данных обследования процесса с помощью программного обеспечения *SPC/SOC* (с разрешения *Gagetalker CimWorks*); б — показаны также три возможных уровня статистического контроля процесса

Если же процесс устойчив, но качество получаемой продукции не удовлетворяет предъявляемым требованиям, то необходимо: а) усовершенствовать сам процесс; б) изменить процесс, чтобы он стал еще более устойчивым; в) ослабить жесткость предъявляемых требований.

Если процесс выходит из-под контроля, то необходимо исследовать условия, при которых это произошло. Если действительно нарушены установленные условия ведения процесса, то необходимо остановить производство и зафиксировать наблюдаемые условия, и затем предпринять необходимые меры с тем, чтобы это не повторилось. В сущности, метод *SPC* говорит нам только о том, что следует предпринять какие-либо действия, или же все в порядке и делать ничего не нужно.

16.3.2. Условия контролируемого и неконтролируемого процесса

Процесс осуществляется в контролируемом режиме тогда, когда его результаты соответствуют нормальному распределению. Если же качество продукции не отвечает нормальному распределению, то это трактуется как выход процесса из-под контроля или же работа в неконтролируемом режиме.

Можно выделить три основные категории неконтролируемого ведения процесса.

Случай №1 выхода процесса из-под контроля: выбросы

Этот случай отвечает ситуации, когда параметры готовой продукции смещены относительно заранее установленного допустимого расстояния от центра распределения. Эти пределы иногда определяются как допустимые верхний (*UPL*) и нижний (*LPL*) пределы отклонений. Некоторые авторы трактуют эти величины как естественные верхний и нижний пределы технологического процесса. Однако выбор этих пределов произволен. Обычно принимается, что они равны плюс/минус утроенной сигме. Если распределение оцениваемого показателя процесса нормальное, то в этом случае 99,74% случаев для этого показателя лежит между верхним и нижним пределами. В некоторых случаях для исключительно устойчивых процессов имеет смысл принимать значения пределов, равными 3,5 или 4, вместо 3 сигма. В этом случае количество неверных сигналов об отклонениях от заданной нормы становится минимальным.

Не существует совершенных измерительных систем. На практике выбор должен делаться между затратами времени и стоимостью процедуры оценки с тем, чтобы минимизировать потери. При контролируемом ведении процесса количество выбросов за пределы верхнего и нижнего пределов не должны превышать 0,26%. Если происходят выбросы, то потребитель должен провести исследование и установить, были ли эти выбросы за пределы 3-х сигм естественными для рассматриваемого процесса, или же они были связаны с посторонними причинами. Если эти выбросы происходят в ходе нормального ведения процесса, то их следует проигнорировать. Если же они произошли из-за каких-либо особых причин, то эти причины следует немедленно устранить. Если выбросы измеряемых параметров произошли при стационарной работе производственной линии, то работу линии следует сразу же остановить, и не включать ее до тех пор, пока не будут устранены причины, вызвавшие сбой. Как правило, прежде всего менеджмент несет ответственность за устранение причин, вызвавших сбой в работе. Устранение таких причин возлагается на операторов и мастеров, наблюдающих за ведением процесса.

Случай № 2 выхода процесса из-под контроля: отклонения от нормального распределения

Вторая ситуация выхода процесса из-под контроля выражается в отклонении распределения оцениваемых параметров от нормального распределения, представляемого в виде колоколообразной кривой. Если распределение между пределами в 3 сигма выражается плоской прямой, то оно является однородным. Такое распределение отлично от колоколообразной кривой, отвечающей нормальному распределению. Появление однородного распределения указывает на то, что процесс происходит

в неконтролируемом режиме. Существует множество причин, по которым распределение измеряемого параметра оказывается отличным от нормального распределения.

Случай № 3 выхода процесса из-под контроля: изменения во времени

Третья форма неустойчивости процесса проявляется в виде систематических изменений показателей процесса во времени. Это может относиться к различным параметрам, которые либо возрастают, либо убывают со временем, так что имеет место четко выраженный тренд. Если возникает такое явление, то необходимо заново переустановить параметры технологического процесса.

16.3.3. Статистический контроль параметров. Устойчивость процесса и качество продукта

С точки зрения производителя понятие о качестве продукции означает, что: а) продукт получается таким, каким он спроектирован; б) колебания показателей свойств минимальны; в) продукция отвечает спецификации. Метод *SPC* направлен на контроль первого из этих условий. Определение устойчивости процесса предназначается для оценки того, насколько хорошо выполняется третье из перечисленных условий. При этом измеряются средние показатели процесса (*X*-показатели). Эти величины сравниваются с заданными показателями для того, чтобы оценить, насколько продукт соответствует заданным величинам в среднем. Метод *SPC* также позволяет судить о разбросе показателей продукции, что оценивается величинами разброса (*R*) и стандартного отклонения (*s*). Значения параметров *R* и *s* в той же мере характеризуют устойчивость процесса, что и разброс измеряемой величины *X*. Прежде чем оценивать изменение *X*, следует проконтролировать изменения параметров *R* и *s*.

Исследования устойчивости технологического процесса используются для определения того, какая часть области допуска на изменение параметров реализуется в конкретных случаях. Величина C_p характеризует долю допуска для ситуации, в которой процесс колеблется вокруг некоторого среднего уровня. Величина C_{pk} играет аналогичную роль, но для ситуации, в которой нельзя построить средней линии для процесса. Характеристики C_p и C_{pk} относятся к случаю, когда можно считать, что процесс находится под контролем, а характеристика P_{pk} , аналогичная по смыслу C_{pk} , применяется для процесса, который не находится под контролем.

16.3.4. Техника статистического контроля параметров

Статистический контроль параметров процесса может осуществляться либо в числовом, либо в графическом виде, либо можно совмещать оба подхода. Использование компьютерного программного обеспечения стало совершенно обычным приемом, позволяющим производить все необходимые вычисления.

16.3.5. Уровни статистического контроля параметров

Статистический контроль параметров (*SPC*) — это общий термин, включающий многие аспекты и в частности, по крайней мере, три уровня контроля, представленные на

рис. 16.9, б. Верхний уровень (*SPFC*) — это статистический контроль характеристик продукции, который в этом смысле состоит в оценке достоверности получаемых параметров и их средних значений. Набор показателей в этом случае показывает, насколько хорошо изделие (или конструкция в целом) удовлетворяет предъявляемым требованиям. При этом могут рассматриваться такие характеристики (параметры), как скорость течения, потребляемая мощность или иные величины, которые действительно характеризуют процесс.

Промежуточный уровень на рис. 16.9, б представляет статистический контроль качества (*SQC*). Этот подход позволяет оценить, насколько средние измеряемые показатели свойств продукции (например, размеры изделий) соответствуют установленным показателям.

Нижний и наиболее фундаментальный уровень — это статистический контроль параметров процесса. В данном контексте под этим понимается, насколько выдерживаются основные заданные технологические параметры, такие как давление, температура, продолжительность отдельных стадий процесса, скорости, по отношению к их средним значениям.

Далее следует рассмотреть возможность одновременного исследования устойчивости технологического процесса и параметров, характеризующих качество продукции. Прежде всего изделия и собранные из нее конструкции рассматриваются методами статистического контроля характеристик продукции (*SPFC*).

Кроме всего прочего, качественные характеристики продукции — это то, что потребитель видит и ощущает. Как правило, статистический контроль характеристик продукции (*SPFC*) является дополнительным к статистическому контролю качества (*SQC*).

Следующий шаг в статистическом контроле характеристик продукции основан на предположении о том, что если конструктор создал хороший дизайн продукции, то производитель выпускает эту продукцию в соответствии с предъявляемыми требованиями, если технологический процесс осуществляется в соответствии со сделанными рекомендациями. Соответственно, фокус рассмотрения при контроле характеристик продукции сместится через контроль качества на анализ размеров изделия. Если говорить другими словами, то при изготовлении продукции согласно спецификации нет необходимости проводить испытания по контролю характеристик продукции (*SPFC*). При таком подходе экономятся время, затраты и усилия.

Следующий шаг в оценке статистического контроля параметров основан на предположении, что если все параметры процесса поддерживаются в заданных границах, то и получаемое изделие будет отвечать разработанной спецификации. Соответственно, фокус при таком контроле смещается в сторону определения технологических параметров, таких как давление, температура, продолжительность, скорость.

Для контроля технологического процесса и поддержания параметров в заданных рамках часто используют систему обратной связи, что позволяет снизить колебания свойств получаемой продукции. При статистическом контроле характеристик продукции предполагается, что если выбраны определяющие параметры технологического процесса и они поддерживаются в заранее определенных границах, то все изделия будут получаться в соответствии со спецификацией, установленной конструктором.

Это исключает необходимость в проведении статистического контроля качества (*SQC*), равно как и проведение статистического контроля характеристик продукции (*SPFC*).

16.4. Системы контроля качества

16.4.1. Контроль качества сырья

Любая хорошо функционирующая система контроля качества начинается с анализа поступающего сырья. Такая система должна удостоверить, что закупаемое сырье удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям. В большинстве случаев переработчик полагает, что поставщик гарантирует поставку материала всегда одного и того же качества. Если конечный продукт или конкретный процесс, в котором используется поставленное сырье, чувствительны к изменению материала — его качеству и однородности — такое доверие к поставщику может дорого обойтись в долгосрочной перспективе.

Для того чтобы убедиться в высоком качестве поставляемого сырья, необходимо выполнение следующих шагов.

1. Выбор поставщика. Первый шаг в системе контроля поставляемого сырья состоит в выборе поставщика, имеющего хорошую репутацию на рынке. В этом убеждают предыстория его работы на рынке, репутация в кругах промышленников и выполнение его обязательств в будущем. Необходимо проверить возможности поставщика контролировать качество поставляемой продукции. Для этого стоит ознакомиться с производственным процессом на предприятии поставщика, возможностями испытательного оборудования, частотой выполнения контрольных испытаний, процедурой испытаний, количеством материала, на котором проводятся испытания, и — что еще более важно — квалификацией персонала.

Все эти соображения особенно важны, если сырье закупается в компании, где происходит компаундирование материала, или же у неизвестного поставщика. Если материал предназначен для ответственного назначения и риск при этом велик, то надлежит заставить поставщика получить подтверждение (сертификацию) о том, что данное сырье удовлетворяет минимально необходимым требованиям для данного материала.

2. Входной контроль. Существует множество методов испытаний сырьевых материалов в зависимости от того, с какой мерой строгости потребитель подходит к оценке поступающего сырья. Эти методы варьируются от самых простых до очень сложных. Вот некоторые из основных методов — измерение индекса расплава, удельного веса, насыпной плотности, течения в спиральной форме, измерения вязкости разбавленных растворов. К числу более сложных и строгих методов, используемых в промышленности, относятся гель-проникающая хроматография, инфракрасная спектроскопия, термический анализ, реометрия. Эти методы были подробно обсуждены в главе 7. Некоторые переработчики предпочитают отливать небольшие образцы из поступающих партий сырья и испытывать их стандартными физическими методами, такими

как измерение предела прочности, прочности при ударных нагрузках, разрушение при изгибе. Полученные при этом результаты сравниваются со спецификацией на материал.

16.4.2. Контроль качества в ходе процесса

Контроль в ходе технологического процесса используется в основном как способ проверки того, продолжает ли перерабатываемый материал отвечать требованиям спецификации. Использование метода построения технологических карт позволяет непрерывно отслеживать ход процесса и оценивать, продолжает ли находиться процесс в установленных рамках или же наблюдается его выход из-под контроля. Постоянная инспекция непосредственно на производстве позволяет давать визуальную оценку и проверять стабильность размеров получаемых изделий.

16.4.3. Контроль качества продукции

Существуют два направления, по которым осуществляется контроль качества продукции. Во-первых, это входной контроль у потребителя, получающего партии изделий. Во-вторых, это контроль посторонней организацией, куда готовая продукция направляется перед поставкой потребителю. В обоих случаях используются принципы статистического контроля, основанные на выборе того или иного плана отбора проб. Может быть использован один из рассмотренных выше способов — ДУКП, ДПБП или ПСУВК.

Контроль качества готовой продукции включает в себя визуальный осмотр, измерения размеров, а в некоторых случаях и более полный объем испытаний. Следует обращать особое внимание на оценку готовой продукции. Предпочтительным при этом является испытание при моделировании реальных условий эксплуатации изделия, поскольку и оценка внешнего вида, и испытания на соответствие спецификации дают лишь ограниченное представление о качестве продукции в целом.

16.4.4. Визуальная оценка

Одна из причин огромного успеха изделий из полимерных материалов среди потребителей состоит в том, что их внешний вид, окраска и запах более привлекательны, чем у других материалов. В большинстве систем контроля качества визуальным характеристикам изделий уделяется совершенно недостаточно внимания. Очень часто слишком много усилий затрачивается на измерения и испытания изделий из полимеров, но совершенно недостаточно оценке их внешнего вида.

Дефекты, обнаруживаемые при внешнем осмотре изделий, такие как появление шероховатости, напоминающей по внешнему виду кожуру апельсина, шелушение, раковины, следы хладотекучести, довольно часто встречаются при осмотре полимерных изделий. Дефекты такого рода нетипичны для изделий, изготовленных из других материалов. Терминология, используемая в промышленности пластмасс для описания визуально обнаруживаемых дефектов, совершенно отлична от терминологии, применяемой в других областях промышленности. Идентификация дефектов

методами наружного осмотра изделий из пластмасс важна не только с эстетической точки зрения, но и говорит о качестве и прочностных свойствах изделий. Так, например, появление сколов на изделии свидетельствует о наличии влаги в материале, коричневые пятна указывают на начало деструкции. В обоих случаях дефекты такого рода приводят к ухудшению всех свойств материала.

Стандарты, в которых регламентируются результаты наружного осмотра изделий, должны включать основные определения и описание повторяющихся визуальных дефектов и сопровождаться ясными иллюстрациями. Поскольку дефекты такого рода трудно охарактеризовать количественно, например, такими показателями, как диаметр отверстия или толщина стенка, следует сформулировать некоторые критерии, которые должны позволять однозначно сказать, пригодно ли данное изделие или его следует отбраковать.

На рис. 16.10 и 16.11 приведены примеры страниц из инструкций стандартов, которые разработаны для визуальной оценки изделий.

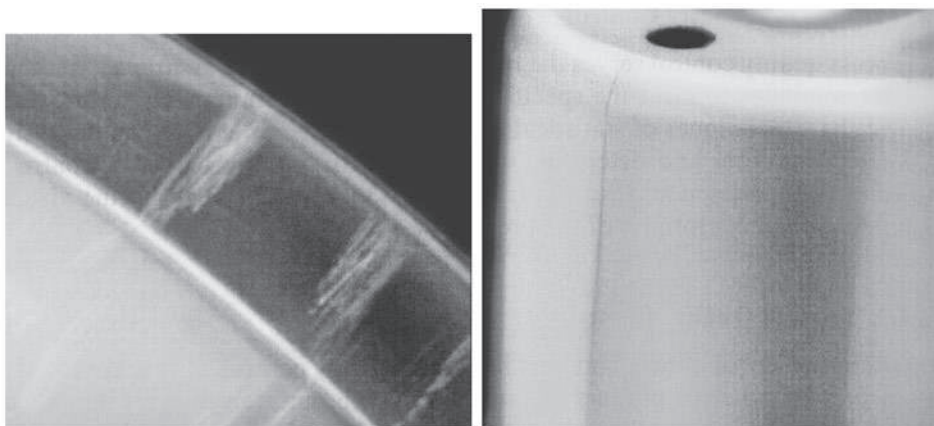


Рис. 16.10. Визуально обнаруживаемые дефекты

ШЕЛУШЕНИЕ, НАПОМИНАЮЩЕЕ ПО ВНЕШНЕМУ ВИДУ КОЖУРУ АПЕЛЬСИНА

Наилучший вариант

1. Дефекты, напоминающие по внешнему виду кожуру апельсина полностью отсутствуют

Приемлемо

1. Слабо выраженные дефекты типа кожуры апельсина на внутренней поверхности внешних деталей
2. Слабо выраженные дефекты типа кожуры апельсина на внешней поверхности внутренних деталей
3. Дефекты типа кожуры апельсина по величине не превосходят 0,25 дюйма по диаметру изделия

Неприемлемо

1. Дефекты типа кожуры апельсина на поверхностях, по которым происходит уплотнение
2. Дефекты типа кожуры апельсина размером больше 0,25 дюйма по диаметру изделия

Рис. 16.11. Критерии для принятия или отбраковки изделия

А) ОБЩЕСТВО ИНЖЕНЕРОВ, РАБОТАЮЩИХ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПЛАСТМАСС
СПЕЦИФИКАЦИЯ
ТРЕБОВАНИЙ К ВНЕШНЕМУ ВИДУ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Тип 2. Полированные, текстурированные изделия, чистые полупрозрачные			
ПОВЕРХНОСТИ	А	В	С
Линии спая и покраснения	Ограничения на то, насколько заметны линии спая и покраснения в местах спая, устанавливаются по согласованию между производителем и потребителем; допускается для ограниченного количества изделий		
РАКОВИНЫ	Не допустимы	Размер не должен превышать 0,005 дюйма	Размер не должен превышать 0,015 дюйма
КРАПИНКИ И ПУЗЫРИ			
Приемлемо если	Размер не превышает 0,010 дюйма, и они расположены на расстоянии не ближе 1 дюйма	Размер не превышает 0,010 дюйма, и они расположены на расстоянии не ближе 1 дюйма	Размер не превышает 0,015 дюйма, и они расположены на расстоянии не ближе 1 дюйма
Допустимая область размеров	0,010–0,030 дюймов; допустимо не более 1 дефекта на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ²	0,010–0,030 дюймов; допустимы не более 2 дефектов на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ² , расположенных на расстоянии не ближе 2 дюймов	0,015–0,040 дюймов; допустимы не более 3 дефектов на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ² , расположенных на расстоянии не ближе 1 дюйма
Неприемлемо, если	Размер превышает 0,030 дюймов	Размер превышает 0,030 дюймов	Размер превышает 0,040 дюймов
ЦАРАПИНЫ			
Приемлемо если	Длина не превышает 0,150 дюйма; допустимо не более 1 дефекта на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ²	Длина не превышает 0,200 дюйма; допустимо не более 1 дефекта на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ²	Длина не превышает 0,300 дюйма; допустимо не более 3 дефектов на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ² , расположенных на расстоянии не ближе 1 дюйма
Неприемлемо если	Длина превышает 0,150 дюйма	Длина превышает 0,200 дюйма	Длина превышает 0,300 дюйма

Рис. 16.12. А — Таблица, суммирующая возможные дефекты внешнего вида изделий; Б — Требования к внешнему виду изделий (из «Спецификации требований к внешнему виду изделий, получаемых методом литья под давлением»; с разрешения *Society of Plastics Industry, Inc.*).

Тип 2. Полированные, текстурированные изделия, чистые полупрозрачные

ПОВЕРХНОСТИ	A	B	C
СКОСЫ	Не допустимо	Не допустимо	Допускается для ограниченного числа изделий или как исключение по согласованной оценке качества
ПОДГАРЫ	То же	То же	
ГАЗОВЫЕ ПУЗЫРИ	“	“	
ПОБЕЛЕНИЕ	“	“	
КОЖУРА			То же
АПЕЛЬСИНА	“	“	
НЕОДНОРОДНАЯ	“	“	
ТЕКСТУРА	“	“	
ПИТИНГ	“	“	“
ТРЕЩИНЫ	“	“	“
МИКРОТРЕЩИНЫ	“	“	“
РАССЛОЕНИЕ	“	“	“
СЛЕДЫ НЕПРОПЛАВЛЕННОГО МАТЕРИАЛА	“	“	“

Б) ОБЩЕСТВО ИНЖЕНЕРОВ, РАБОТАЮЩИХ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПЛАСТМАСС
СПЕЦИФИКАЦИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ВНЕШНЕМУ ВИДУ ИЗДЕЛИЙ

Потребитель _____

Наименование изделия _____

Номер изделия _____

Утверждено (кем?) _____

Тип 2. Полированные, текстурированные изделия, чистые полупрозрачные

ПОВЕРХНОСТИ	A	B	C
ЛИНИИ СПАЯ И ПОКРАСНЕНИЕ	Ограничения на то, насколько заметны линии сварки и покраснения в местах сварки, устанавливаются по согласованию между производителем и потребителем; допускается для ограниченного количества изделий		
РАКОВИНЫ	Не допустимы	Размер не должен превышать 0,005 дюйма	Размер не должен превышать 0,015 дюйма
КРАПИНКИ И ПУЗЫРИ			
Приемлемо, если	Размер не превышает 0,010 дюйма, и они расположены на расстоянии не ближе 1 дюйма	Размер не превышает 0,010 дюйма, и они расположены на расстоянии не ближе 1 дюйма	Размер не превышает 0,015 дюйма, и они расположены на расстоянии не ближе 1 дюйма
Допустимая область размеров	0,010–0,030 дюймов; допустимо не более 1 дефекта на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ²	0,010–0,030 дюймов; допустимы не более 2 дефектов на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ² , расположенных на расстоянии не ближе 2 дюймов	0,015–0,040 дюймов; допустимы не более 3 дефектов на площади $4 \times 4 = 16$ дюймов ² , расположенных на расстоянии не ближе 1 дюйма
Неприемлемо, если	Размер превышает 0,030 дюймов	Размер превышает 0,030 дюймов	Размер превышает 0,040 дюймов

Тип 2. Полированные, текстурированные изделия, чистые полупрозрачные

ПОВЕРХНОСТИ	A	B	C
ЦАРАПИНЫ			
Приемлемо если	Длина не превышает 0,150 дюйма; допустимо не более 1 дефекта на площади 4×4 = 16 дюймов ²	Длина не превышает 0,200 дюйма; допустимо не более 1 дефекта на площади 4×4 = 16 дюймов ²	Длина не превышает 0,300 дюйма; допустимо не более 3 дефектов на площади 4×4 = 16 дюймов ² , расположенных на расстоянии не ближе 1 дюйма
Неприемлемо если	Длина превышает 0,150 дюйма	Длина превышает 0,200 дюйма	Длина превышает 0,300 дюйма
Скосы	Не допустимо	Не допустимо	Допускается для ограниченного числа изделий или как исключение по согласованной оценке качества
Подгары	То же	То же	
Газовые пузыри	“	“	
Побеление	“	“	
Кожура апельсина	“	“	
Неоднородная текстура	“	“	
Питинг	“	“	
Трещины	“	“	
Микротрещины	“	“	
Расслоение	“	“	
Следы непропавленного материала	“	“	

Окончание рис. 16.12

Сводка, суммирующая типичные виды визуально обнаруживаемых дефектов, приведена на рис. 16.12, А.

Отдел литья Общества инженеров, работающих в промышленности пластмасс (SPI), разработал спецификацию для оценки внешнего вида изделий, получаемых методом литья под давлением. Целью этой работы было создание системы количественных определений и рекомендуемых методов инспекции и измерений дефектов внешнего вида для случаев, когда такая спецификация отсутствует у потребителя. Предлагаемые требования и методы спецификации направлены на оценку качества внешнего вида изделий после завершения процесса литья. На рис. 16.12, Б показан один из примеров такой спецификации.

16.4.5. Контроль формы (инструмента)

Хорошее качество отливок может быть достигнуто, только если используется высококачественная литейная форма. Использование нового оборудования, высокая квалификация операторов, длительный опыт работы не могут исправить положения, если форма имеет дефекты или изношена. Несмотря на доказанность этого положения, большинство производителей никак не хотят осознавать важности эффективного контроля качества литейных форм.

Хорошая система контроля форм начинается с анализа всей оснастки и адекватных условий хранения форм. Ключевым словом здесь является «документация». При проверке форм любая мельчайшая деталь должна быть рассмотрена и учтена. Для этого следует использовать определенную форму отчета о результатах проверки, подобного приведенному на рис. 16.13.

После того как форма попала на производство, необходимо тщательно обследовать первое полученное изделие, проверить все его размеры и оставить на будущее как образец. Далее необходимо составить карту, отражающую историю эксплуатации формы, подобную показанной на рис. 16.14, и сохранять ее на все время использования формы. Все изменения формы, даже минимальные, должны записываться в этой карте, также как и данные о ремонтных и восстановительных работах. Расписание работ по обслуживанию формы должно составляться исходя из количества произведенных на ней отливок.

ОТЧЕТ О СОСТОЯНИИ ФОРМЫ

Номер формы _____

Компания _____
Производитель формы _____
Дата изготовления _____

Номер	Номер детали	Номер модели	Материал	Поставщик/Тип

☐ 2 плиты ☐ 3 плиты ☐ Пакет ☐ Горячеканал. литник

☐ Коллектор горячеканал. системы ☐ Изолированный литник ☐ Рама ☐ Иные

Тип основы для формы: _____

Размеры основы для формы: Длина _____ Ширина _____ Высота _____

Установочные размеры для формы: Длина _____ Ширина _____ Высота _____

Материал формы: _____

Материал вставок: _____

Число гнезд: _____

Твердость формы: _____

Характеристики литьевой машины		Радиус сопла	Диаметр фланца	Размеры литниковой втулки
Тонны	Унции			

Рис. 16.13. Форма отчета о состоянии формы (с разрешения *Performance Engineering Products, Inc.*)

Тип впускного литника: _____
Тип КО: _____
Раскрытие: _____
Выемка пуансона: _____
Предел включений: _____
Датчик формы: _____
Обработка формы: _____
Информация о плитах: _____
Литниковая втулка ГКС: _____
Горячеканальный литник: _____
Изолированный литник: _____

Верхняя полуформа	Количество впускных литников	Нижняя полуформа	Количество впускных литников
Матрица: _____		Матрица: _____	
Пуансон: _____		Пуансон: _____	
Иное: _____		Иное: _____	

Дополнительная информация, относящаяся к форме: _____

Расписание ремонтных работ	
Ремонт	Дата
_____	_____
_____	_____
_____	_____

Место впуска		
Номер детали	Тип впуска	Серийный номер
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Окончание рис. 16.13

16.4.5. Квалификационные инструкции

Выполнение определенных квалификационных инструкций обслуживающим персоналом существенно важно для спокойной и успешной работы любой системы контроля.

Квалификационные инструкции представляют собой не более чем упрощенную информацию, которая с помощью картинок, описаний и фотографий подсказывает как правильно выполнять конкретные задачи. Эти задачи могут состоять просто в удалении грата или в приемах соединения деталей с помощью специальных связующих растворов. В большинстве инструкций содержатся критерии, которые указывают на то, что является предпочтительным, приемлемым или неприемлемым.

На рис. 16.15 приведена типичная инструкция такого рода.

Номер формы: _____

Номер детали: _____

Компания _____

Номер карты: _____

Изготовитель формы _____

Дата изготовления _____

Записи об операциях, связанных с формой				
Дата	С	По	Подпись	Примечания
модификация формы				
Дата	Номер модификации формы		Причина	

Рис. 16.14. Карта, представляющая историю эксплуатации формы (с разрешения *Performance Engineered Products, Inc.*)

Критический фактор

Размеры	Допуск		Измеренный	Комментарии	Дата
	+	-			

Обслуживание и ремонт

Дата	№ детали	№ партии	Вид ремонта	Стоимость	Компания-поставщик

Продолжение рис. 16.14

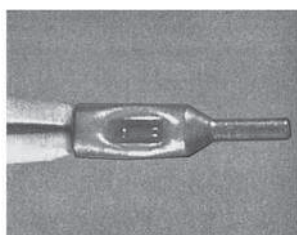
workmanship standards

КВАЛИФИКАЦИОННАЯ ИНСТРУКЦИЯ

СОЕДИНЕНИЕ БЕЗ СПЯЯ

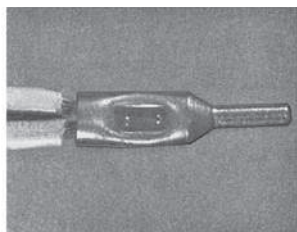
ОБЖАТЫЕ КОНТАКТЫ МНОГОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ

увеличение 5 крат.



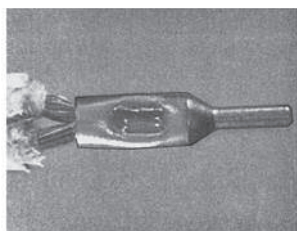
ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНО:

1. Изоляция должна быть обернута ровно, а концы убраны заподлицо с задней стенкой контактной втулки.
2. Проводники должны быть помещены в гнездо.
3. Контакты должны быть хорошо сформованы и отцентрованы.



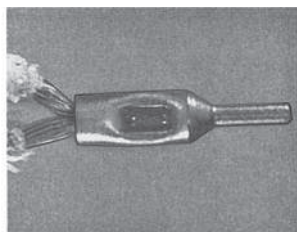
ДОПУСКАЕТСЯ:

1. Изоляция может заканчиваться на расстоянии 0,06 дюйма от задней стенки контактной втулки.
2. Изоляция может быть уложена не вполне ровно.



НИЖНИЙ ДОПУСТИМЫЙ ПРЕДЕЛ

1. Оголенный провод может выходить не более чем на один диаметр изолированного провода плюс 0,06 дюйма или же не более, чем на расстояние в 0,125 дюйма от задней стенки контактной втулки (указанный выше зазор включает в себя допуски на последующую усадку изоляции)



НЕПРИЕМЛЕМО:

1. Оголенный провод выходит из зазора на величину, большую, нежели оговорено выше.
2. Проводники не опущены в контактную втулку.
3. Контакты слишком малы.

Рис. 16.15. Типичный пример рабочей инструкции

Некоторые из наиболее очевидных достоинств таких инструкций состоят в возможности снижения доли брака, исключения ненужных доделок, раннего обнаружения дефектов и уменьшения риска отбраковки качественных изделий. Правильное выполнение рабочих инструкций способствует улучшению качества и надежности изделий, а также снижению затрат времени на переделки из-за неопределенности мнений и оценок со стороны обслуживающего персонала.

16.4.7. Документация

Документация — это сердце системы контроля качества продукции. Данные, собранные при документировании результатов испытаний, измерении размеров изделий, исследовании устойчивости технологического процесса и анализе отобранных проб могут использоваться для статистического контроля. Многие частные и правительственные учреждения требуют, чтобы правильно составленная документация и сделанные записи хранились в течение определенного периода времени. Так, например, записи, относящиеся к атомной промышленности, должны храниться в течение 40 лет [5]. Сохранение таких записей может предоставить необходимые доказательства при судебных разбирательствах в случаях, когда обсуждается надежность продукции.

В «хорошей» системе документации легко собирать данные, легко их понять и легко хранить. Записи, относящиеся к проверке продукции, должны содержать информацию о рассматриваемых характеристиках продукции, количестве наблюдений, числе и типе расхождений, окончательные заключения, идентификацию инспектирующего лица и, что наиболее важно, дату составления документации.

И наконец, без правильно составленных отчетов практически невозможно проследить, какие причины вызвали разрушение изделия. Будьте особенно внимательны при анализе данных по размерам изделия, поскольку здесь важно знать, какой использовался инструмент для измерений, и каков был его износ.

16.4.8. Руководство по оценке качества

Система контроля качества продукции не может функционировать нормально без руководства по оценке качества, расписывающего в деталях программу действий. Единственная цель такого руководства — это представить ясную и точную письменную инструкцию, описывающую используемые процедуры, для того чтобы избежать всяческого непонимания и недоразумений как внутри компании, так и за ее пределами. Насколько это возможно, следует избегать устных инструкций, поскольку они легко приводят к неправильным интерпретациям и огромным искажениям в трактовке результатов.

Ниже приводится перечень основных моментов, которые должны содержаться в руководстве по оценке качества продукции.

1. Задача работы.
2. Организационные условия, в которых формулируется область ответственности каждого члена команды.

3. Функции и ответственность организации, осуществляющей контроль качества.
4. Формулировка функций команды, которой поручена работа, и описание процедуры корректировки этих функций.
5. Процедура получения данных для инспекции.
6. Процедура инспекции непосредственно в ходе технологического процесса (процедура получения первых изделий).
7. Процедура передачи данных для инспекции.
8. Границы возможностей.
9. Программа аудита качества. (В ходе выполнения этой программы контролер качества или наблюдатель делает неожиданные проверки инспектируемых единиц, точности систем измерений и испытательного оборудования и т. д. для того чтобы проверить точность измерительных систем, а также достоверность работы систем контроля качества.)
10. Процедура приемки изделий, возвращаемых потребителем.
11. Проверка калибровки и установки испытательного оборудования.
12. Программа контроля форм и иного инструмента.
13. Процедуры иных методов испытаний.
14. Методы фиксации данных, получаемых в результате проверок, и форма представления образцов.
15. Методы сохранения записей и иных документов.
16. Процедура переделки бракованных деталей и повторной инспекции.
17. Стандарты для визуальной оценки.
18. Квалификационные инструкции.

16.5. Общие положения

16.5.1. Контроль качества и работа оператора

Хотя оператор и не входит в команду, контролирующую качество продукции, его работа очень важна и напрямую влияет на качество получаемых изделий. Разумный менеджер, отвечающий за качество, всегда перекладывает определенную долю ответственности на оператора машины. Это также приводит к снижению затрат на контроль и способствует повышению качества продукции. Включение оператора в программу работ по улучшению качества не может быть успешным без надлежащей профессиональной подготовки всех участников программы. Оператор машины должен уметь обнаруживать такие визуально определяемые дефекты, как следы от литников, недоливы, подгары, должен уметь снимать заусенцы и не оставлять облой на изделии, останавливать машину при определенных показаниях датчиков, а также проводить простейшие испытания между циклами литья. Оператор для лучшего понимания происходящего и для сравнения с эталоном должен быть снабжен иллюстративным материалом, который демонстрирует примеры качественных и бракованных деталей.

16.6. Сертификация поставщика

За последние 10 лет все большее число представителей бизнес-сообщества и основные корпорации выступают за то, чтобы была введена обязательная сертификация поставщиков продукции. Эта тенденция связана с необходимостью быть уверенным в качестве получаемой продукции, а также с возросшей конкуренцией со стороны зарубежных производителей.

Поставщики во многом определяют успешность любого бизнеса, никто не может достичь успеха, если он не получает качественные материалы и обслуживание. Бизнес должен устанавливать нормальные рабочие отношения с поставщиками. Побочным продуктом этой новой тенденции является программа сертификации, которая вытекает из концепции партнерских отношений, в противоположность идеи доверия к поставщикам.

Правильно организованная сертификация требует усилий большой команды и участия обеих сторон. Любая развитая система сертификации начинается с ясных четко оговоренных целей и задач.

На рис. 16.16 показан типичный правильно организованный процесс выбора поставщика.

Следующий шаг в сертификации — это установление критериев для выбора компании одновременно с проведением всеобъемлющего исследования и оценки качества продукции. На рис. 16.17 показан типичный пример карты, по которой производится оценка компании.

Первичным показателем желания поставщика пройти сертификацию является участие его служб в этой работе и их понимание задачи.

Уровни	Особенности Отношения менеджмента	Участие организа- ций, оценивающих качество	Статус компании
1	Отсутствие понимания	Никто не участвует	Не подозревают, что качество продукции низкое
2	Видны признаки понимания, но нет финансовых вложений в проект	Возникает интерес, видны признаки, нет конкретной работы	Постоянно возникают проблемы с качеством
3	Желание измениться, поддержать проект и учиться	Начинают участвовать в работе	Участие в работе по улучшению качества
4	Менеджмент участвует в работе	Осуществляется эффективный контроль качеств	Стремление к устранению причин брака
5	Менеджмент стал частью команды, занимающейся проектом	Единственно приемлемый метод – это отсутствие дефектов	Понимание того, что сертификация компании – это путь к выживанию

Рис. 16.16. Процесс выбора поставщика для сертификации

Поставщик A001. Любой поставщик – США
Общий объем поставки 70

Дата 01.01.09

Факторы	Рейтинг	Доля	Взвешенный рейтинг
Качество (общее количество партий, отвечающих спецификации)	69 ×	20% =	13,80
Качество (общее количество партий, принятых без опасений)	69 ×	15% =	10,35
Качество (общее количество партий, принятых без рекламаций, даже если они не отвечают спецификации)	70 ×	20% =	14,00
Сертификат анализов (общее количество до дня поставки)	68 ×	20% =	13,60
Поставки, выполненные в срок (общее количество)	68 ×	15% =	10,20
Повреждения при поставке (общее количество партий, полученных без дефектов, связанных с повреждениями при поставке)	70 ×	10% =	7,00
Суммарный рейтинг 68,95			
Расчет оценки: (суммарный рейтинг)/(количество партий) = 98,50			
99–100 — превосходно;			
96–98 — хорошо;			
93–95 — удовлетворительно;			
90–92% — допустимо;			
89 и ниже — неудовлетворительно.			

Рис. 16.17. Карта для оценки компании-поставщика продукции

Команда, занимающаяся сертификацией и включающая в себя представителей различных отделов компании — оценки качества, продаж, инженерных служб, исследований и развития, производства — должна посетить предприятие поставщика для того, чтобы оценить его возможности и установить направления рабочего взаимодействия. Многие компании настаивают на том, чтобы поставщик предварительно провел аудит самостоятельно.

После серии обсуждений должна быть выработана программа мер по улучшению и внесению необходимых коррективов, что в итоге создаст возможность для сертификации. Формальная презентация и вручение знака «Сертифицированная компания» проводится одним из руководителей компании. Обычно повторная сертификация проводится раз в год.

16.6.1. Новые технологии

Оценка продукции подразумевает три категории испытаний. Во-первых, измеряются размеры и вес изделия. Во-вторых, определяются материальные характеристики, такие как предел прочности. В-третьих, оцениваются технологические параметры, такие как производительность, скорость и иные характеристики, которые важны для оценки того, насколько данная продукция удовлетворяет потребителя.

Ранее описанные методы оценки качества технологического процесса основывались на предположении о том, что характеристики самого изделия с этим не связаны. Это не справедливо для многих, хотя и не для всех процессов. Характеристики изделия связаны (коррелируют) с параметрами многих технологических процессов. Полагая, что это справедливо, часто при разработке систем качества процессов считается излишним, чрезмерно дорогостоящим и требующим больших затрат времени определение всех характеристик изделия.

В дальнейшем мы будем обсуждать характеристики, связанные со стабильностью размеров изделий, и при этом имеется в виду, что для многих изделий и процессов существуют корреляции между качеством изделия, свойствами материала и параметрами технологического процесса.

Производство деталей из пластмасс литьем под давлением является примером процесса, для которого важны размеры изделия. Предположим, что для выпускаемой детали существенны пять размеров, а в процессе используется 16-гнездная форма. Таким образом, для каждого цикла изготовления продукции (каждого впрыска) необходимо контролировать 80 размеров. Можно, однако, найти один определяющий размер, который статистически наилучшим образом отражает все остальные 79 размеров.

Корреляция между различными размерами представляется в форме регрессионных зависимостей на диаграмме корреляций. Если речь идет о 80 размерах, то должно быть построено 79 таких диаграмм, которые устанавливают корреляционные связи между одним определяющим размером и всеми остальными 79 размерами.

На рис. 16.18 показан пример таких корреляционных соотношений для случая, когда имеются всего четыре связанных между собой размера.

Определение того, какой из размеров статистически может рассматриваться как определяющий, может оказаться (и обычно оказывается) задачей, требующей

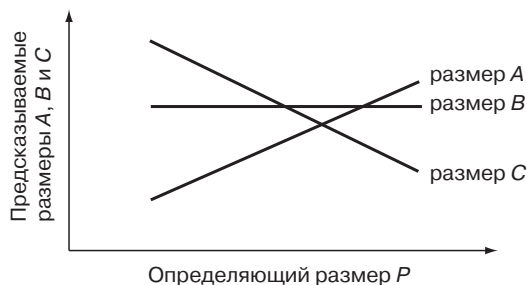


Рис. 16.18. Пример линий регрессии для детали, характеризующейся четырьмя размерами

большого объема вычислений. Совсем не является чем-то необычным то, что приходится определять 20 000–30 000 коэффициентов корреляции для того, чтобы найти ту величину, которая наилучшим образом предсказывает остальные размеры изделия. К счастью, существует программное обеспечение *Correlation Master*, которое предоставляется компанией *Algoryx, Inc.* Оно позволяет быстро и просто выполнить все необходимые вычисления и построить корреляционные диаграммы.

Требуемые соотношения определяются, либо, исходя из тех данных, которые уже имеются у производителя для ранее выпущенных изделий, либо находятся при выпуске новых изделий вследствие вариаций технологического режима. При этом не вносятся какие-либо изменения в ход самого процесса.

Если найден определяющий размер, то тем самым считаются известными и все остальные размеры. Тогда становится ненужным проводить остальные измерения или статистически оценивать устойчивость процесса по отношению к различным размерам детали, как это показано на рис. 16.19.

В настоящее время многие крупные небольшие компании экономят деньги и повышают прибыльность в результате использования новых технологий, связанных с использованием программы *Lean SPC*.

Аналогичным образом во многих компаниях реализуется программа определения устойчивости процесса, связанная с оценкой коэффициента C_{pk} .

Возвращаясь к рассмотренному выше примеру о производстве детали с пятью размерами, имеющими существенное значение, в 16-гнездной форме, следует заметить, что при анализе на устойчивость по старой технологии следовало бы провести 80 независимых серий измерений. Использование технологии *Lean Process Capability* с помощью программного обеспечения *Correlation Master* позволяет выполнить только одну серию исследований на устойчивость по отношению к определяющему размеру детали.

В рассматриваемом примере использование *Correlation Master* позволяет сэкономить 99% стоимости измерений и 99% стоимости работ по анализу на устойчивость процесса.

Если же говорить о дальнейшем, то такой подход позволяет сэкономить намного больше, когда речь идет о разрушающих испытаниях.

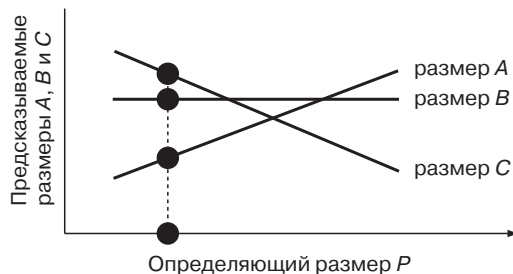


Рис. 16.19. Соотношения между размерами остаются постоянными и предсказуемыми, независимо от параметров технологического процесса

Новая технология была с успехом применена при анализе следующих процессов:

- литье пластмасс под давлением;
- литье резин;
- компрессионное формование эластомеров;
- экструзия изделий из пластмасс;
- прессование;
- термоформование;
- штамповка из металлических листов;
- формование изделий из металлических листов;
- платинирование при изготовлении полупроводниковых блоков;
- травление при изготовлении полупроводниковых блоков.

В настоящее время проводятся аналогичные исследования в области литья под давлением и экструзии металлов.

При совмещении поставленных целей и приемлемых допусков на корреляционных диаграммах могут быть получены многие дополнительные преимущества, как это показано на рис. 16.20 и 16.21. Это в частности справедливо на стадии разработки нового изделия.

При таком подходе приемлемые изменения размеров инструмента и допуска, связанные с релаксацией изделия, определяются за один шаг, вместо того чтобы проводить многоступенчатые испытания. Это ключевой момент, поскольку изменения размеров инструмента и релаксация размеров изделия происходят независимо от того, какой режим работы оборудования установлен оператором (рис. 16.22).

При традиционных подходах возможность правильной оценки изменений размеров формы и влияния допусков при релаксации размеров изделия представлялась весьма проблематичной. Любые изменения приводили к тому, что оператор или инженер, контролирующий процесс, были вынуждены его перенастраивать. Оценка роли изменений размеров формы и влияния допусков при релаксации размеров изделия выполняется программой *Correlation Master* автоматически без необходимости

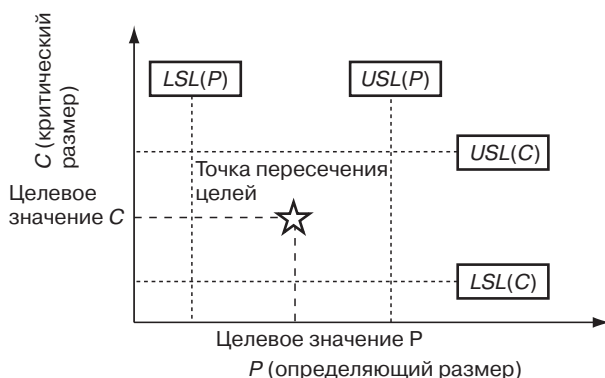


Рис. 16.20. Если установлена величина определяющего размера, то невозможно выйти за пределы критических размеров

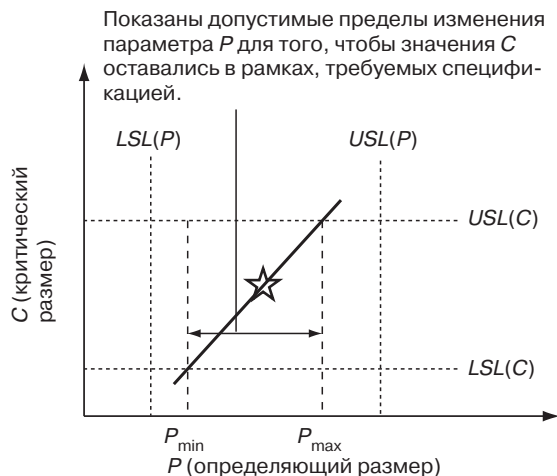


Рис. 16.21. Если заданное значение определяющего размера лежит между P_{\max} и P_{\min} , то значение параметра C не может лежать между заданными предельными значениями

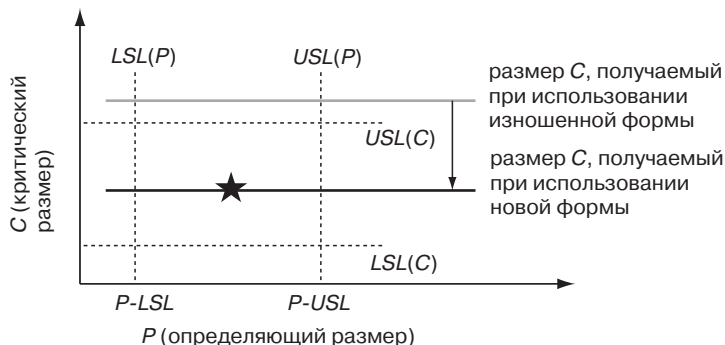


Рис. 16.22. Изменения размеров изделия могут быть установлены в единичном эксперименте

переналадки оборудования. В этом состоит огромное преимущество использования новой технологии для изготовителей инструмента и инженеров-проектировщиков.

Программа *Correlation Master* также позволяет инженеру-наладчику добиваться наиболее высокого качества изделий при минимальных отходах и переделках, внося минимальные изменения в технологический режим.

И наконец, программа *Correlation Master* позволяет таким образом идентифицировать размеры с тем, чтобы сузить приемлемые допуски при сохранении производительности процесса.

Рассмотренные возможности использования программного обеспечения *Correlation Master* углубляют наше понимание технологического процесса, ускоряют появление новых изделий на рынке и снижают возможности возникновения конфликтных ситуаций между проектировщиками, технологами и специалистами по контролю качества.

Литература

1. Juran J.M. *Quality Control Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1974, p. 2–2.
2. *Ibid.*, p. 2–11.
3. Deming L.M. *Quality Control for Plastics Engineers*, Reinhold, New York, 1957, p. 1.
4. «Quality Assurance Terms and Definitions» *Military Standard Mil-Std-109B*, U. S. Govt. Printing Office, Washington, D.C., 1969.
5. «Nondestructive Inspection and Quality Control» *Metals Handbook*, 11, American Society for Metals, Philadelphia, PA, p. 408.
6. Algoryx, Inc.[™], 750 S. Bundy Drive, #304, Los Angeles, CA 90049 310-820-0987 www.algoryx.com.

Общие ссылки

1. Grant E.L. *Statistical Quality Control*, McGraw-Hill, New York, 1974.
2. Juran J.M. *Quality Control Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1974.
3. Mason R.D. *Statistical Techniques in Business and Economics*, Irvin, Homewood, IL, 1974.
4. Dodge H.F. and Romig H.G. *Sampling Inspection Tables—Single and Double Sampling*, John Wiley & Sons, New York, 1944.
5. Kenney C.W. and Andrew D.E. *Inspection and Gaging*, Industrial Press, New York, 1977. *Statistical Quality Control Handbook*, Western Electric Company, New York, 1956.
6. «Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes» ANSI/ASQC 21.4–1993, American Society for Quality Control (ASQC), Milwaukee, WI.

17. Надежность продукции и испытания

17.1. Введение

В 1970-е годы особое внимание производителей и поставщиков привлек тезис «надежность продукции»¹. Комиссия по безопасности потребительского рынка представила доклад, в котором говорится, что число исков, связанных с претензиями по надежности продукции, выросло с 1974 по 1988 год на 983%. В 1991 году страховые компании выплатили 1,6 млрд долл. по искам, обусловленным низким качеством продукции. Кроме того, дополнительно на урегулирование претензий было затрачено 1,1 млрд долл. [1]. Стоимость страховых выплат заметно выросла за последние пять лет. Фактически все отрасли промышленности сталкиваются с подобной ситуацией, и промышленность пластмасс, конечно, не является исключением.

Общая концепция надежности продукции связана с отсутствием общих требований по безопасности, которые должны предъявляться конструкторам изделий и производителям. «Администрация по контролю за безопасностью и здоровьем» (OSHA) доложила, что каждый год из-за проблем с надежностью изделий погибает более 10 000 и травмируются более двух миллионов человек [2].

В последнее время поставщики материалов, производители продукции и дистрибьюторы все чаще получают судебные иски от раздраженных потребителей, поскольку пластмассовые фитинги в системах водоснабжения зданий неожиданно разрушаются, заливая квартиры, портя дорогую мебель и ковры. Известны также случаи, когда операторы литьевых машин предъявляют иски к владельцам оборудования из-за травм правой руки: когда рабочие пытаются вытащить изделия из формы, они случайно задевают выключатель системы смыкания формы. Еще одним классическим примером ненадежности пластмассовых изделий являются ручки инструментов из поливинилхлорида, производимые в небольших компаниях, которые не выдерживают нагревания. Под действием высоких температур они размягчаются, не обеспечивают надежной изоляции, что приводит к ударам электрическим током.

На основании приведенных примеров становится ясно, что вопросы надежности и безопасности продукции тесно связаны между собой. Большинство производителей, особенно в небольших компаниях, не слишком обращают внимание на эти проблемы, полагая что это их не касается. Однако факты говорят о том, что вопросы надежности касаются всех: производителей материалов, проектировщиков изделий, производителей, продавцов и монтажников.

¹ В оригинальном тексте этот термин выражен более резко словом «*liability*», что в точном переводе значило бы «ответственность». Однако мы предпочли более привычный термин «надежность» — *Примеч. науч. ред.*

Претензии к производителю могут быть предъявлены в следующих случаях:

1. Изделие плохо спроектировано, и не может использоваться для тех целей, для которых оно было предназначено.
2. Изделие плохо изготовлено, причем не были проведены надлежащие испытания.
3. На продукции отсутствуют необходимые этикетки и инструкция по технике безопасности.
4. Изделия не упакованы достаточно хорошо так, чтобы с ними можно было безопасно обращаться.
5. При продаже, распределении и производстве продукции не были соблюдены допустимые сроки использования.
6. Не были надлежащим образом зафиксированы претензии потребителя, столкнувшегося с выходом изделия из строя [3].

Что должен делать производитель, если он хочет избежать дорогостоящих судебных разбирательств? Какие шаги должен предпринять производитель до того, как он передаст товар в руки нового потребителя? Как может производитель форм, который просто предоставляет сервис для промышленности, обезопасить себя от неизвестных ему проблем, связанных с обеспечением надежности изделий? Какие способы существуют для инженера-проектировщика, чтобы сконструировать деталь, отвечающую всем требованиям техники безопасности, и при этом не потерять ни оригинальности замысла, ни увеличить стоимость? Как поставщик сырья может обезопасить себя от преследований, если разрушение изделия произошло не из-за низкого качества материала, а из-за ошибок конструктора?

Очевидно, что не существует единого ответа на все эти вопросы. Ниже приводятся некоторые общие рекомендации, которым должны руководствоваться все лица, чтобы избежать судебных преследований по поводу ситуаций, в которых нет соответствующих оправдательных документов.

17.2. Анализ конструкции продукции/оборудования

Очень часто именно конструктор изделия или оборудования рассматривается как лицо, в первую очередь ответственное за безопасность продукции. Ключевыми факторами, которые следует учитывать при проектировании безопасного оборудования/изделия, являются невежество потребителя, неудачи производителя и заведомо неверное использование изделий. Команда проектировщиков должна и индивидуально, и коллективно изучить проблему с различных точек зрения и под всевозможными углами зрения. Если речь идет о небольшой компании, в которой отсутствует инженерный отдел, то следует обратиться к внешней фирме с просьбой критически рассмотреть конструкцию. К процессу проектирования полезно привлечь инженеров страховых компаний, но поскольку в штате многих страховых компаний имеются инженеры по технике безопасности. Конструктор также должен быть знаком со всеми стандартами и правилами, касающимися создаваемого продукта.

К числу других факторов, которые следует учитывать при проектировании, относится выбор надежных компонентов конструкции, необходимость обеспечения удобного доступа для замены деталей и ремонта, а также оператора при работе оборудования. Следует также принять во внимание квалификацию и ограниченность возможностей оператора, возможность замены компонент, которые невозможно проконтролировать или которые неправильно установлены. Важно также учесть все риски, обусловленные воздействием окружающей среды и химических реагентов [4].

17.3. Упаковка

Под упаковкой в широком смысле понимают наружную оболочку изделия. Полимерные материалы широко используются для упаковки таких изделий как бытовые электроприборы, электрическое оборудование, жидкие химические вещества, пищевые продукты и напитки. Поэтому вопросы безопасности этих вещей, а также надежность упаковки представляют первостепенный интерес. Упаковка должна быть спроектирована таким образом, чтобы предотвратить возможность проникновения внутрь лиц, незнакомых с потенциальной опасностью хранящихся продуктов. Упаковочные материалы должны быть испытаны на токсичность, химическую совместимость и сопротивление воздействию окружающей среды. Для того чтобы обеспечить безопасность, полезно использовать идентификационные ярлыки, на которых следует указывать наименование продукции, номер модели, номера серии и данной партии, дату, имя производителя.

17.4. Инструкции, предупреждения и обучение

Одна из основных мер защиты от судебных преследований по поводу ненадежности продукции состоит в приложении достаточно четких инструкций, предупреждений относительно мер техники безопасности и инструкций по обучению при применении как для потребителя, так и для лиц, занимающихся установкой и обслуживанием. Ни одно изделие не может быть безопасным на все 100%. Всегда существует некоторый риск при обращении с той или иной продукцией и оборудованием. Поэтому конструкторы оборудования или продукции должны учитывать все аспекты, связанные с безопасностью, понимая, что даже хорошо спроектированный объект может сам по себе представлять определенную опасность. Составитель предлагаемых инструкций и указаний должен иметь в виду возможность неверного понимания текста читателем, и должен представлять себе, что может произойти в этом случае.

Производитель товара или оборудования должен не только следовать общим правилам, установленным правительственными организациями и промышленностью в отношении инструкций по мерам техники безопасности, но и добавлять соответствующие указания от себя, если это необходимо для предотвращения неприятных случайностей. Инструкция должна не только «предупреждать», но и говорить о тех последствиях, которые могут возникнуть при несоблюдении рекомендаций [5].

Производители оборудования, также как и компании, в которых оно используется, могут предотвратить большинство несчастных случаев путем составления грамотных программ по обучению обслуживающего персонала, монтажников и мастеров.

Разработка программ обучения правилам техники безопасности обслуживающего персонала для конкретного оборудования, проведение регулярного инструктажа по технике безопасности, выпуски специальных бюллетеней с инструкциями — это только некоторые из наиболее важных мер, которые подтвердили свою полезность на практике [6].

17.5. Испытания и хранение информации

Один из наиболее действенных способов избежать судебных исков по поводу надежности продукции состоит в проведении всеобъемлющих испытаний и организации системы хранения полученной при этом информации.

Контроль качества должен начинаться с инспекции сырья и компонент в момент их получения. Всегда, когда это возможно, продукция, получаемая от поставщика, должна проходить проверку на соответствие армейским и промышленным спецификациям. Если поступающее сырье и компоненты должны будут использоваться для создания потенциально опасной продукции, следует потребовать от поставщика сопроводительной документации о соответствии сертификатам на каждую поставку.

Испытания в ходе технологического процесса также важны. Здесь должен осуществляться контроль качества и проводиться разрушающие или неразрушающие испытания в соответствии со стандартами, принятыми в промышленности. Если речь идет об оборудовании, то во избежание неожиданных сюрпризов тщательная инспекция должна производиться еще до момента его поставки.

В некоторых случаях желательно привлекать независимую испытательную лабораторию. Результаты, получаемые в такой лаборатории, обычно более полезны и убедительны при рассмотрении дела в суде, чем данные, представляемые самим заинтересованным лицом.

Четыре изложенные ниже причины являются серьезным обоснованием для обращения в независимую лабораторию для испытания продукции [7].

1. *Объективность.* Производитель может слишком привыкнуть к своей продукции, чтобы сохранить незаинтересованную и непредубежденную точку зрения на ее безопасность. Независимый специалист по технике безопасности смотрит на продукцию беспристрастно, что позволяет выявить небезопасные моменты, ускользающие от внутреннего наблюдателя.
2. *Современность.* В обязанности инженера независимой испытательной лаборатории входит знание наиболее поздних современных спецификаций и правил техники безопасности, так же как и предложенных законодательных инициатив в этой области.
3. *Независимость.* Поскольку возможность проверки становится все более важным аспектом надежности продукции, хорошо задокументированный отчет о результатах испытаний и анализе отклонений от требований техники

безопасности, представленный независимой лабораторией, является важным свидетельством того, насколько производитель, выходя на рынок, старался сделать свой продукт надежным и безопасным.

4. *Предвидение*. Испытание продукции, проведенное до того как будут предъявлены какие-либо судебные иски, является важной превентивной мерой.

Другая важная задача, стоящая перед производителем, это хранение информации. Хорошо организованная система хранения информации позволяет решить различные задачи. Во-первых, она показывает, что компания предпринимала необходимые усилия для производства надежной продукции. Во-вторых, в случае каких-либо инцидентов или обвинений, производитель может вернуться в архив и найти причины возникших проблем. В-третьих, с помощью хранящейся информации производитель может доказать, что произведенная продукция удовлетворяла необходимым требованиям.

Рекомендуется хранить записи, касающиеся проектирования, производства, контроля качества, процедуры испытаний и полученных при этом результатов, по крайней мере, в течение пяти лет. Длительность хранения зависит от конкретной необходимости по отношению к данному продукту. В записях также должны сохраняться данные по спецификации материала, поставщикам, номерам серий и партий [8]. Также полезно хранить информацию об инструкциях компании по технике безопасности, измерений конструкции, данных о разрушении изделий, данные по маркетингу и поставке продукции, а также о рекламной политике.

17.6. Организации, занимающиеся вопросами стандартизации в области техники безопасности

Список организаций, в задачу которых входит разработка стандартной документации в области техники безопасности, приведен в Приложении E.

Литература

1. Goodden R.L. *Preventing and Handling Product Liability*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1996.
2. Kolb J. and Ross S.S. *Product Safety and Liability*, McGraw-Hill, New York, 1980, p. 4.
3. *Ibid.*, p. 12.
4. *Ibid.*, p. 330.
5. *Ibid.*, p. 208.
6. Allchin T. «Product Liability in Plastics Industry» *SPE Pacific Tech. Conf.* (PACTEC). 57, 1975, p. 57.
7. Zavita Reference 1, p. 34.
8. Fountas N. «Product Liability — Prepare Now for Judgment Day» *Plast. World* (Feb. 1978), p. 68.

18. Неразрушающие испытания и измерения

18.1. Введение

Термин *неразрушающие испытания* относится к таким испытаниям и измерениям, которые не приводят к каким-либо повреждениям или изменениям свойств изделия. Очень часто для того чтобы выполнить какие-либо измерения или определить свойства материала, оказывается необходимым разрушить его целостность. Так, например, практически невозможно толщину стенки в некоторых областях фитинга, соединяющего 6-дюймовые трубы из поливинилхлорида, не разрезав эту деталь. Аналогичным образом наличие пустот в 3-дюймовом бруске, полученном экструзией ПЭФТ (тефлона), можно установить, только если разрезать этот брусок в нескольких местах.

Такая техника измерений не только весьма дорогостоящая, но и требует больших затрат времени. Методы неразрушающего контроля позволяют обнаружить дефекты, посторонние включения и неоднородности без разрушения изделия. К числу неразрушающих методов испытаний относятся не только такие простые приемы, как визуальный осмотр, взвешивание, измерения твердости, но и сложные электрические и ультразвуковые испытания.

Обсуждение этих методов в настоящей главе ограничено описанием таких явлений, как ультразвук, рассеяние гамма-лучей, использование оптической лазерной техники, флуоресценцией в рентгеновском спектре, эффектом Холла. Методы, основанные на визуальном осмотре, измерении твердости поверхности и электрических свойств, описаны в других главах.

18.2. Ультразвук

Использование техники ультразвуковых колебаний принадлежит к числу наиболее широко распространенных методов неразрушающего контроля. Применительно к пластмассам основное использование этого метода направлено на определение мест разрывов и измерения толщины. Этот метод также может применяться для измерения влажности, исследования качества соединений пластмассовых труб и фитингов с помощью связующих растворов и мест сварки в пластмассовых трубах [1].

Термин *ультразвук* в широком понимании относится к колебаниям, происходящим при частоте больше 20 000 циклов/с. В промышленных приборах, которые основаны на использовании этого метода, применяют частоты в диапазоне от 0,75 до 20 МГц. Правильное понимание техники ультразвуковых колебаний основано на использовании следующих понятий.

Частотный генератор. Это устройство, которое создает короткие импульсы высокочастотного знакопеременного напряжения, подаваемого на датчик.

Датчик. Датчик или пробник – это устройство, которое создает поток ультразвуковых волн под воздействием знакопеременного напряжения, приложенного к датчику. Ультразвуковой датчик изготавливается из материала, обладающего пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэлектрик – это такой материал, который под действием переменного электрического потенциала создает колебания, а под действием деформаций в нем возбуждается электрический потенциал. Таким образом, эти материалы преобразуют электрическую энергию в энергию механических колебаний и наоборот [2]. Согласно своему наименованию, в пьезоэлектрике под действием давления возникают электрические заряды, и наоборот, под действием электрического напряжения происходят деформации. Наиболее часто используемые пьезоэлектрические материалы – это кварц, сульфат лития, а также некоторые искусственно созданные материалы, например, титанат бария.

В настоящее время разработано большое количество разнообразных ультразвуковых датчиков, различающихся по размеру измерительной головки, частоте и полосе используемых частот. Для каждого датчика существует своя резонансная частота, при которой наиболее эффективно возбуждаются и поглощаются ультразвуковые колебания. Узкочастотные датчики создают колебания, которые проникают глубоко в материал и могут обнаруживать небольшие дефекты. Однако при использовании таких датчиков возникают трудности с разделением сигнала и эха. Широкополосные датчики обеспечивают прекрасное отделение эха, но они не проникают в материал глубоко и не позволяют обнаружить небольшие дефекты [3].

Наиболее часто применяют датчики, работающие в области частот 2–5 МГц. При исследовании пластмасс наилучшие результаты достигаются при работе в области частот 1–2 МГц.

Прослойки. Воздух является одним из наихудших проводников звуковых колебаний в области высоких частот из-за отсутствия импеданса. Он не обеспечивает передачи колебаний от датчика к большинству твердых тел. Поэтому его следует заменять другой прослойкой, связывающей датчик с исследуемым материалом. В качестве таких прослоек используются различные жидкости. Так, одной из лучших является глицерин, обладающий наиболее высоким импедансом. Однако наиболее часто все же используются масла. В качестве прослоек также используют смазки, нефтяные гели и пасты, хотя при этом необходимо добавлять специальные агенты, которые повышают не только смачиваемость, но и вязкость. Некоторые вещества, используемые в качестве прослоек, склонны к химическим взаимодействиям с исследуемым материалом, так что химическую совместимость необходимо проверять до начала испытаний. Следует также избегать применения в качестве прослоек веществ, которые потом будет трудно удалить с поверхности изделия.

На результаты измерений толщины могут серьезно повлиять различные загрязнения поверхности, что в особенности существенно для тонких пленок. Поэтому перед нанесением прослойки совершенно необходимо тщательно удалить все загрязнения с поверхности [4].

Принципиальная совокупность операций при любых ультразвуковых исследованиях состоит в следующем.

1. Создание ультразвуковых колебаний с помощью датчика.
2. Использование прослойки (воды, масла и т. д.) для наилучшей передачи ультразвуковых волн в материал.
3. Детектирование ультразвуковых колебаний после того, как они были модифицированы взаимодействием с материалом.
4. Представление результатов испытаний с помощью изображения на экране, катодной трубки или иного устройства.

Для осуществления ультразвуковых исследований используют три основных метода:

- импульс-эхо;
- просвечивание;
- резонанс.

18.2.1. Техника «импульс-эхо»

Эта техника измерений является наиболее популярной среди всех ультразвуковых методов. Она особенно плодотворна для нахождения дефектов и измерения толщины.

Принцип метода показан на рис. 18.1.

Первоначальный импульс ультразвуковой энергии подается в образец от датчика через прокладку. Звуковая волна распространяется через толщу образца до тех пор, пока не встретит заднюю отражающую поверхность. После этого через некоторое время звуковая волна возвращается к датчику. Получающийся отраженный импульс называют эхом от задней стенки. Если на пути распространения волны встретится трещина или иной дефект, то на нем также происходит отражение, и звуковая волна возвращается к датчику. Получающийся при этом сигнал — это эхо от дефекта. В обоих случаях возвращающиеся к датчику волны вызывают его колебания, которые преобразуются в электрическую энергию. Эти сигналы усиливаются и подаются

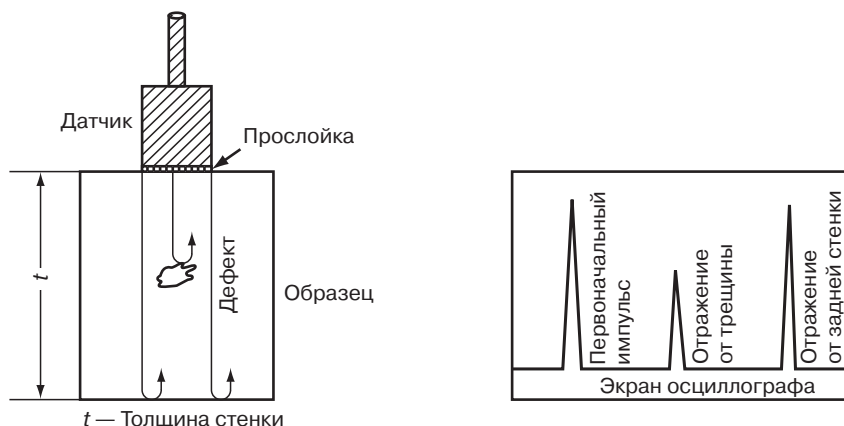


Рис. 18.1. Техника «импульс-эхо»

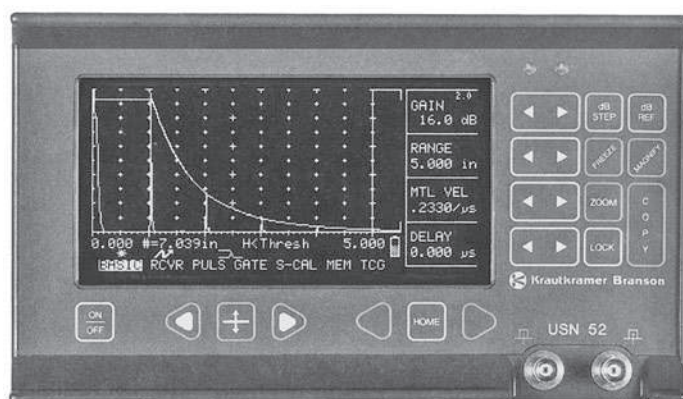


Рис. 18.2. Прибор для определения места расположения дефекта, работающий по методу «импульс-эхо» (с разрешения *Kraut Kramer-Branson Inc.*)

на какое-либо подходящее устройство, например, осциллограф. Измеряется время прохождения сигнала и отраженного эха от задней стенки. Аналогичным образом измеряется время прохождения сигнала от дефекта. Поскольку время прохождения первоначального и отраженных сигналов пропорциональны длине пути, легко найти толщину образца и место расположения дефекта.

На рис. 18.2 показан предлагаемый на рынке ультразвуковой прибор, работающий по методу «импульс-эхо».

Несколько иной вариант этой техники, основанный на погружении исследуемой детали в иммерсионную жидкость, вызвал огромный интерес в промышленности, поскольку он позволяет осуществлять непрерывный контроль изделий. По этому методу образец полностью погружается в жидкость (рис. 18.3) (обычно в воду), которая в этом случае играет роль прослойки. Датчик закрепляется в фиксаторе, который движется вокруг образца. Последний перемещается под фиксатором. Звуковая волна может быть направлена либо перпендикулярно к поверхности образца, либо под некоторым углом к ней. Вода, играющая роль прокладки, обеспечивает однородную и неабразивную связь датчика с исследуемой деталью [5].

Иммерсионная техника измерений очень полезна для автоматического контроля труб, листов, стержней и пластин, поскольку позволяет определять наличие дефектов при непрерывной экструзии этих изделий в воду.

18.2.2. Просвечивание

При использовании этого метода интенсивность ультразвука измеряется после прохождения через образец [6]. Для реализации метода просвечивания необходимы два датчика — один возбуждает ультразвуковые колебания, а второй измеряет их интенсивность после прохождения волны через образец.

На рис. 18.4 показана принципиальная схема метода, а также проиллюстрирован способ определения дефекта.

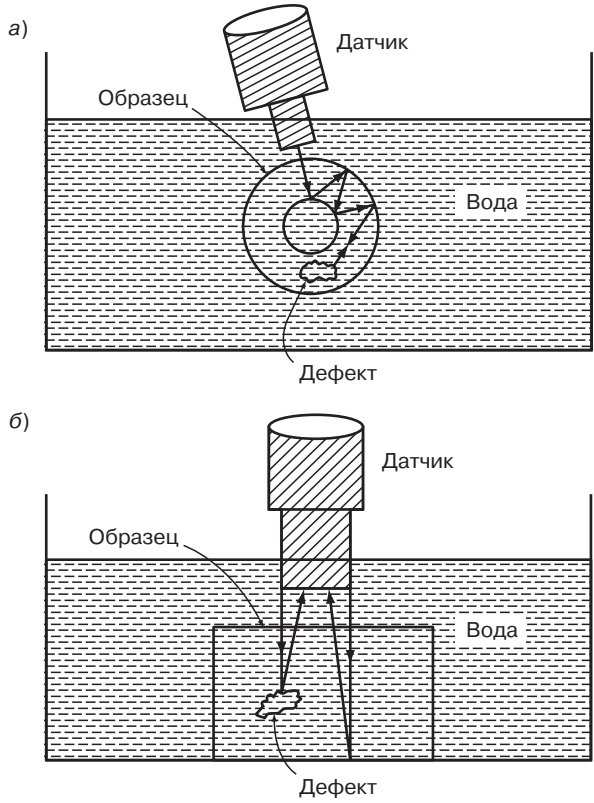


Рис. 18.3. Иммерсионная техника ультразвукового контроля

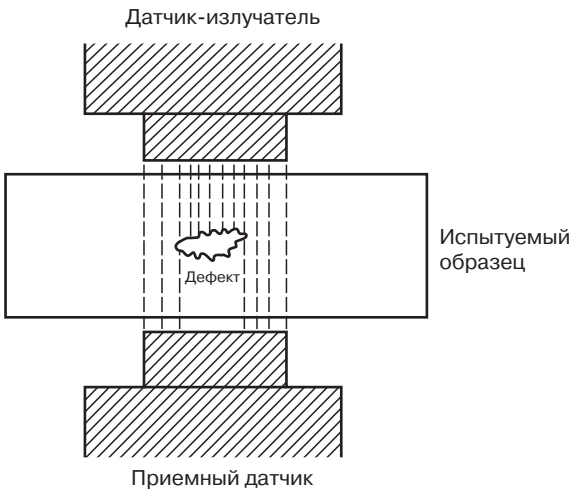


Рис. 18.4. Техника просвечивания

Техника просвечивания может быть основана на использовании либо прямой, либо отраженной волны. В любом случае положение дефекта определяется путем сравнения интенсивности ультразвуковой волны, прошедшей через испытуемый образец, и через образец сравнения, изготовленный из того же самого материала.

Наилучшие результаты при использовании этой техники получаются по иммерсионному методу, поскольку при этом обеспечивается однородная и эффективная связь датчиков с образцом.

Наиболее широкая область применения данной техники — определение дефектов при контроле ламинированных пластмасс.

18.2.3. Резонанс

Метод наиболее полезен для измерений толщины изделий. Основой метода является измерение резонансной частоты при прохождении ультразвука через испытуемый образец. Подробнее метод рассмотрен в специальной литературе [7].

18.3. Неразрушающие методы контроля с помощью ультразвуковой техники при испытаниях пластмасс

Применение ультразвуковой техники как метода неразрушающего контроля изделий из пластмасс приобрело популярность за последнее десятилетие в связи с ростом промышленности полимерных материалов и стремлением к автоматизации и экономии материалов. Эта техника находит применение в основном в двух областях — для нахождения дефектов и для измерения толщины. Метод «импульс-эхо» широко применяют для обнаружения различных дефектов, например полостей и пузырей в объеме экструдированных стержней из сравнительно дорогих материалов, таких как тефлон и полиамиды. Приборы для определения дефектов и иное вспомогательное оборудование может быть запрограммировано таким образом, чтобы после обнаружения дефекта кусок стержня, в котором имеется этот дефект, автоматически отрезался без нарушения непрерывности работы технологической линии. Этот метод обычно используется для нахождения дефектов в ламинатах.

Измерения толщины, выполняемые ультразвуковым методом, осуществляются просто и быстро, давая надежные результаты. Этот метод неразрушающего контроля особенно привлекателен для определения толщины стенки в труднодоступных местах и деталях сложной геометрической формы. Автоматизированное измерение и контроль толщины стенки труб большого диаметра обычно выполняется с применением иммерсионной техники. Ультразвуковой датчик помещается в охлаждающую емкость, и толщина стенки непрерывно отслеживается на мониторе. Если измеряемая величина выходит за допустимые пределы, включается система обратной связи, и процесс подстраивается таким образом, чтобы войти в заданные пределы.

На рынке предлагается ряд систем такого типа. На рис. 18.5 приведена иллюстрация подобной системы, в которой используется ультразвуковой датчик толщины и лазерный сканнер. На рис. 18.6 показана фотография ультразвукового тестера для измерений толщины.

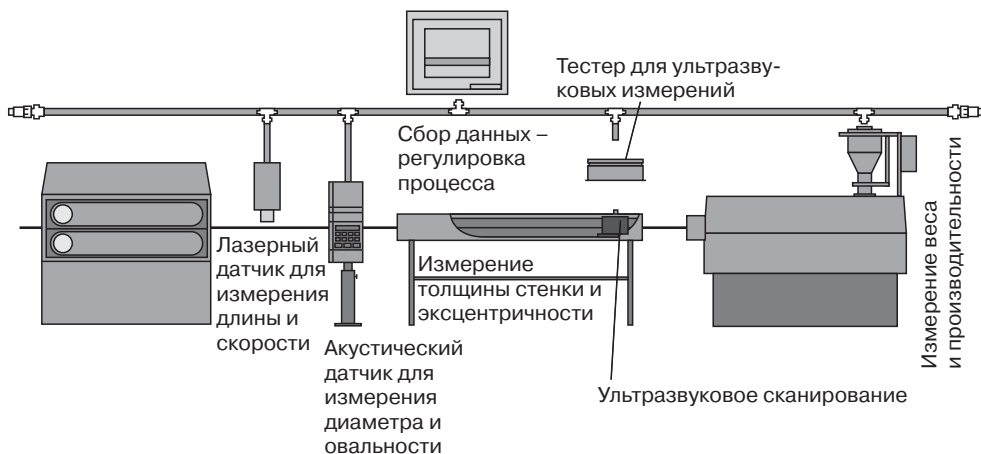


Рис. 18.5. Система для измерения толщины (с разрешения *Lasermike*)

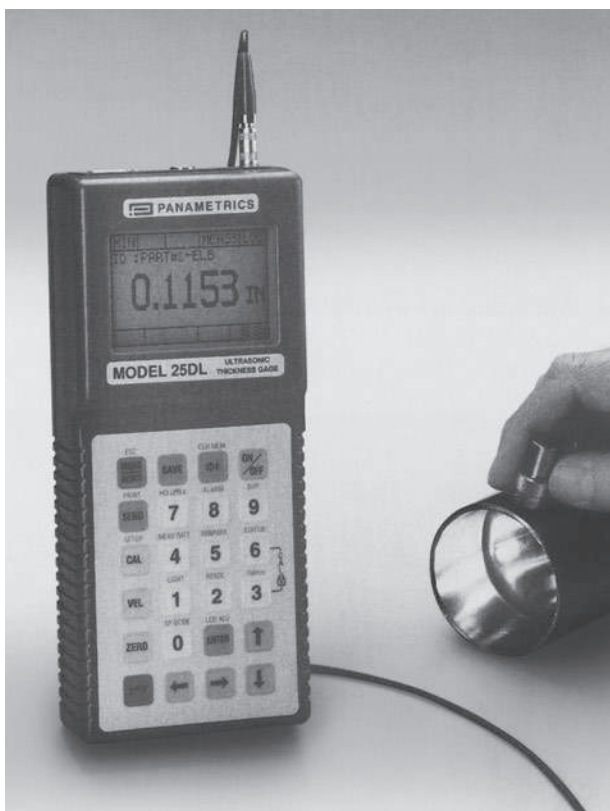


Рис. 18.6. Ультразвуковой тестер для измерения толщины (с разрешения *Panametrics Corporation*)

Неразрушающий контроль, основанный на использовании техники ультразвуковых колебаний, широко применяют газовые компании для проверки цельности соединений труб с помощью связующих [8].

Методы ультразвуковых испытаний применяют также для определения содержания влаги в материале. В таких материалах как полиамиды скорость распространения ультразвука и интенсивность поглощения энергии колебаний зависят от содержания влаги [9].

Описано также применение техники ультразвуковых колебаний для контроля армированных пластмасс [9], а также реактивных снарядов и ракет [10].

18.4. Обратное рассеяние гамма-лучей

Комптоновское обратное рассеяния фотонов, обычно называемое обратным рассеянием гамма-лучей, позволяет проводить одностороннее исследования пленок, листов, труб, композитов, покрытий и ламинатов. Датчики, с помощью которых проводятся соответствующие измерения, основаны на принципе комптоновского рассеяния. Когда поток гамма-лучей или фотонов направляется на исследуемый материал, часть потока рассеивается в обратном направлении, теряя при этом часть энергии. Рассеиваемые фотоны попадают на сцинтилляционные детекторы, в которых возбуждаются вспышки света в видимой области. Эти вспышки воспринимаются фотоумножителем, который усиливает их и преобразует в электрический ток. Сила тока пропорциональна энергии детектируемых фотонов, а частота импульсов пропорциональна массе исследуемого материала.

Принцип действия обсуждаемой измерительной схемы показан на рис. 18.7, а на рис. 18.8 представлен пример промышленного прибора, в котором использован этот принцип.

Результаты измерений, получаемые рассматриваемым методом, могут быть представлены на дисплее или переданы на компьютер, с помощью которого производится статистическая обработка данных, и осуществляется управление процессом по системе обратной связи.

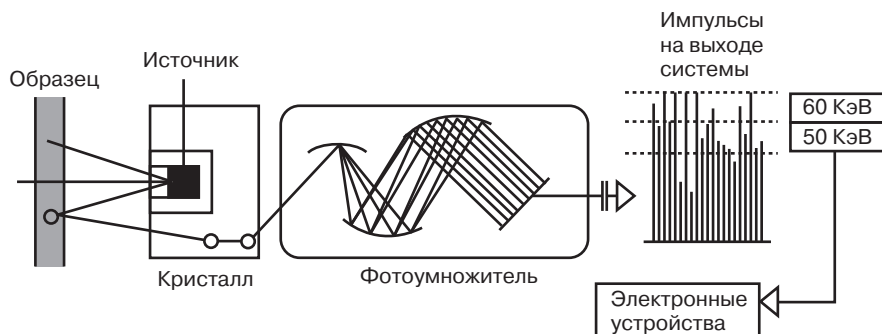


Рис. 18.7. Принцип действия техники, в которой использован метод обратного рассеяния гамма-лучей (с разрешения NDC Systems)

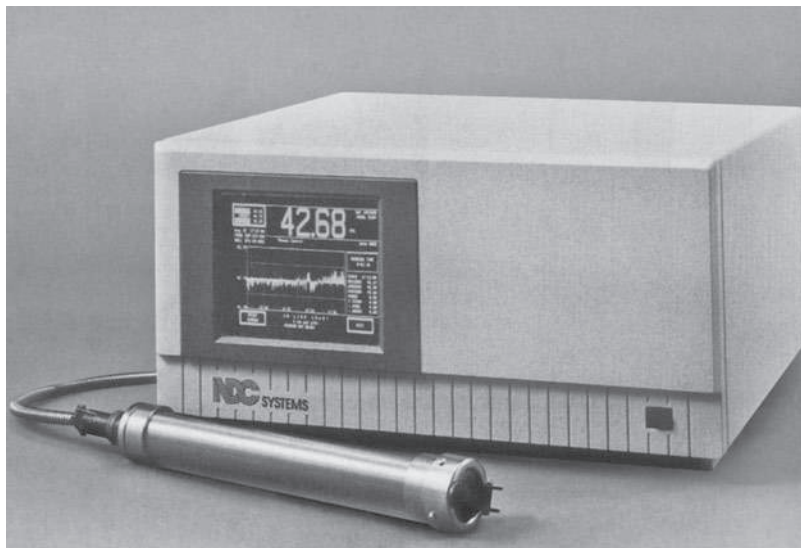


Рис. 18.8. Прибор для измерений, основанный на принципе обратного рассеяния гамма-лучей (с разрешения *NDC Systems*)

18.5. Просвечивание бета-лучами

Этот метод исследований основан на поглощении бета-частиц в объеме исследуемого материала. С одной стороны образца устанавливается источник излучения, а с противоположной стороны — детектор. При увеличении массы материала, в котором происходит поглощение, усиливается интенсивность поглощения, так что снижается величина, измеряемая детектором. Показания детектора соответствующим образом преобразуются, что позволяет осуществлять очень точные измерения веса или толщины образца.

Техника бета-просвечивания применяется для непосредственного контроля толщины или веса продукции в непрерывных процессах. При этом сенсор может устанавливаться на перемещающемся сканнере, что позволяет осуществлять высокоскоростной двумерный контроль.

Предлагаемый на рынке сенсор для осуществления анализа материала методом бета-просвечивания показан на рис. 18.9.

18.6. Лазерное сканирование

Бесконтактный датчик данного типа состоит из гелий-неонового лазера, который дает прямолинейный луч при отсутствии рассеяния. Луч лазера направляется на вращающееся зеркало, которое «сканирует» пучок через набор коллиматорных линз, направляя его на исследуемую поверхность. Далее пучок попадает на систему

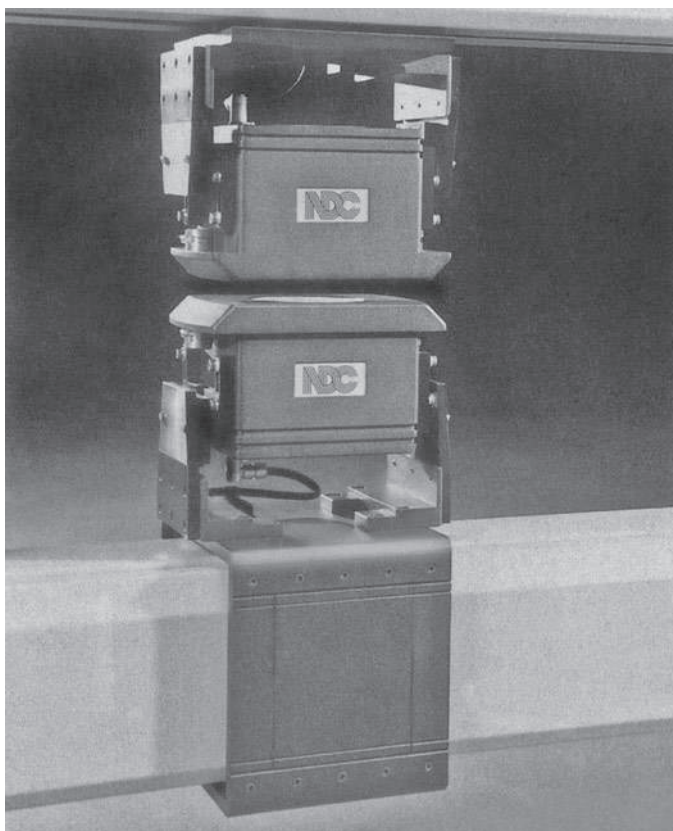


Рис. 18.9. Сенсор для контроля материала методом бета-просвечивания (с разрешения *NDC Systems*)

приемных линз, которые фокусируют свет на фотодетекторы. Исследуемая деталь, находящаяся на линии распространения света, создает область тени, край которой является исходной точкой для измерений. Сигнал от лазера, попадающий на приемник, используется для калибровки расстояния между краями тени. Результаты измерений размеров мгновенно передаются на дисплей, а также на компьютер для дальнейшей обработки.

Возможности применения этой технологии исключительно разнообразны, позволяя получать точные результаты измерений диаметра единичного отверстия, размеров ряда отверстий, овальности, осей в двух направлениях. Эта техника широко применяется для контроля размеров изделий непосредственно в ходе технологического процесса, а также для разового контроля изделий из пластмасс, таких как детали, провода, нити, шланги, тубинги, оптические волокна.

18.7. Рентгеновская флуоресценция

Эта техника обычно используется для контроля магнитных покрытий на записывающих лентах, гибких дисках и других металлических покрытиях на полимерах.

Метод позволяет определять и контролировать покрытия толщиной до 0,01 мкм.

18.8. Эффект Холла

Методика измерения толщины, известная под названием эффекта Холла, основана на создании магнитного поля, приложенного под прямым углом к токопроводящему проводнику. При этом возникает напряжение, направленное в другом направлении. Изменение магнитного поля и создаваемого напряжения, пропорциональны толщине стенки.

Толщина стенки измеряется путем размещения пробника прибора, в котором измеряется эффект Холла, с одной стороны и ферромагнитного приемника (обычно маленького стального шарика) с другой стороны исследуемого образца. Толщина стенки считывается непосредственно с цифрового индикатора прибора.

Этот метод позволяет быстро получать точные и надежные значения толщины стенки без использования загрязняющей изделие прокладки, причем результаты измерений не зависят от изменений температуры, которая влияет на скорость прохождения звука при использовании ультразвукового метода.

На рис. 18.10 показан коммерчески доступный прибор для измерения толщины, основанный на использовании эффекта Холла.

Литература

1. Krautkramer J. and Krautkramer H. *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlag, New York, 1969.
2. Ostrofsky B. «Ultrasonic Inspection of Welds» *Welding J.* (March 1965), p. 97–5.

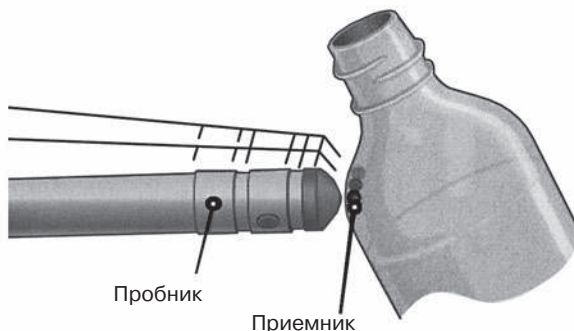


Рис. 18.10. Прибор для измерения толщины, основанный на использовании эффекта Холла (с разрешения Panametrics Corporation)



Окончание рис. 18.10

3. «Nondestructive Inspection and Quality Control» *Metals Handbook*. Vol. II, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1976, p. 179.
4. Krautkramer, Reference 1, p. 152.
5. *Ibid.*, p. 238.
6. *Ibid.*, p. 141.
7. *Ibid.*, p. 131.
8. *Nondestructive Examination of Plastic Pipe Socket Joints*, NDT Application Report. No J-714, Branson Instrument Company, Stamford, CN.
9. Krautkramer, Reference 1, p. 436.
10. Hastings C.H., Lopilato S.A. and Lynnworth L.C. *Ultrasonic Inspection of Reinforced Plastics and Resin-Ceramic Composites*. *Nondestructive Test*, 19 (1961), p. 340–346.
11. «Symposium on Recent Developments in Nondestructive Testing of Missiles and Rockets» *ASTM Spec. Tech. Pub. No. 350* (1963).

Рекомендуемые источники

1. Lamble J.H. *Principle and Practice of Nondestructive Testing*, Wiley-Interscience, New York, 1962.
2. LeGrand R. «Nondestructive Testing Methods» *Machinist* (Sept. 1946), p. 893.
3. «Symposium on Nondestructive Testing» *ASTM Spec. Tech. Publ. No. 149* (1953).
4. Hitt W.C. and Ramsey J.B. «Ultrasonic Inspection of Plastics» *Rubber and Plastics Age*, 44(4) (Apr. 1963), p. 411.

5. Seaman R.E. «Ultrasonic Inspection by Pulsed Transmissions» *Br. Plast.*, 29(7) (July 1956), p. 262.
6. Baumeister G.B. «Production Testing of Bonding Materials with Ultrasonics» *ASTM Bull. No. 204* (Feb. 1955), p. 50.

Литература, предлагаемая компаниями-производителями оборудования

1. Sales and Technical literature on «Gamma Backscatter, Beta Transmission, X-Ray Fluorescence».
2. NDC Systems. Irwindale, CA.
3. Sales and Technical literature on «Hall Effect Technique», Panametrics. Waltham, MA.
4. Sales and Technical literature on «Laser Scanning», Lasermike Inc., Dayton, OH.

19. Профессиональные организации, занимающиеся испытаниями

19.1. Американский национальный институт стандартов (ANSI)

В 1918 г., когда был основан Американский национальный институт стандартов (ANSI), работы по стандартизации в Соединенных Штатах еще только зарождались. Многие группы разрабатывали стандарты, и их интересы и деятельность зачастую пересекались. Предлагаемые ими стандарты иногда совпадали, иногда конфликтовали друг с другом. Результатом этого оказывались потери человеческого труда, денег и взаимное непонимание. Пять профессиональных организаций и три правительственных департамента решили, что необходимо координировать деятельность по стандартизации и создали для этого ANSI.

ANSI представляет собой объединение компетентных специалистов из торговли, промышленности, профессиональных экспертов, представителей потребителей, профсоюзов и правительства.

При создании ANSI перед ним ставились следующие задачи.

1. Определять необходимость в разработке тех или иных стандартов и устанавливать приоритетные задачи.
2. Поручать разработку стандартов компетентным организациям, которые могут выполнить эту работу.
3. Наблюдать за тем, чтобы общественные интересы, включая интересы потребителей, были защищены и представлены должным образом.
4. Способствовать тому, что организации, занимающиеся разработкой стандартов, выполняли эту работу наиболее эффективно, с экономией затрат людских резервов, средств и времени.
5. Следить за тем, чтобы работа по созданию стандартов выполнялась в назначенное время.

Вторая роль ANSI состояла в том, что Институт должен был согласовывать разработанные стандарты, когда они требовали одобрения консенсусом. Такое согласование могло быть дано, если были получены убедительные свидетельства со стороны разработчика в том, что те, кого касаются эти стандарты, согласились на их использование.

Другая важная функция ANSI заключалась в представлении американских интересов в работе неправительственных организаций, занимающихся стандартизацией с тем, чтобы сделать национальные и международные стандарты доступными, т. е. информировать специалистов об их существовании.

19.2. Международная организация ASTM

Международная организация *ASTM* (*ASTM International*) представляет собой крупнейшую в мире добровольную организацию, занимающуюся разработкой стандартов, которые являются наиболее надежным источником для характеристики материалов, продуктов, систем и обслуживания. Разработки *ASTM* известны как работы высокого технического уровня и компетентности. Они играют важную роль в информационной инфраструктуре мировой экономики для проектировщиков, производителей и торговых предприятий.

Международная организация *ASTM* выросла из Американского общества испытателей материалов (*ASTM*), которое было основано в 1898 г. В состав этой организации входит 130 основных комитетов и 1550 подкомитетов. Области деятельности этих комитетов определены регулирующим положением, которое представляет сбалансированные интересы производителей, пользователей иных участников, имеющих свои интересы. Возможность членства в *ASTM* открыта для всех, заинтересованных в работе в тех областях, которые представлены в *ASTM*.

Стандарты, разработанные *ASTM*, отражают общую согласованную точку зрения всех, кого они касаются — производителей, потребителей и групп лиц, представляющих общественные интересы. Эти стандарты направлены на то, чтобы помочь промышленности, правительственным учреждениям и обществу. Использование стандартов *ASTM* является абсолютно добровольным делом. Понятно, что в определенных случаях и для определенных регионов возможность применения спецификаций *ASTM* в большей или меньшей степени ограничена.

Существование стандартов *ASTM* ни к коей мере не исключает возможности производить, рекламировать и продавать товары или использовать продукты, процессы и процедуры, не согласующиеся с требованиями этих стандартов.

Стандарты, разрабатываемые *ASTM*, подлежат периодическому пересмотру и ревизии. Поэтому рекомендуется, чтобы все серьезные пользователи этих материалов основывались на последних версиях стандартов. Новое издание стандартов *ASTM* выпускается ежегодно. В среднем около 30% текста — это либо новые разработки, либо пересмотренные варианты старых стандартов. Разработанные стандарты *ASTM* — это результат деятельности более чем 30 000 членов этой организации. Эти технические эксперты представляют производителей, пользователей, потребителей, правительственные учреждения и академическую науку из более чем 100 стран.

Комитет *D20 ASTM*, занимающийся пластмассами, был сформирован в 1937 г. Он собирается трижды в год (в марте, июле и ноябре) в составе примерно 200 участников и обсуждает на технических конференциях рассматриваемые проблемы в течение трех дней. В состав этого Комитета входит около 780 человек. Он несет ответственность за разработку более 470 стандартов, входящих в ежегодный справочник *Annual Book of ASTM Standards*, раздел 8, посвященный пластмассам. Эти стандарты играли и продолжают играть важную роль во всех вопросах, связанных с применением пластмасс, включая подготовку образцов, требования к материалам и методологию проведения испытаний. Комитет *D20* также включает в себя Группу технических советников, которые участвуют в работе Технического Комитета 61 ИСО, представляя

и защищая позицию американских специалистов в этой международной организации. Комитет *D20* оказывает спонсорскую поддержку в проведении двух профессиональных обучающих курсов — «Техника испытания пластмасс» и «Инструментальный анализ полимеров».

19.3. Администрация по контролю пищевых продуктов и лекарственных средств (*FDA*)

Администрация по контролю пищевых продуктов лекарственных средств была образована в 1931 году как Агентство американского правительства, относящееся к Министерству здравоохранения.

Основная задача *FDA* состоит в защите здоровья нации от некачественных и вредных продуктов и лекарств, предметов косметики и иных товаров, таящих в себе потенциальную угрозу здоровью людей.

Промышленность пластмасс взаимодействует, главным образом, с Бюро по продовольствию, которое занимается разработкой стандартов на составы, качество и безопасность пищевых продуктов, добавок к ним, красителей, а также на их внешний вид. Это бюро проводит исследования, посвященные разработке методов определения и предотвращения попадания загрязнений в пищевые продукты. Одной из задач *FDA* является контроль за проникновением не прямых добавок. Под этим понимаются вещества, которые могут мигрировать в пищу из контактирующих с ней полимеров. Прежде чем допустить те или иные полимерные материалы к применению в пищевой промышленности для контакта с пищевыми продуктами, *FDA* проводит обширные исследования. С исключительными предосторожностями Бюро по медицинскому оборудованию *FDA*, которое ответственно за безопасность и эффективность применения медицинского оборудования, проводит испытания пластмасс, используемых в медицинской технике.

Текущий контроль за соблюдением законодательства, находящегося под юрисдикцией *FDA*, осуществляют 11 региональных, 22 районных служб и 124 местных постов.

19.4. Национальный Институт стандартов и технологии (*NIST*)

Национальное бюро стандартов (*NBS*) было основано Актом Конгресса в марте 1901 г. В 1988 г. оно было переименовано в Национальный Институт стандартов и технологии (*NIST*). Общей целью создания этой организации было повышение уровня и развитие работ в области национальной науки и технологии на благо общества.

Этот институт осуществляет исследования, которые направлены на создание основ физически обоснованных способов измерений, выполнение научных и тех-

нологических работ для промышленности и правительства, создание технического базиса для повышения производительности и развития инноваций, повышение конкурентоспособности американской промышленности в международном масштабе, поддержание равновесия в техническом обслуживании и торговле, а также обеспечении безопасности.

Работы по заказу *NIST* выполняются Национальной лабораторией измерений, национальной инженерной лабораторией и Институтом компьютерных исследований и технологий.

19.5. Национальная ассоциация производителей электрооборудования (*NEMA*)

Национальная ассоциация производителей электрооборудования (*NEMA*) была основана в 1926 г. Ассоциация объединяет 600 членов, занятых в производстве оборудования и приборов для генерации, передачи, распределения и использования электрической энергии. Членами этой организации могут быть корпорации, фирмы и отдельные лица, активно работающие в областях, соответствующих интересам *NEMA*.

NEMA разрабатывает стандарты, определяющие номенклатуру продукции, ее качество, характеристики, методы испытаний и размеры. *NEMA* также активно участвует в разработке Национальных требований по технике безопасности, взаимодействуя с правительственными и местными властями. Кроме ежемесячно выпускаемых бюллетеней, *NEMA* публикует инструкции, руководства и иные материалы, касающиеся электрических кабелей, установки оборудования, освещения, а также стандарты. По большей части деятельность *NEMA* в области стандартизации скооперирована с работой других национальных организаций. Государственные и местные власти требуют, чтобы производители электрических проводов и кабелей, изолирующих материалов, укладочных труб и распределительных коробок строго следовали требованиям *NEMA*.

19.6. Национальная противопожарная ассоциация (*NFPA*)

Национальная противопожарная ассоциация (*NFPA*) была основана в 1896 г. Ее задачами было создание, опубликование и распространение стандартов, которые бы минимизировали возможность возгораний и взрывов. В число членов *NFPA* входят представители бизнеса и промышленности, пожарных служб, медицинских учреждений, страховых компаний, учебных заведений и правительственных организаций. *NFPA* разрабатывает образовательные программы для общественных нужд, а также информирует о способах предотвращения и борьбы с пожарами. Ассоциация также проводит обслуживание специалистов, работающих с горючими жидкостями, электричеством, газами и пожарами на воде.

NFPA ежегодно публикует отчеты, в которых приводится статистика причин и мест пожаров, а также вызванных ими смертельных случаев.

Ассоциация проводит семинары по мерам пожаробезопасности, электробезопасности, защите от пожаров в промышленности, пожароопасным материалам, транспортировке людей с места пожаров и т. п.

NFPA также выполняет исследовательские программы по защите людей от пожаров, поджогов, по установке систем пожаротушения в помещениях и другим темам.

Под эгидой ассоциации выходят следующие материалы: Национальный ежегодник по пожарным характеристикам, Справочник по защите от пожаров и Технология пожаротушения.

19.7. Национальное санитарное объединение (*NSF*)

Национальное санитарное объединение (*NSF*) является независимой некоммерческой организацией, в состав которой входят ученые, инженеры, технологи, преподаватели и аналитики. *NSF* часто выступает в качестве авторитетного нейтрального агентства для правительства, промышленности и потребителей, способствуя устранению различий в подходах и достижению взаимоприемлемых решений проблем, связанных с защитой окружающей среды.

Основная деятельность *NSF* связана с разработкой и распространением стандартов и критериев, используемых при создании оборудования, безопасного для здоровья людей. Стандарт № 1, выпущенный этой организацией в 1952 г., был посвящен требованиям к газированной воде и оборудованию для закусовых. С тех пор было разработано и успешно внедрено большое количество стандартов.

Большинство стандартов, разрабатываемых *NSF*, посвящено обработке воды и очистным сооружениям, материалам, используемым для плавательных бассейнов, трубам для питьевой воды, а также стокам, отходам и выбросам, водопроводным системам для передвижных домиков и туристических автобусов, лабораторному оборудованию, палатам в больницах, полиэтиленовым бакам и контейнерам для мусора, плантациям для аэробной обработки отходов, а также другим предметам, связанным с защитой окружающей среды.

Производители оборудования, материалов и продуктов, отвечающих стандартам *NSF*, включаются в официальный список, и эти производители имеют право ставить официальный знак *NSF* на их продукцию. Представители *NSF* регулярно посещают предприятия, имеющие право на постановку такого знака, и проверяют, действительно ли выпускаемая продукция удовлетворяет требованиям стандартов *NSF*.

19.8. Общество инженеров промышленности пластмасс (*SPE*)

Общество инженеров промышленности пластмасс (*SPE*) было основано в 1942 г. с целью способствовать повышению научных и инженерных знаний в области

пластмасс. *SPE* — это профессиональное сообщество ученых, инженеров, преподавателей и студентов, работающих в области пластмасс, а также иных лиц, заинтересованных в проектировании, развитии, производстве и использовании полимерных материалов, продуктов и применяемого для этого оборудования.

В настоящее время в *SPE* входит более 37 000 членов, образующих 91 секцию. Эти секции, равно как и *SPE* в целом, ежемесячно в течение всего года организуют и проводят встречи, конференции, школы и экскурсии на промышленные предприятия. *SPE* выпускает ряд периодических изданий (журналов), как то: *Plastics Engineering*, *Polymer Engineering and Science*, *Plastics Composites* и *Journal of Vinyl Technology*.

SPE ежегодно присуждает ряд премий, затрагивающих деятельность всех уровней общества, всех секций, групп, комитетов, а также участвует в работе международных организаций.

В число секций *SPE* входят такие как: Окраска и внешний вид, Литье под давлением, Экструзия, Изделия для электрической и электронной промышленности, Термоформование, Инженерные свойства и структура, Виниловые пластмассы, Выдувное формование, Пластмассы медицинского назначения, Пластмассы в строительстве, Декорирование, Проектирование и изготовление форм.

19.9. Общество промышленности пластмасс (*SPI*)

Общество промышленности пластмасс (*SPI*) — это основное объединение лиц, работающих в производстве и переработке пластмасс, включая разработку оборудования. Общество состоит из четырех основных единиц — Восточной секции, секции Среднего Запада, секции Новой Англии и Западной секции. Комитет внешних связей общества концентрирует усилия на выработке рекомендаций для промышленности пластмасс в таких областях, как токсикология, возгораемость, отходы и энергозатраты.

Одним из наиболее активных подразделений общества является Институт труб из пластмасс, который способствует правильному использованию труб, изготовленных из полимеров, путем разработки стандартов, методов испытаний и спецификаций.

Отдел композиционных материалов на основе эпоксидных смол опубликовал более 30 методик по испытаниям и ряд технических спецификаций.

Отдел оборудования осуществляет несколько программ, основные из которых посвящены работе менеджмента, технике безопасности, производительности и качеству продукции.

В *SPI* входят также: Отдел пенополистирола, Отдел фторопластов, Отдел мебели, Международный отдел, Институт производства пластиковых бутылей, Отдел оборудования, Отдел производителей форм, Отдел пластмассовых контейнеров для транспортировки напитков, Группа разработки стратегии в создании упаковки, Отдел производителей полимерных материалов, Отдел полиуретанов, Институт армированных пластиков и композитов, Отдел структурных пенопластов, Отдел виниловой облицовки и композиций на основе поливинилхлорида.

SPI каждые три года организует и проводит национальную выставку и конференцию, посвященные пластмассам, и это одно из крупнейших мероприятий такого рода во всем мире.

SPI тесно сотрудничает с такими организациями как *ASTM* и *ANSI* в разработке новых методов испытаний, стандартов и спецификаций.

19.10. Гарантийные лаборатории (*Underwriters Laboratories, UL*)

Система гарантийных лабораторий (или лабораторий качества) — *UL* — возникла в 1984 г. как некоммерческая организация, основной задачей которой было лабораторное исследование материалов, устройств, продуктов, изделий, конструкций, методов и систем с точки зрения их безопасности для жизни и поддержания качества.

В США имеется пять испытательных лабораторий и более 200 контрольных центров. В них работают более 700 инженеров и 500 инспекторов, которые проводят необходимые испытания и исследования для оценки потенциальной опасности и правильного применения мер техники безопасности. *UL* предлагает промышленности, контролирующим органам и правительству шесть базисных программ. Это: обслуживание имеющейся продукции, классификация продукции, расшифровка составов продуктов, сертификация, инспекция, обнаружение и исследование имевших место событий.

Инженерный отдел *UL* несет ответственность за оценку индивидуальных пластмасс и других продуктов, в которые полимер входит как один из составных компонентов. Инженерный отдел осуществляет проверку таких изделий, как телевизионные установки, силовое оборудование, приборы, электротехническое оборудование и его компоненты промышленного и бытового назначения.

Для того чтобы продукция была одобрена гарантийной лабораторией, она должна пройти серию испытаний на соответствие требованиям *UL*, в частности стандарту *UL 94* на горючесть, и *UL 746* на оценку кратковременным и долговременным свойствам материала. Если материал успешно прошел все испытания, то производитель имеет право удостоверить это специальной «Желтой карточкой». На этой карточке указывается точное наименование материала, включая имя поставщика, назначение материала, цвет, его класс горючести по стандарту *UL 94*, и один или несколько размеров. Кроме того, указываются различные характеристики материала, такие как относительный температурный индекс, характеристика возгораемости при испытаниях раскаленной проволокой, возгораемость в высоковольтной дуге, сопротивление образованию дуги. Эти данные также публикуются в Справочнике материалов, прошедших испытания на оценку качества.

UL (после того как была выполнена полная программа испытаний на соответствие установленным требованиям и после согласования терминологии, условий опубликования и последующего обслуживания) публикует список компаний, которые способны выпускать продукцию соответствующего качества. Такая публикация подтверждает, что испытанные образцы этой продукции соответствуют требованиям, а компания имеет право ссылаться на подтверждение качества продукции со стороны *UL*.

При *UL* существует совет потребителей, который дает рекомендации по установлению уровня требований безопасности для анализируемой продукции, что

позволяет *UL* иметь дополнительный источник информации от непосредственных потребителей относительно безопасности продукции, а также советы о том, каким образом обучать простых людей в отношении техники безопасности и границ применения конкретной продукции.

19.11. Международная организация стандартизации (*ISO*)

ISO (ИСО) представляет собой сеть национальных организаций, занимающихся стандартизацией в 120 странах, причем каждая страна представлена одной организацией. Работу *ISO* координирует центральный совет, расположенный в Женеве (Швейцария).

ISO — это неправительственная организация. Ее члены, как это имеет место в США, не являются делегатами, направляемыми правительствами своих стран. Тем не менее *ISO* занимает весьма специфическое место между обществом и частным сектором. Это происходит вследствие того, что, с одной стороны, многие национальные организации, входящие в *ISO*, являются частью правительственных структур своих стран, а с другой стороны, другие члены делегируются организациями, возникшими вследствие взаимодействия частных компаний.

Таким образом, *ISO* может действовать как связующее звено, в котором консенсус достигается путем учета взаимных интересов бизнеса и более широких нужд общества, представленных такими ключевыми группами, как потребители и пользователи продукции.

(См. *www.ISO.org*).

20. Согласованные международные стандарты на методы испытаний

20.1. Введение

Первоначально интерес к созданию системы согласованных международных стандартов возник у американских производителей, а также у американского правительства. Глобализация мировой экономики заставила правительства и представителей бизнеса обратить внимание на создание системы международных стандартов. Особенно в течение последних лет возросли требования к согласованию стандартов *ISO/IEC*. Существует ряд обстоятельств, которые объясняют общую тенденцию к признанию ведущей роли стандартов *ISO* [1]. Это:

1. Страны Европейского союза (*EU*), а также многие остальные страны Европы пошли по пути замены национальных стандартов методами испытаний по *ISO*.
2. Японская промышленность пластмасс признала доминирующую роль стандартов *ISO*.
3. Американский совет по исследованиям в области автомобильной промышленности (*United States Council for Automotive Research, USCAR*) принял решение перейти от методов испытаний по стандартам *ASTM* к испытаниям по *ISO*.
4. Такие межнациональные компании как, например, *Xerox* проводит спецификацию своей продукции, основываясь на методах испытаний по *ISO*. Аналогичная тенденция наблюдается и в других международных компаниях, производящих электронику, медицинские товары, приборы и другие изделия потребительского назначения.
5. Правительство США также отдает предпочтение международным стандартам.
6. *ASTM* проводит постоянную работу по согласованию своих стандартов по методам испытаний пластмасс с соответствующими международными стандартами.
7. Производители полимерных материалов медленно переходят на испытания по методам *ISO*.

Мы просто не можем упустить выгоды, которые несет в себе стандартизация. Стандартизация методов испытаний пластмасс на международном уровне обеспечит производителям полимерных материалов и потребителям равные права при выходе на расширяющиеся рынки, подтвердит качество выпускаемой продукции, в долгосрочной перспективе снизит затраты и улучшит взаимопонимание. Использование одних и тех же согласованных международных стандартов по испытанию пластмасс открывает возможности сопоставления и выбора материала исходя из того, что

представляемые данные о свойствах материалов гораздо более надежны безотносительно того, кто был производителем и где был произведен материал [2].

20.2. ISO/IEC стандарты

Международная организация стандартизации (*ISO*), основанная в 1947 г., представляет собой всемирную федерацию представителей организаций, занимающихся вопросами стандартизации, из 120 стран. Каждая страна, участвующая в работе *ISO*, направляет для участия в деятельности этой организации одного официального представителя.

Электротехническая комиссия (*IEC*) была основана в 1906 г. и включает в себя представителей 50 национальных электротехнических организаций.

Встречи представителей разных стран под покровительством *ISO/IEC* преследуют цель разработки стандартов, которые могли бы быть принятыми на международном уровне. Сфера интересов *ISO* охватывает стандартизацию во всех направлениях, за исключением электротехники, электроники, а также некоторых областей телекоммуникации, которые остаются в компетенции *IEC*.

Общей задачей *ISO/IEC* является содействие развитию стандартизации и решению связанных с ней задач, с тем чтобы способствовать международному обмену товарами и услугами и развивать сотрудничество в интеллектуальной, научной, технологической и экономической областях [3].

Стандарты, разрабатываемые *ISO/IEC*, представляют собой согласованные документы, которые позволяют осуществлять выбор, подготовку образцов и их испытания в соответствии с требованиями, установленными техническими комитетами. Стандарты *ISO/IEC* по испытаниям пластмасс предлагают конкретные процедуры испытаний, основанные на всеобъемлющем анализе возможности получения сопоставимых данных при снижении их разброса из-за особенностей подготовки и испытания образцов при определении свойств пластмасс. В этих стандартах оговорены все детали, которые согласованы всеми представителями национальных организаций, входящих в *ISO*, чтобы получаемые данные были приемлемыми по всему миру.

На рис. 20.1 показаны важнейшие шаги на пути к глобальной стандартизации [4].

20.3. ISO и ASTM

В то время как две трети мира движутся по пути принятия международной системы стандартизации, имея в виду глобальное производство и мировой рынок, США перемещаются по этому пути сближения с другими странами с небольшой скоростью. Требования многонациональных автомобильных корпораций и многонациональных компаний-производителей полимерных материалов, наконец-то заставили начать движение по этому пути. Мудрость тех американских компаний, которые приняли рекомендации *ISO*, подвергалась сомнениям многими традиционалистами. Ответом

Ключевые события на пути к глобальной стандартизации

1947	1951	Середина 1960-х годов	1970	1979	Середина 1980-х	1987	1989
<ul style="list-style-type: none">В Женеве (Швейцария) была создана международная организация по стандартизации (ISO)	<ul style="list-style-type: none">В рамках ISO был организован технический комитет TC61, в задачу которого входит разработка и согласование международных стандартов по методам испытания пластмасс.В США в рамках ANSI создается группа технических советников (Technical Advisory Group – TAG) при TC61, в задачу которой входит представление позиции США при голосовании в ISO	<ul style="list-style-type: none">ASTM начинает работу по использованию системы единиц СИ в разрабатываемых ею стандартах.	<ul style="list-style-type: none">ASTM образует подкомитет D20.61, который включает в себя американскую группу TAG, так что голосование представителей США в ISO основывается на консенсусе мнений	<ul style="list-style-type: none">В Великобритании Институт стандартов разрабатывает систему стандартов качества BS 5759, призванную защитить британских производителей оборудования	<ul style="list-style-type: none">Страны европейского сообщества (Community of European Nations, CEN) начинают разработку системы стандартов, основанную на рекомендациях ISO	<ul style="list-style-type: none">Корпорация Ford Motors Company извещает поставщиков полимерных материалов о том, что в дальнейшем будет производиться только на основе метода испытаний по ISOКорпорация General Motors просит в дальнейшем использовать методы испытаний по ISO в документации, представляемой ASTM	<ul style="list-style-type: none">Комитет ASTM D20.94.02 обращает специальное внимание на требования автотранспортной промышленности, которая стала основой для формирования Американского совета по исследованиям в области автомобильной промышленности (United State Council for Automotive Research, USCAR)

Рис. 20.1. Шаги на пути к глобальной стандартизации (с разрешения Ticona Corporation)

1991	1992	1993	1994	1995	1997
<ul style="list-style-type: none"> • <i>ASTM</i> выпускает документ <i>D1999</i>, в котором дается ссылка на соответствие образцов для испытаний по <i>ASTM</i> и <i>ISO</i> и указывается на эквивалентность методов испытаний 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>ASTM</i> согласует методы испытаний полиацеталей с рекомендациями <i>ISO</i> • <i>ASTM</i> согласует методы испытаний полиакрилатов с рекомендациями <i>ISO</i> • Европейские поставщики полимерных материалов (<i>Hoechst</i>, <i>BASF</i>, <i>Hls</i> и <i>Bayer</i>) устанавливают единую форму представления данных по выпускаемой продукции «<i>CAMPUS</i>» (<i>Computer Aided Material Preselection by Uniform Standards</i>) — компьютерную базу данных для предварительного выбора материалов на основе единых стандартов, созданную на основе использования стандартов <i>ISO</i>. Предлагается соответствующее лицензирование для всех поставщиков полимерных материалов • Европа формирует единый рынок на основе стран европейского содружества, что приводит к необходимости вырабатки единых стандартов в промышленности и торговле • Отдел производителей полимерных материалов <i>SPI</i> призывает всех своих членов использовать методы испытаний по <i>ISO</i> как способ войти в глобальный рынок, при котором использование региональных и национальных стандартов оказывается ненужным препятствием • Три гиганта автомобильной промышленности официально основали Американский совет по исследованиям в области автомобильной промышленности (<i>USCAR, United State Council for Automotive Research</i>) с тем, чтобы до начала соревнования выпускаемой продукции создать единую базу для стандартизации 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>USCAR</i> согласился с необходимостью использовать системы единиц СИ и образов, предлагаемых <i>ISO</i> для испытаний полиамидов по разработанному им стандарту <i>SAE J 1639</i> • <i>USCAR</i> начал работу по использованию методик <i>ISO</i> применительно к испытаниям полиамидов при разработке своих стандартов <i>SAE</i> • <i>ISO</i> выпустил стандарт по одноточечному методу испытаний (<i>ISO 10350</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>ISO</i> выпустил стандарты по многоточечному методу испытаний: «Механические свойства полимеров» • <i>ISO</i> выпустил стандарты по многоточечному методу испытаний: «Термические и технологические свойства полимеров» • Производители инженерных пластиков в США начали или продолжили работы по переходу на методы испытаний по стандартам <i>ISO</i> • <i>SPI</i> впервые публикует документы, относящиеся к методам испытаний по <i>ISO</i>, и призывает использовать международные стандарты <i>ISO/IEC</i> для аттестации выпускаемой продукции • Компания <i>General Motors (GM)</i> предупреждает поставщиков полиамидов о том, что с января 1996 г. вся спецификация на эту продукцию должна даваться в соответствии с рекомендациями <i>ISO</i> • <i>SPI</i> на форуме промышленников, организованном в рамках Национальной выставки пластмасс в Чикаго, проводит конференцию на тему «Необходимость в создании согласованных международных стандартов» • Версия 3.0 системы «<i>CAMPUS</i>» представлена на Национальной выставке пластмасс • Японская федерация промышленности пластмасс (<i>JPIF</i>) начала рассматривать необходимость адаптации системы стандартов к требованиям <i>ISO</i> • США ратифицирует международные соглашения <i>NAFTA</i> и <i>GATT</i> (по свободной торговле, и тарифам) 	<ul style="list-style-type: none"> • Число компаний, лицензировавших систему «<i>CAMPUS</i>» в Европе, рабатываемых достигло 26, а в США 6 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>ASTM</i> начинает использовать в стандартах только единицы системы СИ

на эти сомнения может служить следующий простой пример. Методы испытаний, разработанные как *ISO*, так и *IEC*, приняты в международном масштабе благодаря структуре этих организаций. Поскольку в *ISO* участвуют 120 членов, представляющих национальные организации, занимающиеся стандартизацией (по принципу «один голос от одной страны»), разработанные документы приняты консенсусным голосованием для использования по всему миру. Напротив, поскольку *ASTM* является преимущественно региональной организацией, ее рекомендации остаются значимыми только для США.

ISO при создании международных стандартов очень успешно выполняет работу по согласованию интересов производителей, потребителей, правительств и научного сообщества.

Комитет *ASTM D20*, напротив, руководствуется интересами производителей, пользователей конечной продукции и некоторых иных групп.

Состав организаций, участвующих в работе технического комитета *TC61 ISO*, приведен в табл. 20.1.

Таблица 20.1. Состав участников технического комитета *ISO TC61* по пластмассам

Страна	Национальная организация, занимающаяся стандартизацией	Сокращенное наименование стандарта
Бельгия	<i>Institut Beige de Normalisation</i>	<i>IBN</i>
Канада	<i>Standards Council of Canada</i>	<i>SCC</i>
КНР	<i>China State Bureau of Technical Supervision</i>	<i>CSBTS</i>
Колумбия	<i>Instituto Colombiano de Norms Tecnicas</i>	<i>ICONTEC</i>
Чехия	<i>Czech Office for Standards, Metrology and Testing</i>	<i>COSMT</i>
Финляндия	<i>Finnish Standards Association</i>	<i>SFS</i>
Франция	<i>Association Francaise de Normalisation</i>	<i>AFNOR</i>
Германия	<i>Deutsches Institut fur Normung</i>	<i>DIN</i>
Венгрия	<i>Magyar Szabvanyigyi Hivatal</i>	<i>MSZH</i>
Индия	<i>Bureau of Indian Standards</i>	<i>BIS</i>
Иран	<i>Institute of Standards and Industrial Research of Iran</i>	<i>ISIRI</i>
Италия	<i>Ente Nazionale Italiano di Unificazione</i>	<i>UNI</i>
Япония	<i>Japanese Industrial Standards Committee</i>	<i>JISC</i>
Южная Корея	<i>Korean Industrial Advancement Administration</i>	<i>KIAA</i>
Нидерланды	<i>Nederlands Normalisatie-Instituut</i>	<i>NNI</i>
Филиппины	<i>Bureau of Product Standards</i>	<i>BPS</i>
Польша	<i>Polish Committee for Standardization</i>	<i>PKN</i>
Румыния	<i>Institutul Roman de Standardizare</i>	<i>IRS</i>
Россия	Комитет РФ по стандартизации, метрологии и сертификации	ГОСТ РФ
Словакия	<i>Slovak Office of Standards, Metrology and Testing</i>	<i>UNMS</i>
Испания	<i>Asociacion Espanola de Normalizacion y Certificacion</i>	<i>AENOR</i>
Швеция	<i>SIS—Standardiseringen i Sverige</i>	<i>SIS</i>
Швейцария	<i>Schweizerische Normen-Vereinigung</i>	<i>SNV</i>
Великобритания	<i>British Standards Institution</i>	<i>BSI</i>
США	<i>American National Standards Institute</i>	<i>ANSI</i>

Воспроизведено с разрешения *Society of Plastics Industry, Inc.*

В настоящее время *ASTM* делает свои документы более «интернациональными», руководствуясь методологией *ISO*, с тем чтобы привести свои рекомендации в соответствие с согласованными международными стандартами.

Спецификации, содержащиеся в стандартах на полиацетали и полиакрилаты, были переработаны, и ныне они соответствуют методам испытаний по *ISO*. *ASTM* пересматривает оставшиеся стандарты, приводя их в соответствии с требованиями *ISO* по мере того, как они поступают на ревизию. Кроме того, *ASTM* через *TAG*, участвующую в работе технического комитета *ISO*, играет важную роль в разработке новых стандартов *ISO/IEC*.

Члены *ASTM* представляют промышленности США все новые и пересмотренные стандарты *ISO* по методам испытаний пластмасс, а также играют активную роль в разработке новых стандартов непосредственно в рамках *ISO* [5].

В табл. 20.2 приведено сопоставление стандартов *ASTM* и *ISO*.

Таблица 20.2. Сопоставление стандартов, разработанных *ASTM* и *ISO*¹ в области методов испытаний пластмасс

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
<i>Изготовление образцов</i>		
D 0955	Измерение усадки по отношению к размерам формы для литевых термопластов	294-4
D 3419	Пластмассы. Литье под давлением образцов для испытаний термопластичных материалов. Часть 4 Определение усадки при формовании. Прямое литье образцов для испытаний из реактопластов на термопластавтомате	10724
D 3641	Пластмассы. Литье под давлением испытательных образцов термопластов порошкообразных формовочных материалов. Часть 2 Пластины малого размера Литье под давлением образцов из термопластов, предназначенных для литья и экструзии	294-1,2,3
D 4703	Компрессионное формование термопластичных материалов для изготовления образцов, дисков и листов Пластмассы. Образцы для испытаний из термопластов, изготовленные методом прямого прессования	293
D 524	Компрессионное формование термореактивных литевых материалов	95
D 6289	Измерение усадки по отношению к размерам формы для литевых термореактивных полимеров. Пластмассы. Термореактивные формовочные материалы. Определение усадки	2577
<i>Механические свойства</i>		
D 0256	Пластмассы. Определение ударной прочности по Изоду	180

¹ Наименования стандартов, там где это возможно, в отличие от оригинала книги, дано по официальному тексту *ISO*, а не по *ASTM*. В ряде случаев, в отличие от соответствия стандартов, показанного автором, фактически имеет место несовпадение стандартов, что отмечено при переводе. — *Примеч. ред.*

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
<i>D 0638</i>	Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1. Общие принципы. Часть 2. Условия испытаний для литьевых и экструзионных пластмасс	527-1,2
<i>D 0695</i>	Пластмассы. Определение сжимаемости	604
<i>D 0785</i>	Твердость по Роквеллу пластмасс и электроизоляционных материалов	2039-2
	Пластмассы. Определение твердости. Часть 2. Твердость по Роквеллу	
<i>D 0790</i>	Измерение свойств при изгибе неармированных и армированных пластмасс и электроизоляционных материалов	178
<i>D 0882</i>	Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 3. Условия испытаний для пленок и листов	527-3
<i>D 1043</i>	Температурная зависимость жесткости пластмасс, измеренная с помощью крутильного маятника	458-1
<i>D 1044</i>	Пластмассы. Определение износостойкости с помощью абразивного круга	9352
<i>D 1078</i>	Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении на образцах небольшого размера	6239
<i>D 1822</i>	Пластмассы. Определение предела прочности на растяжение при ударных нагрузках	8256
<i>D 1894</i>	Пластмассы. Трение и износ при скольжении. Идентификация параметров испытаний	6601
<i>D 1922</i>	Распространение трещин в полимерных пленках и тонких листах, измеренное с помощью торсионного маятника	6383-2
	Пластмассы. Пленки и листы. Определение сопротивления раздиру. Часть 2. Метод Элмендорфа	
<i>D 1938</i>	Распространение трещин в полимерных пленках и тонких листах, измеренное методом нанесения одиночного надрыва.	6383-1
	Пластмассы. Пленки и листы. Определение сопротивления раздиру. Часть 1. Раздвоенные образцы	
<i>D 2990</i>	Пластмассы. Определение поведения при ползучести. Часть 1. Ползучесть при растяжении. Часть 2. Ползучесть при изгибе методом трехточечной нагрузки	899-1,2
<i>D 3763</i>	Пластмассы. Определение поведения жестких пластмасс при проколе под воздействием удара. Часть 2. Испытание на прочность при ударе с применением датчиков нагрузки и перемещения	6603-2
<i>D 4065</i>	Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 1. Общие принципы	6721-1
<i>D 4092</i>	Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении	6721
	Определение реологических свойств расплавов полимеров динамическим методом	
<i>D 4440</i>	Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 10. Комплексная вязкость при сдвиге с использованием колебательного вискозиметра с параллельными пластинами.	6721-10

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
D 5023	Определение динамических механических свойств пластмасс методом трехточечного изгиба. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 3. Колебания изгиба. Метод резонансной характеристики	6721-3
D 5045	Метод определения пластичности и скорости выделения энергии при исследовании разрушения в условиях плоско-деформированного состояния полимерных материалов	572
D 5083	Свойства армированных реактопластов, измеренные на плоско-срезанных образцах	3268
D 5279	Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 7. Крутильные колебания. Безрезонансный метод	6721-7
<i>Термопластичные материалы</i>		
D 1239	Определение экстракции из полимерных пленок. Пластмассы. Определение веществ, экстрагируемых органическими растворителями (общепринятые методы)	6427
D 1693	Образование трещин в этиленовых пластмассах под воздействием окружающей среды. Пластмассы. Определение стойкости к растрескиванию под воздействием окружающей среды (ESC). Метод изогнутой полоски	4599
D 1928	Приготовление тонких листов и образцов для испытаний из полиэтилена методом компрессионного формования. Пластмассы. Изготовление образцов из термореактивных материалов методом прямого прессования. Пластмассы. Материалы на основе полиэтилена для литья и экструзии. Часть 2. Приготовление образцов для испытаний и определение свойств	293 1872-2
D 2581	Литьевые и экструзионные материалы на основе полибутилена. Пластмассы. Полибутиновые материалы для литья и экструзии. Часть 2. Изготовление образцов для испытаний и определение свойств	8986-1 и 2
D 2765	Определение содержания гель-фракции и степени набухания в сшитых этиленовых пластмассах. Трубы и фитинги из полиэтилена сетчатой структуры. Оценка степени образования поперечных связей по содержанию геля	10147
D 2951	Сопротивление типа III и IV полиэтиленов образованию трещин под воздействием термических напряжений	TR 1837
D 4020	Литьевые и экструзионные материалы на основе ультра-высокомолекулярного полиэтилена. Пластмассы. Полиэтилен со сверхвысокой молекулярной массой для формования и экструзии. Часть 1. Система обозначения и основа для составления технических условий. Часть 2. Подготовка испытательных образцов и определение свойств	11542-1 и 2
D 4976	Литьевые и экструзионные материалы на основе полиэтилена. Пластмассы. Полиэтиленовые материалы для литья и экструзии.	1872-1 и 2

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
	Часть 1. Система обозначения и основа для технических условий. Часть 2. Приготовление образцов для испытаний и определение свойств	
<i>D 0788</i>	Составы для приготовления литевых и экструзионных марок полиметилметакрилата.	<i>FDIS 8257-1</i>
	Пластмассы. Материалы на основе метилметакрилат-акрилонитрилбутадиенстирола для литья и экструзии. Часть 2. Приготовление испытательных образцов и определение свойств	8257-2
<i>D 4802</i>	Листы из полиметилметакрилата	
	Пластмассы. Листы из полиметилметакрилата. Типы, размеры и характеристики. Часть 1. Отлитые листы. Часть 2. Экструдированные листы	7823-1 и 2
<i>D 3965</i>	Жесткие компаунды на основе тройного сополимера акрилонитрилбутадиенстирола для труб и фитингов	7245
	Трубы и фитинги из акрилонитрилбутадиенстирола. Общие технические условия на формовочные и экструзионные материалы.	
<i>D 4203</i>	Литевые и экструзионные материалы на основе сополимеров стирола с акрилонитрилом	4894-1 и 2
<i>D 4594</i>	Пластмассы. Полистирол для литья и экструзии. Часть 1. Система обозначения и основа для составления технических условий. Часть 2. Подготовка образцов для испытаний и определение свойств.	1622-1 и 2 2897-1 и 2
	Пластмассы. Ударопрочный полистирол для литья и экструзии.	
<i>D 4634</i>	Часть 1. Система обозначения и основы для составления технических условий. Часть 2. Приготовление образцов для испытаний и определение свойств	
	Полимеры на основе стирола и малеинового ангидрида.	10366-1
	Пластмассы. Материалы на основе метилметакрилата-акрилонитрилбутадиенстирола для литья и экструзии. Часть 1. Система обозначения и основа для технических условий	
<i>D 4673</i>	Литевые и экструзионные материалы на основе тройного сополимера акрилонитрилбутадиенстирола	2580-1 и 2
<i>D 3012</i>	Стойкость полипропилена к окислению при повышенных температурах, определенная с помощью ротационного прибора.	4577
	Пластмассы. Полипропилен и сополимеры пропиленов. Определение термоокислительной стабильности на воздухе. Метод с применением печи	
<i>D 4101</i>	Литевые и экструзионные материалы на основе пропиленовых полимеров.	1873-1 и 2
	Пластмассы. Материалы на основе полипропилена для формования и экструзии. Часть 1. Система обозначения и основа для составления технических условий. Часть 2. Подготовка образцов для испытаний и определение свойств	
<i>D 5857</i>	Литевые и экструзионные материалы на основе пропиленовых полимеров для международного рынка	1873-1 и 2
<i>D 1203</i>	Измерение потерь летучих из пластмасс с помощью активированного угля.	176

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
	Пластмассы. Определение потери пластификатора. Метод с применением активированного угля	
<i>D 1243</i>	Измерение вязкости разбавленных растворов поливинилхлорида	<i>DIS 1628-1</i>
<i>D 1705</i>	Определение размеров частиц в порошках полимерах и сополимерах на основе винилхлорида	1624
<i>D 1755</i>	Пластмассы. Смолы на основе гомополимеров и сополимеров винилхлорида. Ситовый анализ в воде	1264 (только определение pH)
<i>D 1784</i>	Полимеры винилхлорида. Компаунды на основе жесткого поливинилхлорида. Компаунды на основе хлорированного винилхлорида.	1163-1 и 2
	Пластмассы. Материалы на основе непластифицированного поливинилхлорида для литья и экструзии. Часть 1. Система обозначения и основа для составления технических условий. Часть 2. Подготовка образцов для испытаний и определение свойств	
<i>D 1823</i>	Эффективная вязкость пластизолой и органоэолой, измеренная при высоких скоростях сдвига на экструзионном вискозиметре.	3219
	Пластмассы. Полимеры/смолы в жидком состоянии или в виде эмульсий или дисперсий. Определение вязкости с помощью ротационного вискозиметра при определенной скорости сдвига	
<i>D 1824</i>	Эффективная вязкость пластизолой и органоэолой, измеренная при низких скоростях сдвига на вискозиметре Брукфильда.	2555
	Пластмассы. Полимеры/смолы жидкие, эмульсии или дисперсии. Определение кажущейся вязкости по методу Брукфильда	
<i>D 2115</i>	Высокотемпературная стабильность композиций на основе поливинилхлорида, измеренная в печи.	305
	Пластмассы. Определение термостабильности поливинилхлорида, подобных ему хлорсодержащих гомополимеров и сополимеров и их соединений. Метод изменения цвета	
<i>D 2287</i>	Литьевые и экструзионные композиции на основе нежесткого поливинилхлорида	2896-1 и 2898-2
<i>D 3030</i>	Определение летучих (включая воду) в винилхлоридных полимерах.	1269
	Пластмассы. Смолы на основе гомополимеров и сополимеров винилхлорида. Определение содержания летучих веществ (включая воду)	
<i>D 3367</i>	Сорбция пластификатора поливинилхлоридом под действием центробежных сил.	4608
	Пластмассы. Смолы на основе гомополимеров и сополимеров винилхлорида общего назначения. Определение абсорбции пластификатора при комнатной температуре	
<i>D 422</i>	Термическая стабильность поливинилхлорида.	305
	Пластмассы. Определение термостабильности поливинилхлорида, подобных ему хлорсодержащих гомополимеров и сополимеров и их соединений. Метод изменения цвета	
<i>D 0789</i>	Определение относительной вязкости, точки плавления и содержания влаги в полиамидах.	960 (только для воды)

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
<i>D 4066</i>	Пластмассы. Полиамиды. Определение содержания воды Литьевые и экструзионные материалы на основе полиамидов	1874-1
<i>D 1430</i>	Пластмассы. Гомополимеры полиамидные и сополимеры для формования и экструзии. Часть 1. Обозначения Пластмассы на основе политрихлорфторэтилена.	12086-1 и 2
<i>D 1710</i>	Пластмассы. Фторполимерные дисперсии и материалы для литья и экструзии. Часть 1. Система обозначения и основа для состав- ления технических условий. Часть 2. Подготовка образцов для испытаний и определение свойств Политетрафторэтилен. Основные формы. Стержни. Толстостен- ные трубки.	13000-1 и 2
<i>D 2116</i>	Пластмассы. Политетрафторэтиленовые полупродукты. Часть 1. Система обозначения и основа для составления технических условий. Часть 2. Подготовка образцов для испытаний и опреде- ление свойств Литьевые и экструзионные материалы на основе перфторуглеро- дов	12086-1 и 2
<i>D 3159</i>	<i>См. выше</i> Литьевые и экструзионные материалы на основе модифицирован- ных сополимеров этилена с тетрафторэтиленом	12086-1 и 2
<i>D 3275</i>	<i>См. выше</i> Сополимеры на основе этилена и хлортрифторэтилена для литья, экструзии и покрытий	12086-1 и 2
<i>D 3307</i>	<i>См. выше</i> Литьевые и экструзионные материалы на основе сополимеров фторалкокси- и фторуглеродов	12086-1 и 2
<i>D 3308</i>	<i>См. выше</i> Политетрафторэтиленовая лента, полученная стачиванием	13000-1 и 2
<i>D 4441</i>	<i>См. выше</i> Водные дисперсии политетрафторэтилена	12086-1 и 2
<i>D 4591</i>	<i>См. выше</i> Определение температур и теплот плавления фторполимеров методом дифференциальной сканирующей калориметрии	12086-1 и 2
<i>D 4894</i>	<i>См. выше</i> Гранулированные материалы на основе политетрафторэтилена для литья и плунжерной экструзии	12086-1 и 2
<i>D 4895</i>	<i>См. выше</i> Политетрафторэтилен, полученный из дисперсии	12086-1 и 2
<i>D 5575</i>	<i>См. выше</i> Система и основа для спецификации сополимеров винилиден- фторида с другими фторированными мономерами	12086-1 и 2
<i>D 5675</i>	<i>См. выше</i> Микророшки фторполимеров	12086-1 и 2
<i>D 6040</i>	<i>См. выше</i> Методы испытаний листов и пленок, полученных экструзией из политетрафторэтилена	12086-1 и 2

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
D 3935	Ненаполненные и армированные материалы на основе поликарбоната. Пластмассы. Поликарбонаты для литья и экструзии. Часть 1. Система обозначения и основа для составления технических условий. Часть 2. Подготовка образцов для испытаний и определение свойств	7391-1 и 2
D 4349	Эфиры полифенилена	<i>DIS</i> 15103-1 и -2
D 4181	Литьевые и экструзионные полиацетали (полиоксиметилены)	<i>DIS</i> 9988-1 и -2
D 4507	Термопластичные полиэфиры. Пластмассы. Материалы для литья и экструзии из термопластичного полиэфира. Часть 1. Система обозначения и основа для составления технических условий. Часть 2. Подготовка образцов для испытаний и определение свойств	7792-1 и 2
D 4550	Термопластичные эластомеры на основе полиэфиров. Пластмассы. Термопластичные эластомеры на основе сложного полиэфира/сложного эфира и простого полиэфира/сложного эфира для литья и экструзии. Часть 1. Система обозначения и основа для составления технических условий. Часть 2. Подготовка образцов для испытаний и определение свойств	14910-1 и 2
D 5927	Методы испытаний литьевых и экструзионных термопластичных полиэфиров на основе рекомендаций <i>ISO</i> <i>См. выше</i>	7792-1 и 2
<i>Армированные реактопласты</i>		
D 2584	Потери при прокаливании сшитого армированного пластика. Стеклопластики. Препреги, формовочные массы и слоистые материалы. Определение содержания стекловолокна и минеральных наполнителей. Методы сжигания	1172
D 2734	Содержание пустот в армированных пластиках. Скелотекстолиты. Определение содержания пустот. Методы определения при сжигании, механическом измельчении и статическом подсчете	7822
D 3846	Прочность на сдвиг армированных пластиков в плоскости армирования	4585
D 3914	Прочность на сдвиг пластиков, армированных стекловолокнами, в плоскости армирования и полученными методом пултрузии	4585
<i>Пленки и листы</i>		
D 1709	Определение ударной прочности методом свободно падающего груза	7765-1, 2
D 2578	Растяжение влажных пленок из полиэтилена и полипропилена. Пластмассы. Пленка и листы. Определение натяжения при смачивании	8296
D 2732	Пластмассы. Пленка и листы. Определение изменения размеров после нагревания	11501
D 3354	Пластмассы. Пленка и листы. Определение сопротивления слиянию	11502

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
D 4321	Предел текучести упаковки, изготовленной из полимерных пленок. Пластмассы. Пленка и листы. Определение средней толщины образца и средней толщины и выхода рулона гравиметрическим методом (гравиметрическая толщина)	4591
	<i>Ячеистые материалы на основе пластмасс и эластомеров</i>	
D 1056	Материалы полимерные ячеистые эластичные. Изделия из пористой и пенистой резины. Технические условия. Часть 1. Листовые изделия	6916-1
D 1621	Поропласты жесткие. Определение характеристик при сжатии	844
D 1622	Поропласты и пористая резина. Определение кажущейся (насыпной) плотности	845
D 1623	Поропласты жесткие. Определение механических свойств при растяжении	1926
D 2126	Старение жестких пенопластов при различных температурах и влажности.	2796
D 2842	Поропласты жесткие. Испытание стабильности размеров	2896
D 2856	Поропласты жесткие. Определение объемного процентного соотношения открытых и закрытых пор	4590
D 3453	Мягкие полимерные материалы на основе полиуретанов, применяемые для изготовления подушек автомобильных сидений, матрацев и аналогичных изделий. Материалы полимерные ячеистые эластичные. Пенополиуретан, применяемый в условиях нагрузки, за исключением основы ковров. Технические условия	5999
D 3574-A	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	845
3574-B1	Поропласты жесткие. Определение характеристик при сжатии. Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	2439
3574-B2	Поропласты жесткие. Определение характеристик при сжатии. Материалы полимерные ячеистые эластичные. Определение твердости	2439
3574-C	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов. Материалы полимерные ячеистые эластичные. Определение динамометрических характеристик при сжатии. Часть 1. Материалы с низкой плотностью	3386-1
3574-D	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	1856

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
	Материалы полимерные ячеистые эластичные. Определение прочности на раздир	
3574-E	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	1798
	Материалы полимерные ячеистые эластичные. Определение предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве	
3574-F	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	8067
	Материалы полимерные ячеистые эластичные. Определение прочности на раздир	
3574-G	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	7231
	Материалы эластичные полимерные ячеистые. Метод оценки величины воздушного потока при постоянном перепаде давления	
3574-H	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	8307
	Материалы полимерные ячеистые гибкие. Определение упругости с применением срикошетившего шарика	
3574-13	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	3385
	Материалы полимерные ячеистые эластичные. Определение усталости при постоянной нагрузке	
3574-14	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	нет
3574-J	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	2440
	Материалы полимерные ячеистые эластичные и жесткие. Испытания на ускоренное старение	
3574-K	Мягкие пенопласты — блоки, упаковочные материалы и отливки из полиуретанов.	2440
	Материалы полимерные ячеистые эластичные и жесткие. Испытания на ускоренное старение	
D 3575	Мягкие пенопласты на основе полиолефинов.	7214
D 3576	Поропласты. Полиэтилен. Методы испытаний	
	Эластичные пенопласты, используемые для изготовления ковров и подстилок.	5999
	Материалы полимерные ячеистые эластичные. Пенополиуретан, применяемый в условиях нагрузки, за исключением основы ковров. Технические условия	
D 3748	Оценка свойств жестких пенопластов высокой плотности на основе термопластов.	9054
	Поропласты жесткие. Методы испытаний материалов с высокой плотностью и способностью к самообразованию пленки	
D4274-A	Испытания полиолов, используемых для изготовления полиуретанов. Определение гидроксильного числа полиолов	CD 14900
D4274-B	То же	CD 14900

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
<i>D4274-C</i>	То же	<i>CD 14900</i>
<i>D 4660</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение содержания изомеров в изоцианатах	<i>TR 9372</i>
<i>D 4661</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение общего содержания хлора в изоцианатах. Пластмассы. Ненасыщенные полиэфир и эпоксидные смолы. Определение общего содержания хлора	4615
<i>D 4661</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение общего содержания хлора. Каучук и резиновые изделия. Определение содержания брома и хлора. Метод сжигания в колбе в присутствии кислорода	7725
<i>D 4669</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение удельного веса изоцианатов. Фотография. Фотохимикалии. Методы испытаний. Часть 11. Определение относительной плотности	10349-11
<i>D 4672</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение содержания воды в полиолах	<i>CD 14897</i>
<i>D 4876</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение активности исходных и модифицированных изоцианатов	<i>CD 14898</i>
<i>D 4877</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение цветности изоцианатов по шкале АРНА. Прозрачные жидкости. Оценка цвета по платиново-кобальтовой шкале	6271
<i>D 4878</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение вязкости полиолов. Пластмассы. Полимеры/смолы в жидком состоянии или в виде эмульсий или дисперсий. Определение вязкости с помощью ротационного вискозиметра при определенной скорости сдвига	3219
<i>D 4889</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение вязкости исходных и модифицированных изоцианатов	3104
<i>D4890-B</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение цветности изоцианатов по шкалам АРНА и Гарднера. Прозрачные жидкости. Оценка цвета по платиново-кобальтовой шкале. Часть 2. Спектрофотометрический метод	6271
<i>D 5155</i>	Сырьевые материалы, используемые для получения полиуретанов. Определение содержания изоцианатов и ароматических изоцианатов	<i>CD 14896</i>
<i>D 6099</i>	Реакционное формование полиуретанов. Активность умеренно- и высокоактивных изоцианатов	<i>CD 14898</i>
<i>Термические свойства</i>		
<i>D 0638</i>	Пластмассы. Определение характеристик горения горизонтально и вертикально расположенных образцов, находящихся в контакте с небольшим пламенем	1210

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
D 0648	Пластмассы. Определение температуры прогиба под нагрузкой. Часть 2. Пластмассы и эбонит	75-1,2
D 0746	Пластмассы. Определение температуры хрупкости при ударе	974
D 1238	Пластмассы. Определение индекса текучести расплава по массе термопластов	1133
D 1525	Пластмассы. Термопластичные материалы. Определение температуры размягчения по Вика (<i>VST</i>)	306
D 1790	Пластмассы. Пленка и листы. Определение температуры растрескивания на холоде	8570
D 1929	Горючесть пластмасс Пластмассы. Определение температуры возгорания с использованием печи на горячем воздушном дутье	871
D 2863	Пластмассы. Определение характеристик горения по кислородному индексу. Часть 2. Испытание при температуре окружающей среды.	4589-2
D 3417	Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (<i>DSC</i>). Часть 3. Определение температуры и энтальпии плавления и кристаллизации	11357-3
D 3801	Пластмассы. Определение текучести на вискозиметре с капиллярной или щелевой фильерой	11443
D 4804	Определение характеристик горючести нежестких твердых пластмасс. Пластмассы. Определение горючести тонких гибких образцов в вертикальном положении при контакте с источником возгорания со слабым пламенем	9773
D 4986	Поропласты. Определение характеристик горения горизонтально расположенных небольших образцов под действием небольшого пламени. Лабораторная горелка, используемая при испытаниях пластмассовых образцов малых размеров	9772
D 5025	Пластмассы. Испытания на огнестойкость. Стандартные источники воспламенения	IEC 695-11-3 10093
D 5048	Пластмассы. Определение горючести образцов с применением источника пламени 125 мм	10351
D 5207	Калибровка пламени 20 и 125 мм для испытаний на горючесть пластмассовых образцов малых размеров	IEC-695-11-3, 4
<i>Оптические свойства</i>		
D 0542	Пластмассы. Определение показателя преломления	489
D 1003	Пластмассы. Определение мутности прозрачных материалов Пластмассы. Определение общего коэффициента пропускания светового потока прозрачными материалами	14782 13468
<i>Аналитические методы</i>		
D 0494	Пластмассы. Фенольные формовочные материалы. Определение содержания веществ, растворимых в ацетоне (условное содержание смолы в материале в неотформованном состоянии).	308

Продолжение табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
	Пластмассы. Фенолоформальдегидные формовочные материалы. Определение содержания веществ растворимых в ацетоне	59
<i>D 1505</i>	Измерение плотности пластмасс методом градиентных труб. Пластмассы. Методы определения плотности непористых пластмасс. Часть 1. Метод погружения, метод жидкостного пикнометра и метод титрования. Часть 2. Определение плотности с помощью градиентной колонки	1183
<i>D 1601</i>	Пластмассы. Разбавленные растворы полиэтилена и полипропилена. Определение числа вязкости и предельного числа вязкости. Определение сажи в полиолефинах	1191
<i>D 1603</i>	Трубы и фитинги полиолефиновые. Определение содержания сажи путем прокалывания пиролиза. Метод испытания и общие технические условия	6964
<i>D 1921</i>	Определение размера частиц пластмасс методом ситового анализа. Смолы на основе гомополимеров и сополимеров винилхлорида. Ситовый анализ на приборе с воздушным соплом	4610
<i>D 2124</i>	Анализ состава поливинилхлоридных композиций с использованием метода инфракрасной спектроскопии. Пластмассы. Поливинилхлоридные смолы. Определение количества примесей и посторонних частиц	1265
<i>D 2857</i>	Вязкость разбавленных растворов полимеров. Пластмассы. Полиамиды. Определение числа вязкости. Пластмассы. Определение вязкости полимеров в разбавленном растворе с применением капиллярных вискозиметров. Часть 1. Общие принципы	307-1 1628-1
<i>D 3749</i>	Определение содержания остаточного мономера в поливинилхлориде методом газовой хроматографии	4601
<i>D 4328</i>	Пластмассы. Соплимеры стирола и акрилонитрила. Определение содержания остаточного мономера акрилонитрила. Метод газовой хроматографии	4581
<i>D 5830</i>	Пластмассы. Определение содержания золы. Часть 1. Общие методы. Пластмассы. Определение веществ, экстрагируемых органическими растворителями (общепринятые методы)	3451-1 6427
	<i>Пластмассы, подвергаемые деградации</i>	
<i>D 5209</i>	Определение аэробного разложения пластмасс в присутствии бытовых стоков. Пластмассы. Определение способности к полному аэробному биологическому разложению в водной среде. Метод с анализом выделяемого диоксида углерода	14852
<i>D 5210</i>	Определение аэробного разложения пластмасс в присутствии бытовых стоков	CD 14853
<i>D 5271</i>	Определение аэробного разложения пластмасс в системе активируемой обработке сточных вод. Пластмассы. Определение способности к полному аэробному биологическому разложению в водной среде. Метод с измерением потребления кислорода в закрытом респирометре	14851

Окончание табл. 20.2

Стандарт <i>ASTM</i>	Наименование стандарта	Стандарт <i>ISO</i>
D 5338	Пластмассы. Определение способности к полному аэробному биологическому разложению в контролируемых условиях компостирования. Метод с применением анализа выделяемого диоксида углерода. Часть 1. Общий метод. Часть 2. Гравиметрическое измерение диоксида углерода	14855
D 5551	Определение аэробного разложения пластмасс в условиях анаэробного поглощения	CD 15983

20.4. Сбор и представление данных, полученных при испытаниях

Для того чтобы минимизировать различия в результатах испытаний, обычно возникающих из-за колебаний в свойствах используемых для измерений образцов и условиях испытаний, *ISO* рекомендует выполнение следующих требований.

<i>ISO</i> 10350: 1993	Пластмассы. Сбор и представление сопоставимых данных, определяемых одним значением.
<i>ISO</i> 10403-1: 1994	Пластмассы. Сбор и представление сопоставимых данных, определяемых несколькими значениями. Часть 1. Механические свойства.
<i>ISO</i> 10403-2: 1994	Пластмассы. Сбор и представление сопоставимых данных, определяемых несколькими значениями. Часть 2. Термические и технологические свойства.

20.4.1. Проектирование и изготовление литьевой формы

Стандарт *ISO* 3167 устанавливает правила получения многоцелевых образцов для испытания пластмасс. Для этого требуется сбалансированная двухгнездная форма с определенным образом расположенными литниковыми каналами. Два идентичных гнезда с большими впускными литниками и сбалансированной литниковой системой позволяют обеспечить правильное заполнение формы и однородные образцы с одинаковой степенью ориентации и минимальным влиянием предшествующих сдвиговых деформаций.

На рис. 20.2 показано различие между образцами старой конструкции, которые получали в многогнездных несбалансированных формах, и образцы, которые получены в соответствии с требованиями *ISO* [6].

20.4.2. Размеры образцов

Использование одних и тех же многоцелевых образцов для испытаний различных типов — на растяжение, изгиб, удар и деформационную теплостойкость — позволяет

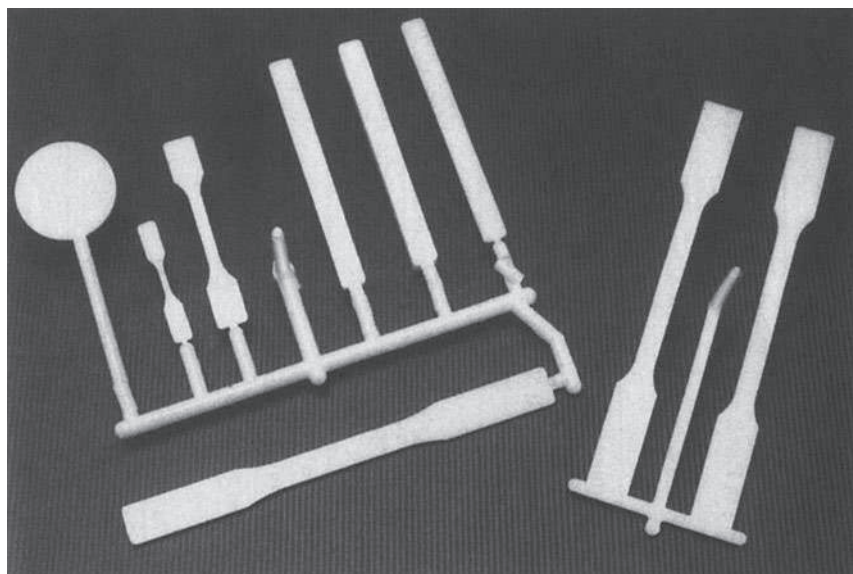


Рис. 20.2. Различие между образцами, получавшимися согласно требованиям *ASTM*, и формуемыми по *ISO* (с разрешения *Ticona Corporation*)

получать сопоставимые результаты. Этот подход позволяет избежать различий, которые привносятся при использовании различных по размеру образцов, тем самым способствуя получению воспроизводимых и сопоставимых данных.

20.4.3. Технологические параметры

Стандарты *ISO 294-1*, *-2*, *-3* и *-4* подчеркивают необходимость строгого соблюдения однотипности условий переработки полимеров, что делает возможным получение всегда одинаковых образцов. Поскольку скорость заполнения формы заметно влияет на механические и физические свойства материала, согласно требованиям стандарта устанавливается именно скорость течения, а не давление формования или время заполнения формы. В стандартах *ISO*, относящихся к конкретным материалам, определяется температура расплава и температура формы, а также скорость литья для различных классов полимеров. Этот подход позволяет минимизировать влияние вязкости и скорости сдвига при изготовлении образцов из различных материалов [7].

20.4.4. Литьевая машина

Размеры литьевой машины (термопластавтомата) и правильный контроль ее работы позволяют исключить деструкцию полимера и обеспечить однородность материала в различных впрысках. В стандарте *ISO 294* оговорены ограничения на размеры цилиндра литьевой машины по отношению к объему впрыска. Стандарт также рекомендует использовать такие литьевые машины, в которых может быть осуществлена регулировка скорости впрыска не зависимо от давления литья [8].

Кроме необходимости проведения испытания на однородных образцах, столь же важное значение имеет система представления получаемых результатов. Стандарт *ISO* рекомендует, чтобы все результаты измерений были представлены в системе единиц СИ.

Табл. 20.3 содержит рекомендации стандарта *ISO 10350* по выбору образцов для испытаний и формату представления экспериментальных данных.

20.5. Компьютерный предварительный выбор материала по согласованным стандартам (*CAMPUS*)

Система *CAMPUS*, впервые введенная в Европе в 1988 г., довольно быстро стала основным стандартным методом представления данных по свойствам полимерных материалов. Система *CAMPUS* способствует сопоставлению данных, полученных на основе согласованных методов стандартных испытаний, что отличает ее от увеличивающегося числа данных, представляемых различными коммерческими группами [8]. Программное обеспечение, созданное инженерными службами производителей, в настоящее время бесплатно распространено по всему миру на пяти языках и используется 40 ведущими фирмами, выпускающими полимерные материалы.

Все производители, желающие представлять свои данные в системе *CAMPUS*, должны руководствоваться стандартами *ISO*. В отличие от других коммерческих баз данных, которые могут использовать различные источники информации и разные методы испытаний, система *CAMPUS* гарантирует конечного потребителя продукции во внутренней однородности представляемых данных. Программное обеспечение, ориентированное на использование в персональных компьютерах с операционной системой *Windows*, удобно при использовании. Для того чтобы выбрать материал, потребитель должен только определить, какие свойства материала необходимы для применения в его конкретных условиях, и ввести показатели этих свойств или допустимый интервал свойств в компьютер. На дисплее немедленно появится список кандидатов. На рис. 20.3 и 20.4 представлены типичные примеры данных, представляемых системой *CAMPUS*.

В более поздних версиях системы *CAMPUS* информация дается в более совершенной форме, необходимой для конструирования изделий, поскольку в этом случае представляются результаты многоточечных измерений, а именно температурные зависимости сдвигового модуля упругости, изохронные зависимости напряжения от деформации, зависимости секущего модуля от деформации. Это контрастирует с обычными «одноточечными» представлениями механических свойств полимерных материалов, такими как предел прочности, модуль при изгибе или ударная прочность по Изоду. Данные многоточечных измерений довольно редко включаются в обычные справочники [9].

Используя систему *CAMPUS*, потребитель также может выбрать и сопоставить различные свойства материала в соответствии с его специфическими требованиями,

Таблица 20.3. Условия испытаний и формат представления данных, определяемых одним значением, согласно стандарту ISO 10350:1993

Свойство	Стандарт	Тип образца. Размеры в мм	Единицы	Условия испытаний и дополнительные указания
Реологические свойства				
Массовый индекс течения	ISO 1133 ISO 2577	Литьевые композиции	г/10 мин	Указания по выбору температуры и нагрузки содержатся во второй части стандартов на материалы
Объемный индекс течения			см³/ 10 мин	
Усадка			%	Только для термореактивных смол
Механические свойства (при 23 °C и 50% влажности, если иное не оговорено)				
Модуль упругости			МПа	Скорость растяжения 1 мм/мин; область деформаций между 0,05 и 0,25%
Напряжение в пределе течения	ISO 527-1 и ISO 527-2	ISO 3164	МПа	Скорость растяжения 50 мм/мин, если деформация в пределе текучести > 10%
Деформация в пределе течения			%	
Номинальная деформация при разрушении			%	
Напряжение при деформации 50%			МПа	При 50 мм/мин; только если предел текучести не достигается при деформации ≤ 50%
Напряжение при разрушении	ISO 899-1	ISO 3167	МПа	Скорость растяжения 5 мм/мин. Только если деформация при разрушении < 10%
Деформация при разрушении			%	
Модуль упругости при ползучести				
Модуль упругости при ползучести	ISO 178	80×10×4	МПа	На базе 1000 ч при деформации ≤ 0,5%
Модуль упругости при изгибе			МПа	Скорость 2 мм/мин
Модуль упругости при изгибе	ISO 179/1eU		МПа	При +23 °C. Удар по короткой стороне образца
Ударная прочность по Шарпи			кДж/м²	

Ударная прочность по Шарпи на образцах с надрезом	ISO 179/1eU	80×10×4	кДж/м²	При +23 °С. Удар по короткой стороне образца
Ударная прочность при растяжении	ISO 8256		кДж/м²	При -30 °С. При +23 °С. V-образный двухсторонний надрез под углом 45 град, r = 1 мм. Испытания выполняются, если при испытаниях по Шарпи с надрезом образец не разрушается
Термические свойства				
Температура плавления	ISO 3146	Литьевые композиции	°С	Метод C (ДСК или ДТА); 10 °С/мин
Температура стеклования	IEC 106	Литьевые композиции	°С	Метод A (ДСК или ДТА); 10 °С/мин
Температура прогиба под нагрузкой	ISO 75-1 и ISO 75-2	110×10×4 или 80×10×4	°С	0,45 Па для не очень жестких материалов
			°С	1,8 Па как для мягких, так и для жестких материалов
			°С	8,0 Па только для жестких материалов
Температура размягчения по Вика	ISO 306	10×10×4	°С	Скорость 50 К/мин; нагрузка 50 Н
Коэффициент линейного расширения параллельно нормально	TMA	По ISO 3167	К ⁻¹	Среднее значение для диапазона от 23 до 55 °С
Горючесть	ISO 1210	125×13×1,6	Ступени	Класс в следующей последовательности: HB, V-2, V-1, V-0 Указать класс: 5V1 или 5V2
		Увеличить толщину	Ступени	
		150×150×3	Ступени	
		Увеличить толщину	Ступени	
Предельное значение кислородного индекса	ISO 4589	80×10×4	%	Метод A; зажигание с верхней поверхности

Окончание табл. 20.3

Свойство	Стандарт	Тип образца. Размеры в мм	Единицы	Условия испытаний и дополнительные указания
Электрические свойства				
Относительная проницаемость	IEC 250	Пластина толщиной 2 мм	—	Частота 100 Гц или 1 МГц
Фактор потерь			—	
Объемное сопротивление	IEC 93		Ом·см	Измерения при напряжении между контакт- ными электродами 100 В
Поверхностное сопротивление			Ом	
Диэлектрическая прочность	IEC 243-1		кВ/мм	Использовать электроды в форме коаксиаль- ных цилиндров 25/75 мм.
			—	Погрузить в трансформаторное масло по IEC 296. Кратковременные испытания
Сравнительный индекс образо- вания трещин	IEC 112	≥15×≥15×4	%	Использовать раствор А
Остальные свойства				
Водопоглощение	ISO 62	Пластина толщиной 2 мм	%	Равновесное значение при 23 °С
			%	Равновесное значение при 23 °С и относительной влажности 50%
Плотность	ISO 1183	≥10×≥10×4	кг/м³	

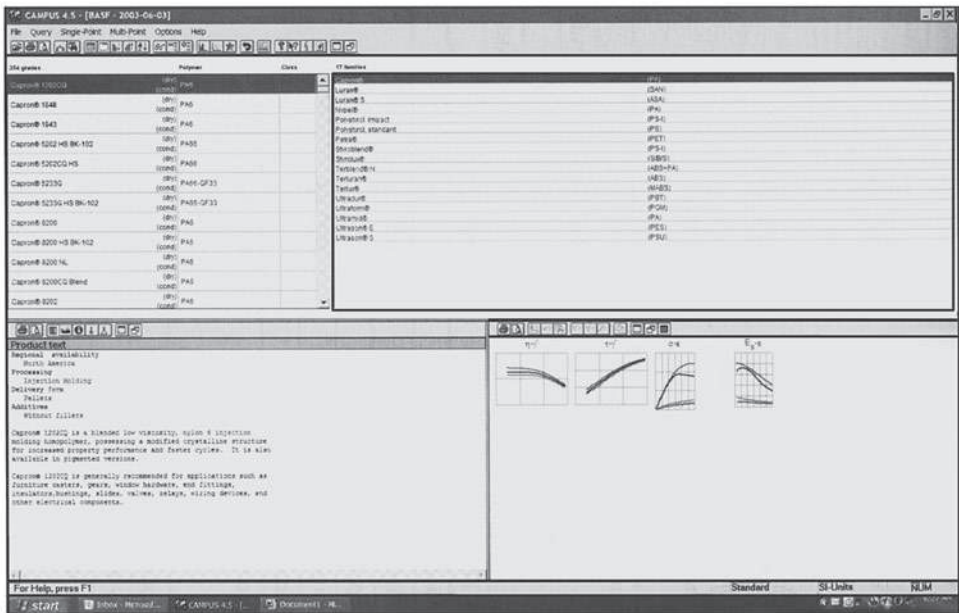


Рис. 20.3. Типичный пример представления результатов поисков в базе данных CAMPUS

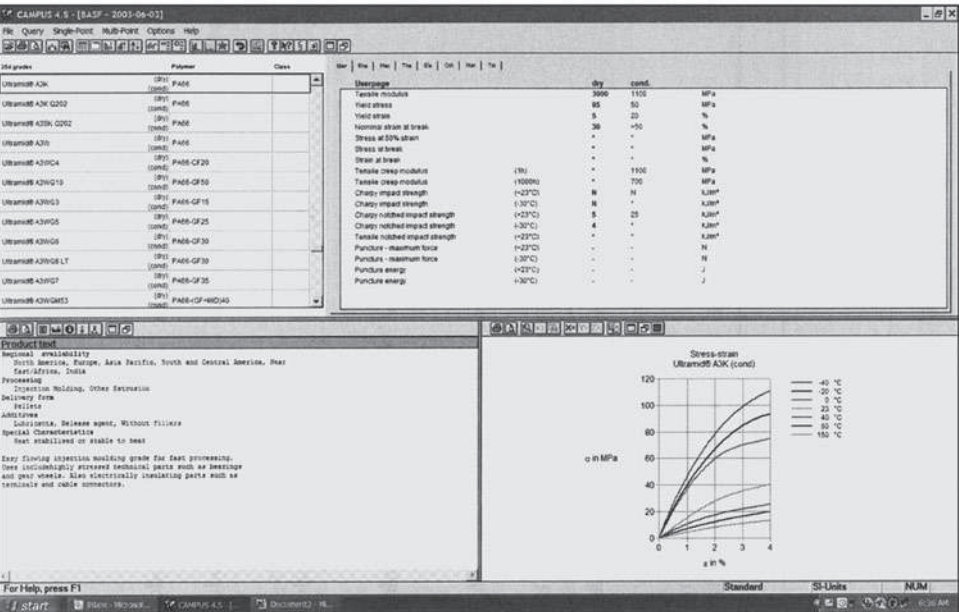


Рис. 20.4. Типичный пример представления результатов поисков в базе данных CAMPUS

выбрать систему единиц СИ или американскую систему, выбрать и представить графически любую пару показателей свойств для выбранных продуктов или сопоставить до 10 графиков, характеризующих свойства различных материалов. Программное обеспечение также позволяет потребителю выбрать рекомендуемый метод переработки, например, литье под давлением или экструзию для данного материала, и далее получить информацию относительно режимов переработки с примерами приложения формуемых изделий и рекомендациями по фирме-изготовителю.

Наиболее полезная особенность системы *CAMPUS* состоит в том, что она может использоваться в форме отдельных программ, которые дают возможность конечному потребителю одновременно получать данные как по деформационным свойствам материала, так и по его вязкости, что позволяет непосредственно сравнивать материалы, производимые различными поставщиками, которые используют систему *CAMPUS* [10].

20.6. Справочные данные по свойствам полимеров

За последние 10 лет количество выпускаемых марок полимерных материалов увеличилось более чем в три раза. Примерное количество различных марок полимерных материалов, имеющих на рынке в настоящее время, превышает 15 000. Это затрудняет определение наиболее подходящего материала для конкретного применения. Трудности выбора усугубляются еще и тем, что имеющиеся данные могут оказаться недостаточными для понимания поведения полимера, поскольку результаты испытаний, выполненных производителями материала, далеко не всегда получены в общепринятых условиях [11].

Базы данных по свойствам полимерных материалов предлагают с помощью персональных компьютеров произвести сортировку продуктов, основываясь на представленной информации. Однако за исключением системы *CAMPUS*, имеющиеся базы данных не основаны на использовании согласованных стандартов. Все базы данных позволяют осуществить выбор материала, исходя из его свойств, природы материала, торговой марки, предполагаемой области применения и имени производителя. В большинстве случаев имеется возможность непосредственно сопоставить свойства материалов, предлагаемых одним или несколькими производителями. В некоторых версиях программного обеспечения возможно сканирование справочных данных производителя одновременно с представлением информации о других материалах и информации с рынка.

В табл. 20.4 проведено сопоставление некоторых имеющихся в настоящее время баз данных по свойствам полимерных материалов.

Таблица 20.4 Указатель баз данных по свойствам полимерных материалов

Компания	Название продукта	Материалы	Тип данных	Веб-сайт
<i>CAMPUS</i>	Предварительный выбор продукта с помощью компьютера на основании согласованных стандартов	Более 90% инженерных пластиков	Свойства – сопоставимые данные, полученные от производителей	www.campus.com
<i>GE Plastics</i>	Данные для использования в проектировании	Материалы, выпускаемые фирмой <i>GE Plastics</i>	Свойства, сопоставление, данные для проектирования, данные по химической стойкости	www.geplastics.com
<i>IDES</i>	База данных по свойствам материалов	Более 60 000 информационных листов по свойствам полимерных материалов	Свойства	www.ides.com
<i>Mat Web</i>	База данных по свойствам материалов	Металлы, пластмассы, керамика, композиционные материалы	Свойства	www.matweb.com
<i>Plastics technology</i>	База данных по свойствам материалов	Полимерные материалы	Свойства, основанные на выбранных критериях	www.ptonline.com
<i>Bayer</i>	Данные по свойствам и характеристикам, необходимых для конструирования	Пластмассы и эластомеры	Свойства и характеристики, необходимые для конструирования	www.bauermaterialscience.com
<i>DuPont</i>	Данные по свойствам и характеристикам, необходимых для конструирования	Материалы, выпускаемые фирмой <i>DuPont</i>	Свойства и характеристики, необходимые для конструирования	www.plastics.dupont.com
<i>Ticona</i>	Данные по свойствам и характеристикам, необходимых для конструирования	Материалы, выпускаемые фирмой <i>Ticona</i>	Свойства и характеристики, необходимые для конструирования	www.ticona.com

окончание табл. 20.2

Компания	Название продукта	Материалы	Тип данных	Web site
<i>M-Base Engineering</i>	База данных по свойствам материалов	Пластмассы	Свойства	www.m-base.com
<i>Solvey</i>	Данные по свойствам и характеристикам, необходимым для конструирования	Материалы, выпускаемые фирмой <i>Solvey</i>	Свойства и характеристики, необходимые для конструирования	www.solveyplastics.com
<i>Teijin</i>	Данные по свойствам и характеристикам, необходимым для конструирования	Материалы и пленки	Свойства и характеристики, необходимые для конструирования	www.tejinkasei.com
<i>Plasticsusa. Com</i>	База данных по свойствам материалов	Свойства материалов и общая информация	Свойства и указатель торговых марок	www.plasticsusa.com
<i>UL IQ for Plastics</i>	База данных по свойствам материалов	60 000 марок полимерных материалов, прошедших испытания по стандартам <i>UL</i>	Свойства, ранжирование материалов	www.ul.com/plastics
<i>Plastics Design library RAPRA</i>	База данных по свойствам материалов. Библиография и указатель баз данных	Пластмассы, резины и другие материалы, адгезивы и композиционные материалы	Свойства	www.knovel.com www.rapra.com

Литература

1. «Uniform Global Material Testing Standards — A Primer for Managers» SPI Polymeric Materials Producers Division, SPI, Washington, D.C., 1996, p. 1.
2. *Ibid.*, p. 2.
3. «Uniform Global Material Testing Standards — A Technical Primer» SPI, Washington, D.C., 1996, p. 3.
4. Wigotsky V. «The Road to Standardization» *Plastics Eng.*, April 1995, p. 22.
5. Reference 1, p. 3.
6. Gabriele M. «Global Standards Could Resolve Inconsistencies» *Plastics Technol.*, June 1993, p. 48.
7. Reference 1, p. 4.
8. Renstrom R. «ISO draft new guidelines for plastics design» *Plastics News*, September 8, 1997, p. 5.
9. Leonard L. «Comparable Data for Plastic Materials — Help is on the way» *Plastics Design Forum*, Jan.-Feb. 1993, p. 37.
10. Gabriele, Reference 6, p. 53.
11. Renstrom, Reference 8, p. 5.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Список производителей оборудования для испытаний пластмасс

Вязкость

Brabender C.W. Instruments, Inc.
Brookfield Engineering Laboratories, Inc.
BYK-Gardner USA
Fisher Scientific
Haake, Inc.
Testing Machines, Inc.
Benz Material Testing Instruments

Вязкость разбавленных растворов/ Характеристическая вязкость

Fisher Scientific Co.

Гель-проницаемая хроматография

Waters Associates, Inc.
Viscotek

Гель-точка, время гелеобразования

CEAST USA Inc.
Shyodu Instrument Co.
Sunshine Instrument Co.
Techne, Inc.
Testing Machines, Inc.
BYK-Gardner USA

Горючесть

CEAST USA Inc.
SGS U.S. Testing Co.

Деформационная теплостойкость

CEAST USA Inc.
Testing Machines, Inc.

Tinius Olsen Testing Machines, Inc.

Дифференциальная сканирующая ка- лориметрия

DuPont Co.
Haake
Mettler-Toledo Inc.
Perkin-Elmer Corp.
TA Instruments
Shimadzu Scientific instruments

Диэлектрическая прочность. Диэлек- трическая постоянная

Biddle Sawyer Corp.
MTI Corp.
CEAST USA Inc.

Долговечность

Fatigue Dynamics, Inc.
Instron Corp.
Tinius Olsen Testing Machine Co.
CEAST USA Inc
Qualitest USA
Benz Material Testing Instruments

Долговечность

Fatigue Dynamics, Inc.
Instron Corp.
Tinius Olsen Testing Machine Co.
CEAST USA Inc
Qualitest USA
Benz Material Testing Instruments

Дымообразование

Newport Scientific.

Fire Testing Technology Limited

Дюрометр/ Твердость по Роквеллу

Instron Corp.

Mitutoyo

Rex Gauge Co.

Testing Machines, Inc.

Qualitest USA

Kernco Instruments Co.

Benz Material Testing

Instruments

Zwick USA

**Защита от электромагнитного
излучения**

Enthone Inc.

Изгиб: модуль упругости и прочность

Chatillon

Instron Corp.

MTS Systems Corp.

Testing Machines, Inc.

Tinius Olsen Testing Machine Co.

Zwick USA

Измерение вязкости методом чашки

BYK-Gardner USA

Fisher Scientific Co.

**Измерение отражательной
способности**

BYK-Gardner USA

Datacolor

Konica Minolta

Измерение разрывной прочности

Applied Test Systems, Inc.

Testing Machines, Inc.

Износ

Taber Industries

Qualitest USA

Benz Material Testing Instruments

Zwick USA

Индекс расплава

CEAST USA Inc.

Goettfert

Instron Corp.

Kayeness, Inc.

Testing Machines, Inc.

Tinius Olsen Testing Machine, Inc

Benz Material Testing Instruments

Zwick USA

Инфракрасная спектроскопия

Infrared Engineering Inc.

Nicolet Instruments

The Foxboro Co.

Испытания на удар падающим грузом

Applied Test Systems

BYK-Gardner USA

Tinius Olsen Testing Machine Co.

CEAST USA Inc.

Benz Material Testing Instruments

Кислородный индекс

CEAST USA Inc.

Testing Machines, Inc.

Fire Testing Technology Ltd.

Климатические испытания

Atlas Material Testing Technology

Q-Panel Co.

Колориметр/Спектрометр

BYK-Gardner USA

Datacolor

GretagMacbeth Corp.

Testing Machines, Inc.

X-Rite Inc.

Konica Minolta

HunterLab

Мутность

BYK-Gardner USA

Напряжение/деформации

CEAST USA Inc.

Instron Corp.

MTS System

Tinius Olsen Testing Machine Co.

Zwick USA

Неразрушающие методы испытаний

GE Inspection Technologies, LP.

Panametrics, Corporation

NDC.

Lasermike

Определение влажности

Arizona Instrument Corp.

Newport Scientific Inc.

Omnimark Instrument Corp.

Zarad Inc.

Плотность

CEAST USA Inc.

Qualitest USA

Ohaus Scale Corporation

Techne Inc.

Zwick USA

Ползучесть

Applied Test Systems, Inc.

Ceast USA Inc.

Instron Corporation

MTS Systems Corp.

Tinius Olsen Testing Machine Company

Поляризатор/Фотоупругость

Measurements Group Inc.

Strainoptic Technologies, Inc.

Прочность при растяжении

CEAST USA Inc.

Instron Corp.

MTS Systems Corp.

Testing Machines, Inc.

Tinius Olsen Testing Machine Co.

Benz Material Testing Instruments

Zwick USA

Пузырьковый вискозиметр

BYK-Gardner USA

Релаксация напряжений

CEAST USA Inc.

Instron Corp.

Реометр

Brookfield Engineering

CEAST USA Inc.

Goettfert

Haake

Dynisco

TA Instruments

Tinius Olsen Testing Machine Co.

Benz Material Testing Instruments

Рефрактометр

Reichert, Inc.

Kernco Instruments Co.

Сжатие: предел прочности и модуль

CEAST USA Inc.

Chatillon

Instron Corp.

MTS Systems Corp.

Testing Machines, Inc.

Tinius Olsen Testing Machine Co.

Zwick USA

Сопротивление дугообразованию

Amprobe Instruments

CEAST USA Inc.

Твердость

Instron Corp.

Mitutoyo

Shore Instruments & Mfg. Co.

Qualitest USA

Benz Material Testing Instruments

Zwick USA

Теплопроводность

Anter Corporation

Термомеханический анализ

DuPont Co.
Haake
Mettler-Toledo Inc.
Perkin-Elmer Corp.
TA Instruments
Shimadzu Scientific instruments

Термогравиметрия

DuPont Co.
Haake
Mettler-Toledo Inc.
Perkin-Elmer Corp.
TA Instruments
Shimadzu Scientific instruments

Реометр крутящего момента

Mountz, Inc.

Точка размягчения по Вика

Atlas Material Testing Technology
Testing Machines, Inc.
Tinius Olsen Testing Machine Co.
CEAST USA Inc.

Образцы для испытаний

Lansen Mold Co., Inc.
Benz Material Testing Instruments
Master Precision Products, Inc.

Ударная прочность

BYK-Gardner USA
CEAST USA Inc.
Instron Corp.
Testing Machines, Inc.

Tinius Olsen Testing Machines Inc.
Qualitest USA
Zwick USA

Ударное растяжение

Instron Corp.
Testing Machines, Inc.
Tinius Olsen Testing Machine Co.

Удельный вес

Ohaus Scale Corp.
Techne, Inc.
Testing Machines, Inc.
Qualitest USA
Benz Material Testing Instruments

Удлинение

CEAST USA Inc.
Chatillon
Instron Corp.
MTS Systems Corp.
Testing Machines, Inc.
Tinius Olsen Testing Machines, Co.
Zwick USA

Ускоренное климатическое старение

Atlas Material Testing Technology, LLC
Q-Panel Company
Torque Tester
Mountz, Inc.
Test Specimen
Lansen Mold Co., Inc.
Benz Material Testing Instruments
Master Precision Products, Inc.

Список компаний по алфавиту, их адреса, телефоны и веб-сайты

Anter Corporation
1700 Universal Road
Pittsburg, PA 15235
(415) 795-6410
www.anter.com

Atlas Material Testing Technology
4114 N. Ravenswood
Chicago, IL 60613
(773) 327-4520
www.altas-mts.com

Applied Test Systems, Inc.
348 Newcastle Road,
Butler, PA 16001
(724) 283-1212
www.atspa.com

Arizona Instrument
1912 West 4th Street
Tempe, AZ 85040-1941
(800) 290-1414
www.azic.com

Linberg/Blue M
308 Ridgefield court
Asheville, NC 28806
(828) 658-2711
www.lindberg-bluem.com

Brabender, C.W. Instruments, Inc.
50 E. Wesley Street
S. Hackensack, NJ 07606
(201) 343-8425
www.cwbrabender.com

Benz Materials Testing Instruments
73 Maplehurst Avenue
Providence, RI 02908
(401) 331-5650
www.benztesters.com

Brookfield Engineering
Laboratories, Inc.

11 Commence Boulevard
Middleboro, MA 02346
(508) 946-6200 or (800) 628-8139
www.brookfieldengineering.com

BYK-Gardner USA
Rivers Park II
9104 Guilford Road
Columbia, MD 21046-2729
(800) 343-7721 or (301) 483-6500
www.byk-gardner.com

Biddle Sawyer Corp.
21 Perm Plaza
360 West 31st Street
New York, NY 10001
(212) 736-1580
www.biddlesawyer.com

Ceast USA Inc.
4816 Sirus Lane
Charlotte NC 28208
(704) 423-0042
www.ceast.com

Fisher Scientific
2000 Park Lane
600 Business Center Drive
Pittsburgh, PA 15205
(412) 490-7286 or (800) 926-0505
www.l.fisherco.com

Fatigue Dynamics, Inc.
965 Decker Road
Walled Lake, MI 48390
(248) 669-6100 or (800) 394-7568
www.fdinc.com

Thermo Haake USA
5225 Verona Road
Madison, WI 53711
(608) 327-6777
www.thermohaake.com

Instron Corp.
100 Royal Street
Canton, MA 02021
(617) 828-2500 or (800) 564-8374
www.instron.com
ООО «Новатест»,
Представительство Instron, Ltd.
в России и Белоруссии
125130 Москва,
Старопетровский проезд, д. 7А,
(495) 739-63-22, 788-55-23,
info@novatest.ru, www.novatest.ru

INTERTECH Corporation
Московское представительство:
127015, Москва,
Б. Новодмитровская, д. 36/4,
(495) 232-42-25, 783-35-90,
info@intertech-corp.ru,
www.intertech-corp.ru

Dynisco Polymer Test
Westgate II, 730 Hemlock Road
Morgantown, PA 19543
(508) 541-9400
www.dynisco.com

MTS Systems Corp.
1400 Technology Drive
Eden Prairie, MI 55344
(800) 944-1687
www.mts.com

Ohaus Corp.
19A Chapin Road
P.O. Box 2033
Pine Brook, NJ 07058
(973) 377-9000
www.ohaus.com

Omnimark Instrument Corporation
1711 West University Drive
Suite 159

Tempe, AZ 85281
(602) 784-2200
www.omniwww.com

PerkinElmer Instruments
710 Bridgeport Avenue
Shelton, CT 06484
(800) 762-4000 or (203) 925-4600
www.perkinelmer.com

Measurements Group Inc
P.O. Box 27777
Raleigh, NC 27611
(919) 365-3800
www.measurementsgroup.com
Q-Panel Lab Products
800 Canterbury Road
Cleveland, OH 44145
(440) 835-8700
www.q-panel.com

Rex Gauge Co.
1250 Busch Parkway
Buffalo Grove, IL 60089
(800) 927-3982 or (847) 465-9009
www.durometer.com

Shyodu Instrument Co.
6351 Old Tipton Road
Millington, TN 38053
(901) 872-6894
www.shyodu.com

Strainoptics Technologies, Inc.
108 West Montgomery Avenue
North Wales, PA 19454
(215) 661-0100
www.strainoptics.com

Sunshine Scientific Instruments, Inc.
2200 Michener Street, Suite 23
Philadelphia, PA 19115
(215) 673-5600 or (800) 343-1199
www.measurebetter.com

Techne, Inc.
3 Terri Lane, Suite 10
Burlington, NJ 08016
(800) 225-9243
www.techneusa.com

Testing Machines, Inc.
2 Fleetwood Court
Ronkonkoma, NY 11779
(631) 439-5400 or (800) 678-3221
www.testingmachines.com

Tinius Olsen Testing Machine Co., Inc.
1065 Easton Road
P.O. Box 1009
Horsham, PA 19044
(215) 675-7100
www.tiniusolsen.com

Mountz, Inc.
1080 North, 11th Street
San Jose, CA 95112
(408) 292-2214
www.eturque.com

SGS-U.S. Testing Corporation
291 Fairfield Avenue
Fairfield, NJ 07004
(973) 575-5252 or (800) 777-8378
www.ustestingsgsna.com

Newport Scientific Inc.
8246-E Sandy Court
Jessup, MD 20794-9632
(301) 498-6700
www.newport.scientific.com

Thermo Electron Corporation
Process Instruments Division
501 90th Avenue N.w.
Minneapolis, MN 55433
(763) 783-2500
www.thermo.com

Goettfert Inc.
488 Lakeshore Parkway
Rock Hill, SC 29730
(803) 324-3883
www.goettfert.com

Taber Industries
P.O. Box 164
455 Bryant Street
North Tonawanda, NY 14120
(716) 694-4000
www.taberindustries.com

GE Inspection Technologies, LP
50 Industrial Park Road
Lewiston, PA 17044
(866) 243-2638 or (717) 242-0327
[www.geinspectiontechnologies @ ae.ge.com](http://www.geinspectiontechnologies.com)

Datacolor
5 Princess Road
Lawrenceville, NJ 08648
(609) 924-2189
www.datacolor.com

X-Rite
3100 44th Street S.W.
Grandville, MI 49418
(616) 534-7667 or (800) 248-9748
www.x-rite.com

X-Rite Incorporated
Офис Москва, ул. Прянишникова 2а
127550, Москва, Россия
Тел.: (495) 976-37-10; 916-676-11-87
Факс: (495) 976-37-10
E-mail: PNovoseltsev@xrite.com

Amprobe Advanced Tests Products
3270 Executive Way
Miramar, FL 33025
(800) 327-5060
www.amprobe.com

Panametrics Inc.
48 Woerd Avenue
Waltham, MA 02453
(800) 225-8330 or (781) 899-3900
www.panametrics-ndt.com

Enthone Inc.
P.O. Box 1900
350 Frontage Road
West Haven, CT 06516
(203) 934-8611
www.enthone.com

Mattler-Toledo Inc.
1900 Polaris Parkway
Columbus, OH 43240
(614) 438-4511
www.mt.com

TA Instruments Inc.
109 Lukens Drive
New Castle, DE 19720
(302) 427-4000
www.tainst.com

Fire Testing Technology, LTD.
Charlwoods Road, East Grinstead
West Sussex, RH19 2HL, UK
44 (0) 1342-323600
www.fire-testing.com

Qualitest USA
Cross Roads One Center
8201 Peters Road, Suite 1000
Plantation, FL 33324
(877) 884-8378
www.qualitest-inc.com

Zared
380 Country Oak Lane

Inverness, Illinois, 60067
(800) 633-7507
www.zared.com

NDC Infrared Engineering
5314 North Irwindale Avenue
Irwindale, California 91706
(626) 960-3300
www.ndcinfrared.com

Konica Minolta
Instrument Systems Division
725 Darlington Avenue
Mahwah, NJ 07430
(888) 473-2636
www.konicaminolta.us

Lansen Mold Co., Inc.
Main Street
Berkshire, MA 01224
(413) 443-5328
www.lansenmold.com

Master Precision Products, Inc.
1212 Fairplains Street
Greenville, MI 48838
(800) 354-3170
www.masterprecision.com

Zwick USA
1620 Cobb International Blvd., Suite 1
Kennesaw, GA 30152
Phone: 770-420-6555
www.zwick.com

Viscotek
15600 West Hardy Road
Houston, TX 77060
(800)-375-5966
www.viscotek.com

Приложение В

Сокращенные наименования полимерных материалов

Англоязычное сокращение	Русскоязычное сокращение	Химическое название
<i>ABS</i>	АБС	Сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола
<i>AN</i>	ПАН	Полиакрилонитрил
<i>CA</i>	АЦ	Ацетат целлюлозы
<i>CAB</i>	АБЦ	Ацетат-бутират целлюлозы
<i>CAP</i>	АПЦ	Ацетат-пропионат целлюлозы
<i>CN</i>	НЦ	Нитрат целлюлозы
<i>CP</i>	ПЦ	Пропионат целлюлозы
<i>CPE</i>	Х-ПЭ	Хлорированный полиэтилен
<i>CPVC</i>	Х-ПВХ	Хлорированный поливинилхлорид
<i>CTFE</i>	ХТФЭ	Полихлортрифторэтилен
<i>DAP</i>	ДАФ	Диаллилфталат
<i>EC</i>	ЭЦ	Этилцеллюлоза
<i>ECTFE</i>	ЭХТФЭ	Сополимер этилена с хлортрифторэтиленом
<i>EP</i>	ЭП	Эпоксидные смолы
<i>EPDM</i>	ЭПД	Тройной сополимер этилена, пропилена и диена
<i>ERR</i>	СКЭП	Этилен-пропиленовый каучук
<i>EPS</i>	П-ПС	Пенополистирол
<i>ETFE</i>	ЭВА	Сополимер этилена с тетрафторэтиленом
<i>EVA</i>	ПЭВП	Сополимер этилена с винилацетатом
<i>FEP</i>	У-ПС	Перфторэтиленпропиленовый сополимер
<i>FRP</i>	ВМПЭ	Полиэфир, армированный стекловолокном
<i>HDPE</i>	ПЭНП	Полиэтилен высокой плотности
<i>HIPS</i>	МФС	Ударопрочный полистирол
<i>HMWPE</i>	ПА	Высокомолекулярный полиэтилен
<i>LDPE</i>	ПБ	Полиэтилен низкой плотности
<i>MF</i>	ПБТ	Меламиноформальдегидная смола
<i>PA</i>	ПА	Полиамид
<i>PAPI</i>		Полиметилениполифенилизоцианат
<i>PB</i>		Полибутилен
<i>PDT</i>		Полибутилентерефталат
<i>PC</i>	ПК	Поликарбонат
<i>PE</i>	ПЭ	Полиэтилен
<i>PES</i>	ПЭС	Полиэфирсульфон
<i>PET</i>	ПЭТ, ПЭТФ	Полиэтилентерефталат
<i>PF</i>	ФФС	Фенолформальдегидная смола
<i>PFA</i>		Фторалкоксиполимер
<i>PI</i>	ПИ	Полиимид
<i>PMMA</i>	ПММА	Полиметилметакрилат
<i>PP</i>	ПП	Полипропилен
<i>PPO</i>	ПФО	Полифениленоксид
<i>PS</i>	ПС	Полистирол
<i>PSO</i>	Псу	Полисульфен
<i>PTFE</i>	ПТФЭ	Политетрафторэтилен
<i>PTMT</i>	ПТМТФ	Политетраметилентерефталат
<i>PU</i>	ПУ	Полиуретан

Ангоязычное сокращение	Русскоязычное сокращение	Химическое название
<i>PVA</i>	ПВС	Поливиниловый спирт
<i>PVAC</i>	ПВА	Поливинилацетат
<i>PVC</i>	ПВХ	Поливинилхлорид
<i>PVDC</i>	ПВДХ	Поливинилиденхлорид
<i>PVDF</i>	ПВФХ	Поливинилиденфторид
<i>PVF</i>	ПВФ	Поливинилфторид
<i>SAN</i>	САН	Сополимер стирола с акрилонитрилом
<i>SI</i>	ТЭП	Силиконы, кремнийорганические смолы
<i>TPE</i>	УФС	Термопластичный эластомер
<i>TPX</i>	УВМ-ПЭ	Полиметилпентен
<i>UF</i>		Уретанформальдегидные смолы
<i>UHMWPE</i>		Ультравысокомолекулярный ПЭ
<i>UPVC</i>		Непластифицированный (жесткий) поливинилхлорид

Приложение С

Глоссарий

S-N диаграмма (*S-N diagram*) — графическое изображение зависимости напряжения (S) от числа циклов (N), при котором происходит разрушение образца в испытаниях на усталость.

Адсорбция воды (*Water absorption*) — количество воды, которое поглощает изделие из пластмасс, погруженное в воду на определенное время.

Аморфные полимеры (*Amorphous polymers*) — полимерные материалы, в которых отсутствует кристаллический порядок; при этом макромолекулы расположены в статистическом беспорядке; примером аморфных полимеров являются поливинилхлорид и полиметилметакрилат.

Анализ причин разрушения (*Failure analysis*) — наука, занимающаяся анализом причин разрушения деталей путем последовательного исключения возможных причин этого явления.

Везерометр (*Weatherometer*) — прибор, предназначенный для исследования влияния погодных условий на полимерные материалы в условиях ускоренных испытаний с использованием искусственных источников света и иных моделируемых климатических условий.

Вискозиметр (*Viscometer*) — прибор для измерения вязкости и текучести различных жидкостей.

Вискозиметр Брукфелда (*Brookfield viscometer*) — прибор, который широко используется для измерения вязкости пластизоль и других жидких сред, проявляющих тиксотропию свойств; действие прибора основано на измерении напряжений, возникающих на шпинделе, погруженном в исследуемую жидкость и вращающемся с определенной скоростью; показания прибора пересчитываются в значения вязкости в сантипуазах, причем коэффициент пересчета зависит от размеров шпинделя и скорости вращения; путем выполнения измерений при различных скоростях вращения можно судить о степени тиксотропии исследуемой жидкости.

Вискозиметрическая чашка Зана (*Zahn viscosity cup*) — небольшая U-образная чашка, подвешенная на скрученной проволоке; на одном из концов трубки на расстоянии пяти радиусов от дна установлена насадка; эксперимент состоит в том, что чашка погружается в испытуемую жидкость и затем вытаскивается; за меру вязкости принимается время в секундах, которое проходит от того момента, когда верхняя часть чашки выходит из жидкости, до момента, когда в первый раз разрушается струя, выходящая из насадки.

Время гелеобразования (*Gel time*) — интервал времени от введения катализатора в реакционную систему до образования геля.

Вязкость (*Viscosity*) — мера сопротивления относительно перемещению слоев жидкости друг относительно друга, обусловленная внутренним трением.

Гель-проникающая хроматография, ГПХ (*Gel permeation chromatography, GPC*) — новый метод хроматографической техники, в которой разделение происходит на наборе колонок, плотно забитых жесткими гелеобразными частичками; исследуемый полимер помещается на вход в колонку и затем разбавляется растворителем; макромолекулы диффундируют через гель со скоростью, зависящей от их размеров; по мере выхода из колонки они детектируются с помощью дифференциального рефрактометра, соединенного с самописцем, на котором фиксируется молекулярно-весовое распределение исследуемого полимера.

Гигроскопичность (*Hygroscopic*) — способность материала адсорбировать влагу из воздуха; такие пластмассы как АБС-пластик и полиамиды гигроскопичны, и их необходимо высушивать до начала переработки.

Гидравлический удар (*Surging*) — скачок давления в гидравлической линии, вызванный внезапным изменением скорости течения или остановкой потока; это изменение давления вызывает появление упругих деформаций в стенке трубы и изменения плотности жидкости.

Гистерезис (*Hysteresis*) — несовпадение деформационных кривых упругого материала в циклах «нагрузка–разгрузка»; площадь получаемой гистерезисной петли, имеющей форму эллипса, характеризует потери тепла при деформировании.

Глоссметр (*Glossmeter*) — прибор, позволяющий измерить отражательную способность («блеск») поверхности под различными углами.

Горючесть (*Flammability*) — мера сопротивления материала горению.

Двулучпреломление (*Double refraction*) — разность между двумя значениями показателя преломления для световой волны при различном направлении колебаний.

Деформационная диаграмма (*Stress–strain diagram*) — графическое изображение зависимости напряжения от деформации; эта диаграмма получается на основании любых механических испытаний, в которой осуществляется непрерывное одновременное измерение напряжений и деформаций.

Деформация (*Strain*) — изменение длины, отнесенное к первоначальной длине; обычно выражается в процентах.

Дифференциальная сканирующая калориметрия, ДСК (*Differential scanning calorimetry, DSC*) — метод термического анализа, основанный на измерении энергии (выражаемой в калориях), поглощенной образцом или выделившейся от образца по мере изменения температуры.

Диэлектрическая постоянная, проницаемость (*Dielectric constant, permittivity*) — отношение емкости объема между электродами заданной конфигурации, заполненного материалом-диэлектриком, к емкости при тех же геометрических размерах электродов, между которыми поддерживается вакуум (или, что более удобно на практике, находится воздух).

Диэлектрическая прочность (*Dielectric strength*) — градиент напряжения, при котором происходит пробой — или образуется проводящая дуга; выражается в Вольтах на один мм расстояния между электродами.

Жесткость (*Toughness*) — характеристика способности материала поглощать энергию деформирования без разрушения; мерой жесткости служит площадь под деформационной кривой.

Закон Гука (*Hooke's law*) — напряжения прямо пропорциональны деформации.

Измерение вязкости по методу чаши (*Cup viscosity test*) — метод сравнительной оценки вязкости при строго оговоренных условиях испытаний; вязкость оценивается по времени истечения определенного объема жидкости из стандартного сосуда (чаши) через калиброванную насадку, установленную на дне сосуда, под действием силы тяжести.

Измерение текучести методом чаши (*Cup flow test*) — метод измерения текучести термореактивных полимеров; метод состоит в том, что предварительно взвешенное количество материала под определенным давлением заполняет форму в виде чаши; при этом определяются минимальное давление, при котором возможно заполнение формы, и требуемое для этого время.

Измерения индекса расплава (*Melt index test*) — метод определения индекса расплава как характеристики скорости выдавливания расплава полимера через капилляр со строго оговоренной длиной и диаметром при заданных давлении и температуре; индекс расплава выражается в граммах материала, выдавленного за 10 мин.

Измеритель выцветания (*Fadometer*) — прибор, предназначенный для измерения степени потери цвета (выцветания) под воздействием ультрафиолетовых лучей примерно с той же длиной волны, что и солнечного света.

Измеритель ударной прочности с помощью падающего груза (*Falling weight impact tester*) — см. Испытания на удар падающим грузом.

Изохронные зависимости напряжения от деформации (*Isochronous-equal time — stress-strain curve*) — зависимости напряжения от деформации, отвечающие различной длительности нагружения, которая соответствует разным случаям применения изделий.

Индекс желтизны (*Yellowness Index*) — характеристика тенденции пластмасс к приобретению желтого цвета при длительной выдержке на свету.

Индекс рефракции (*Refractive index*) — см. «Показатель преломления».

Инфракрасный спектр (*Infrared analysis*) — техника, часто используемая для идентификации полимеров; в инфракрасном спектрометре излучение в инфракрасной области спектра направляется через образец или пленку, и измеряется относительное количество энергии, поглощенное материалом при различных частотах или длинах волн; получаемый спектр сравнивается с известными спектрами различных веществ, что является основанием для идентификации материала.

ИСО (*ISO*) — сокращенное наименование Международной организации по стандартизации.

Испытания на текучесть в спирали (*Spiral flow test*) — метод оценки текучести полимерных материалов, основанный на измерении длины затекания определенного объема материала при контролируемых давлении и температуре в литьевую форму, имеющую вид спирали.

Испытания на удар (*Impact test*) — метод определения поведения материала под воздействием ударной нагрузки, создаваемой при изгибе или растяжении; обычно характеристикой ударной прочности является энергия, затрачиваемая на разрушение образца при однократном ударе.

Испытания на удар падающим грузом (*Drop impact test*) — оценка прочности при ударной нагрузке образца, осуществляемой падающим на него грузом заданного веса с различной высоты; энергия поглощаемая при этом образцом, выражается в дюйм-фунт или фунт-фут.

Испытания на удар по Шарпи (*Charpy impact test*) — разрушающие испытания на прочность материала под воздействием ударной нагрузки, испытания состоят в том, что образец закрепляется в горизонтальном положении в двух опорах, и на него с заданной высоты падает маятниковый копер (ударник); величина усилия возрастает до тех пор, пока образец не разрушится; результаты испытаний выражают в единицах энергии — дюйм-фунт или футах-дюйм.

Источник монохроматического света (*Monochromatic light source*) — источник света, испускающий свет только одной длины волн.

Капиллярный реометр (*Capillary rheometer*) — прибор для измерения текучести расплавов полимеров; он состоит из капиллярной трубки со строго оговоренной длиной и диаметром, устройства для создания давления, необходимого для продавливания расплавленного полимера через насадку (капилляр), приспособления для создания и поддержания заданной температуры и датчиков для измерения перепада давления и скорости течения; данные, получаемые с помощью этого прибора; экспериментальные данные обычно представляются в виде зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига при постоянной температуре.

Кислородный индекс (*Oxygen index*) — минимальная концентрация кислорода в смеси кислород/азот, выраженная в объемных процентах, которая может поддерживать горение полимера, подожженного при комнатной температуре в установленных условиях.

Климатические испытания (*Weathering*) — широкий термин, охватывающий различные методы испытаний пластмасс под воздействием солнечного или ультрафиолетового излучения, температуры, кислорода, влажности, снега, ветра, загрязнений и т. д.

Колориметр (*Colorimeter*) — прибор для определения цвета, которое должно примерно совпадать с визуальной оценкой, но даваемое в более строгой форме.

Кондиционирование (*Conditioning*) — выдержка материала (или образца) до проведения испытаний в стандартных условиях окружающей среды или под действием известной предыстории нагружения.

Концентрация напряжений (*Stress concentration*) — увеличение уровня напряжений по сравнению с приложенным напряжением вблизи надреза, трещины, поры, включения или иных областей, вызывающих рост напряжений.

Коэффициент Пуассона (*Poisson's ratio*) — отношение поперечного сжатия к продольной деформации при одноосном растяжении образцов; через эту константу выражается соотношение между модулем сдвига и модулем Юнга.

Коэффициент термического расширения (*Coefficient of thermal expansion*) — относительное изменение длины или объема образцов, отнесенное к изменению температуры на один градус.

Кристалличность (*Crystallinity*) — состояние структуры молекул в некоторых полимерах, при котором существуют твердые кристаллы определенной геометрической формы; такие структуры характеризуются однородностью и плотной упаковкой.

Крутильный маятник (*Torsion pendulum*) — прибор, используемый для измерений динамических механических свойств полимеров.

Кручение (*Torsion*) — деформации, вызванные приложением крутящего момента к материалу.

К-фактор (*R-factor*) — термин, иногда используемый для характеристики теплоизоляционных свойств материала, или коэффициента теплопроводности; см. Теплопроводность.

Логарифмическая вязкость (*Inherent viscosity*) — эта величина представляет собой отношение натурального логарифма относительной вязкости разбавленных растворов к концентрации раствора, выраженной в граммах на 100 мл растворителя.

Международный комитет по источникам света (*CIE, Commission Internationale De L'Eclairage*) — Международная организация, на которую возложена ответственность за установление стандартов источников света.

Метамеризм (*Metamerism*) — явление изменения оценки цвета или пары цветов в зависимости от освещенности или положения наблюдателя или от обоих факторов.

Модуль ползучести — Эффективный модуль (*Creep modulus, Apparent modulus*) — отношение приложенного напряжения к развивающейся деформации.

Модуль при изгибе (*Flexural modulus*) — отношение приложенного напряжения при изгибе к отвечающей ему деформации наружных волокон образца в области упругого поведения материала; модуль при изгибе представляет собой относительную характеристику жесткости материала.

Модуль упругости, Модуль Юнга (*Modulus of elasticity, Elastic modulus, Young's modulus*) — отношение напряжения к деформации в области упругого поведения материала.

Модуль Юнга (*Young's modulus*) — отношение напряжения к деформации при растяжении в области ниже предела пропорциональности.

Молекулярно-весовое распределение (*Molecular weight distribution*) — относительное содержание молекул различных молекулярных весов, содержащихся в данном образце полимера.

Молекулярный вес (*Molecular weight*) — сумма атомных весов всех атомов, входящих в молекулу; в полимерах молекулярные веса индивидуальных молекул изменяются в очень широких пределах, поэтому их молекулярные веса выражаются через средние значения — средневесовой и среднечисловой молекулярные веса.

Мономер (*Monomer, Single unit*) — молекула относительно простого строения, которая при полимеризации образует полимер путем комбинации сама с собой или другими простыми молекулами или соединениями.

Мутность (*Haze*) — появление помутнения или облачности в прозрачных материалах; это явление обусловлено светорассеянием внутри материала или от его поверхности.

Напряжение (*Stress*) — отношение приложенной нагрузки к площади первоначального сечения образца; обычно выражается в фунт/дюйм².

Насыпная плотность (*Bulk density*) — см. Эффективная плотность.

Неньютоновское поведение (*Non-Newtonian behavior*) — поведение жидкости при течении, которое не подчиняется условиям, сформулированным для ньютоновских жидкостей; расплавы полимеров обычно ведут себя как неньютоновские жидкости, и их вязкость понижается в области высоких скоростей сдвига.

Ньютоновское поведение (*Newtonian behavior*) — течение, характеризующееся тем, что вязкость не зависит от скорости сдвига, то есть напряжение пропорционально скорости сдвига; типичными ньютоновскими жидкостями являются вода и минеральные масла.

Образец (*Specimen*) — часть материала, используемая для проведения испытаний.

Образование трещин под воздействием внешней среды (*Environmental stress cracking*) — склонность изделий из термопластов к образованию трещин при одновременном воздействии различных химических реагентов и напряжений.

Образование шейки (*necking*) — локальное уменьшение поперечного сечения образца, происходящее под действием напряжения; обычно образование шейки происходит при одноосном растяжении испытуемого образца.

Объемный фактор (*Bulk factor*) — объем, который занимает определенное количество исходного неуплотненного материала, к объему того же количества материала после литья или прессования; эта величина характеризует ожидаемое изменение объема материала, происходящее при его переработке.

Окружное напряжение (*Hoop stress*) — напряжение, действующее по окружности цилиндра, подвергаемого воздействию внутреннего или внешнего давления.

Оптическая чувствительность к напряжению (*Stress optical sensitivity*) — способность некоторых материалов к возникновению двулучепреломления света под действием напряжений.

Ориентация (*Orientation*) — распрямление элементов кристаллической структуры с образованием более однородного материала.

Относительная влажность (*Relative humidity*) — отношение содержания водяных паров в атмосфере к предельному содержанию, отвечающему условию насыщения при данной температуре; эта величина также равна отношению давлений водяных паров в данный момент и к давлению паров насыщения при той же температуре.

Относительная вязкость (*Relative viscosity*) — отношение кинематической вязкости раствора полимера данной концентрации к кинематической вязкости чистого растворителя.

Оттенок цвета (*Hue*) — качественная оценка цвета, которая говорит о том, является ли окраска красной, желтой, зеленой, голубой, пурпурной или же промежуточной между какой-либо парой из этих цветов.

Охрупчивание (*Embrittlement*) — снижение пластичности, обусловленное физическими или химическими причинами.

Пенопласты, ячеистые пластмассы (*Foamed plastics, cellular plastics*) — пластмасса, в объеме которой распределено множество пор; эти поры образованы либо посторонним вспенивающим агентом, либо появляются вследствие реакции компонент материала.

Пик экзотермы (*Peak exothermic temperature*) — под экзотермическим пиком понимается максимальная температура, достигаемая в реакции с участием термоактивной смолы.

Пластичность (*Ductility*) — характеристика способности материала деформироваться с развитием пластических деформаций без разрушения.

Плотность (*Density*) — масса, отнесенная к единице объема; выражается в г/см³ или фунт/фут³ и т.п.

Побеление (*Chalking*) — явление образования белых пятен или порошкообразных выделений на поверхности материала, вызванное его деструкцией (обычно под влиянием погодных факторов).

Показатель преломления (*Index of refraction*) — отношение скорости света в вакууме (или в воздухе) к скорости света в исследуемой среде.

Ползучесть (*Creep*) — деформации, которые превышают деформации, мгновенно возникающие при приложении нагрузки и восстанавливающиеся после снятия нагрузки; эти деформации появляются вследствие вязкоупругой природы полимеров и их величина зависит от длительности действия нагрузки.

Полимер (*Polymer*) — высокомолекулярное органическое соединение, структура которого образована повторяющимися мономерными единицами.

Полимеризация (*Polymerization*) — химическая реакция, в процессе которой момеры связываются между собой, образуя полимер.

Поляризованный свет (*Polarized light*) — поляризованные электромагнитные колебания, происходящие с частотой, лежащей в оптическом диапазоне видимого света.

Постоянная температура использования (*Continuous use temperature*) — максимальная температура, при которой материал может использовать продолжительное время без опасности термической деструкции.

Предел пропорциональности (*Proportional limit*) — наибольшее напряжение, которое полимер выдерживает без отклонения от линейной зависимости напряжения от деформации (по закону Гука).

Предел прочности при ползучести (*Creep rupture strength*) — напряжение, при котором происходит разрушение в условиях ползучести в течение определенного времени.

Предел текучести (*Yield stress*) — величина напряжения, при котором деформации продолжают увеличиваться при сохранении постоянного напряжения.

Предел усталостной прочности (*Fatigue limit*) — напряжение, ниже которого разрушение не происходит при сколь угодно большом количестве циклов деформирования.

Пространственная яркость (*Specular gloss*) — относительная яркость отражения от образца в выбранном направлении.

Прочность в пределе текучести (*Yield strength*) — напряжение, при котором начинается и усиливаются отклонения от условия пропорциональности напряжения и деформации; если иное не оговорено, то это напряжение отождествляется с пределом текучести.

Прочность при изгибе (*Flexural strength*) — максимальное напряжение, действующее в наружных волокнах образца, в момент образования трещины или разрушения.

Прочность при растяжении (*Tensile strength*) — предел прочности материала, измеренный в условиях одноосного растяжения.

Прочность при сдвиге (*Shear strength*) — максимальное напряжение, создаваемое при приложении сдвиговых усилий, при которой материал разрушается, теряя свою целостность.

Прочность при сжатии (*Compressive strength*) — максимальная нагрузка, которую выдерживает образец до разрушения, отнесенная к его первоначальному сечению.

Пузырьковый вискозиметр (*Bubble viscometer*) — прибор, в котором исследуемая прозрачная жидкость стекает вниз между стеклянными стенками, образующими кольцеобразный зазор между двумя коаксиальными цилиндрами, а пузырьки воздуха поднимаются вверх в жидкости; скорость, с которой происходит подъем пузырьков при определенных контролируемых условиях, является прямой мерой кинематической вязкости исследуемой жидкости.

Размерная стабильность (*Dimensional stability*) — способность полимерного изделия сохранять точные размеры, которые он получил при литье, механической обработке или свободной заливке.

Разрывная прочность (*Burst strength*) — внутреннее давление, создание которого приводит к разрушению сосуда, находящегося под давлением, например трубы или фитинга; давление (и, соответственно, разрывная прочность) зависит от скорости нарастания давления и времени, в течение которого оно действует.

Релаксация напряжений (*Stress relaxation*) — постепенное уменьшение напряжений во времени при поддержании постоянной деформации.

Реология (*Rheology*) — наука, занимающаяся изучением законов течения различных материалов.

Реометр (*Rheometer*) — см. «Экструзионный пластометр».

Светопропускание (*Luminous transmittance, Light transmittance*) — отношение интенсивности прошедшего света к интенсивности падающего света; эта величина обычно дается в процентах.

Сдвиговое напряжение (*Shear stress*) — напряжение, создаваемое в расплаве полимера, при котором параллельные слои скользят друг относительно друга или стенки (в ламинарном потоке).

Секущий модуль (*Secant modulus*) — отношение напряжения к соответствующей деформации в любой точке деформационной кривой.

Скорость сдвига (*Shear rate*) — изменение скорости по сечению канала, когда параллельные слои расплавленного полимера скользят друг относительно друга или стенки (в ламинарном потоке).

Сопротивление дугообразованию (*Arc resistance*) — способность материала противостоять образованию высоковольтной электрической дуги; обычно под этим понимается время до момента возникновения электрической проводимости.

Сопротивление износу (*Abrasion resistance*) — способность материала противостоять таким механическим воздействиям, как истирание, процарапывание или эрозия, которые приводят к постепенному удалению материала с поверхности.

Спектрофотометр (*Spectrophotometer*) — прибор, предназначенный для измерения проходящего или отраженного света в оптическом диапазоне в зависимости от длины волны; прибор позволяет с высокой точностью осуществлять измерения цвета и сопоставлять интенсивности излучения двух источников света на одной волне.

СПИ (*SPE*) — сокращенное наименование Американского общества инженеров, работающих в промышленности пластмасс.

СПИ (*SPI*) — сокращенное наименование Американского общества промышленности пластмасс.

Старение (*Aging*) — процесс изменения свойств материала под воздействием искусственных или естественных причин в течение продолжительного времени.

Сшивание (*Crosslinking*) — образование поперечных связей между полимерными молекулами: это явление особенно интенсивно протекает в термореактивных смолах, приводя к полной утрате растворимости системы связанных макромолекул; сшивание может осуществляться вследствие облучения пучком высокоэнергетических электронов или же введением химических сшивающих агентов, таких как, например, органические пероксиды.

Твердость (*Hardness*) — способность пластического материала противостоять сжатию и проникновению в него индентора. Основными методами оценки твердости являются испытания по Бриннелю и по Шору.

Твердость по дюрометру (*Durometer hardness*) — характеристика твердости материала, оцениваемая по внедрению индентора; характеризуется глубиной погружения стального индентора в материал под действием усилия сжатой пружины.

Твердость по Роквеллу (*Rockwell hardness*) — показатель твердости, измеренной методом пенетрации индентора, выполненного в виде стального шарика; см. также «Твердость при пенетрации».

Твердость по Шору (*Shore hardness*) — см. «Твердость при пенетрации».

Твердость при пенетрации (*Indentation hardness*) — сопротивление поверхности материала внедрению индентора; твердость оценивается величиной отпечатка, который оставляет на поверхности индентор, вдавливаемый под определенной нагрузкой, или же нагрузкой, которая требуется для того, чтобы создать отпечаток заданной глубины.

Температура деформационной теплостойкости (*Heat deflection temperature, HDT*) — температура, при которой стандартный образец прогибается на 0,010 дюйма под действием статической нагрузки, равной 66 или 264 фунт/дюйм².

Температура размягчения по Вика (*Vicat softening point*) — температура, при которой игла с плоским квадратным сечением окончания площадью 1 мм² под заданной нагрузкой погрузится в образец на 1 мм при равномерном повышении температуры.

Температура хрупкости (*Brittleness temperature*) — температуры, ниже которой пластмассы и эластомеры под действием удара разрушаются хрупко.

Теплопроводность (*Thermal conductivity*) — способность материала проводить тепло; под коэффициентом теплопроводности понимается количество тепла, проходящее через единичный кубик в материале за единицу времени при разности температур на двух параллельных поверхностях кубика, равной одному градусу.

Термогравиметрический анализ, ТГА (*Thermogravimetric analysis, TGA*) — метод испытаний, в котором измеряется изменение массы образца при постепенном повышении температуры.

Термомеханический анализ, ТМА (*Thermomechanical analysis, TMA*) — метод термического анализа, состоящий в измерении физического растяжения или сжатия материала, также изменении его модуля упругости или вязкости как функции температуры.

Термопластичный полимер, термопласт (*Thermoplastic*) — класс полимерных материалов, которые могут многократно размягчаться при нагревании и вновь становятся твердыми при охлаждении. К числу таких материалов относятся, например, АБС-пластик, поливинилхлорид, полистирол и полиэтилен.

Термореактивный полимер, реактопласт (*Thermosetting plastics*) — класс полимерных материалов, в которых под действием тепла, давления, катализаторов и иных факторов происходят химические реакции, и в их результате материал необратимо переходит в неплавкое состояние.

Точка геля (*Gel point*) — точка, в которой происходит переход от раствора к гелю, который проявляет псевдопластические свойства.

Трехмерный колориметр (*Tristimulus colorimeter*) — прибор для измерения цвета, принцип действия которого основан на разложении на три основных цвета — красного, зеленого и голубого.

Ударная прочность (*Impact strength*) — энергия, затрачиваемая на разрушение образца при ударном нагружении.

Ударная прочность по Изоду (*Izod impact test*) — метод определения свойств материала при ударных нагрузках; согласно этому методу на консольный образец наносится удар груза, закрепленного на конце маятникового копра; характеристикой ударной прочности является величина энергии, затрачиваемая на разрушение образца; при этом может испытывать как цельный образец, так и образец с надрезом.

Удельный вес (*Specific gravity*) — отношение веса данного объема материала к весу такого же объема воды при конкретной температуре.

Удлинение (*Elongation*) — увеличение длины образца при его растяжении; большим значениям удлинения соответствует большая пластичность материала.

Ультразвуковые испытания (*Ultrasonic measurements*) — метод неразрушающего контроля, применяемый для нахождения дефектов в изделии; основан на использовании колебаний в области ультразвуковых частот.

Ультрафиолет (*Ultraviolet*) — область электромагнитного спектра, лежащая между фиолетовым окончанием видимого диапазона и рентгеновскими лучами; отвечает длинам волн от 100 до 3900 А; фотоны в области ультрафиолетового излучения обладают достаточной энергией, чтобы вызвать некоторые химические реакции и способствовать деструкции полимеров.

Ускоренное климатическое старение (*Accelerated weathering*) — такая процедура испытаний, при которой воздействие климатических условий на свойства материала ускоряется с помощью специального оборудования.

Ускоренное старение (*Accelerated aging*) — такая процедура испытаний материала, при которой интенсифицируется внешнее воздействие для достижения сокращения времени для достижения такого же уровня разрушения материала, которое достигается при обычных условиях за более длительный срок.

Усталостная прочность (*Fatigue strength*) — максимальное напряжение при циклическом деформировании, которое материал может выдержать, не разрушаясь, при заданном числе циклов.

Усталостное разрушение (*Fatigue failure*) — разрушение изделий из пластмасс, наступающее при воздействии циклических нагрузок при напряжениях ниже предела прочности, определяемого при статических испытаниях.

Фактор потерь (*Dissipation factor*) — отношение проводимости емкости, заполненной диэлектриком, к ее восприимчивости, или отношение параллельно соединенных реактивности к сопротивлению; для большинства пластмасс характерны низкие значения фактора потерь, что является желательным, поскольку при этом минимальны потери энергии при прохождении электромагнитных волн.

Фотоупругость (*Photoelasticity*) — экспериментальный метод измерения напряжений и деформаций в объектах, основанный на использовании явления двулучепреломления.

Характеристическая вязкость (*Intrinsic viscosity*) — предельное значение логарифмической или приведенной вязкости в области разбавленных растворов при уменьшении концентрации раствора до нуля; эта величина характеризует степень увеличения вязкости растворителя при введении в него полимера.

Хрупкое разрушение (*Brittle failure*) — разрушение, обусловленное неспособностью материала поглощать энергию деформирования; проявляется как внезапное разрушение под действием механической нагрузки.

Цветность–насыщенность (*Chroma–saturation*) — оценка восприятия цвета, характеризующая его отклонение по сравнению с серым цветом при определенной освещенности.

Чувствительность к надрезу (*Notch sensitivity*) — характеристика, показывающая насколько способность выдерживать внешнюю нагрузку уменьшается из-за концентрации напряжений вблизи надреза; хрупкие пластмассы более чувствительны к надрезу, чем пластичные материалы.

Экстензометр (*Extensometer*) — устройство для измерения изменения линейных размеров; также называется датчиком деформаций.

Экструзионный пластометр-реометр (*Extrusion plastometer-rheometer*) — определенный тип вискозиметра, используемый для измерения индекса расплава полимеров; прибор состоит из вертикального цилиндра, в котором просверлены два продольных отверстия (одно для исследуемого образца, а другое для измерения температуры); на конце отверстия, в которое помещается образец, устанавливается капилляр строго определенных размеров, а образец сверху поджимается плунжером; цилиндр нагревается снаружи; эксперимент состоит в измерении веса материала, выдавленного капилляра под действием грузов, установленных на плунжере, за определенное время; результаты измерений представляются в граммах материала, выдавленного за 10 мин.

Энергия при ударном растяжении (*Tensile impact energy*) — энергия, затрачиваемая на разрушение образца при резком растяжении, вызванном ударом маятникового копра.

Эффективная плотность — насыпная плотность (*Apparent density — Bulk density*) — вес единицы объема материала, включая имеющиеся в нем пустоты (в том числе воздух), в его естественном состоянии.

Ячеистые пластмассы (*Cellular plastics*) — см. Пенопласты.

Приложение D

Торговые наименования

Торговая марка	Продукт	Компания-производитель
<i>Acrylite</i>	Полиакрилаты и листы на их основе	<i>Cyrol</i>
<i>Affinity</i>	Полиолефиновые пластомеры	<i>Dow</i>
<i>Aim</i>	Улучшенные стирольные смолы	<i>Dow</i>
<i>Alathon</i>	Полиэтилен высокой плотности	<i>Occidental</i>
<i>Alcryn</i>	Галогенированные полиолефины	<i>DuPont</i>
<i>Amodel</i>	Полифталамид	<i>Amoco</i>
<i>APEC</i>	Термостойкий поликарбонат	<i>Bayer</i>
<i>Aristech</i>	Полиакрилаты	<i>Aristech</i>
<i>Aurum</i>	Полиимиды	<i>Mitsui Toatsu</i>
<i>Avimid K</i>	Полиимид	<i>DuPont</i>
<i>Barex</i>	Сополимер акрилонитрила	<i>BP Chemical</i>
<i>Bayblend</i>	Смесь АБС-пластика с поликарбонатом	<i>Bayer</i>
<i>Cadon</i>	Сополимер стирола с малеиновым ангидридом и его смеси с АБС-пластиком	<i>Bayer</i>
<i>Calibre</i>	Поликарбонат	<i>Dow</i>
<i>Capron</i>	Полиамид 6	<i>Allied Signal</i>
<i>Celanex</i>	Полибутилентерефталат и его сплавы с полиэтилентерефталатом	<i>Ticona</i>
<i>Calcon</i>	Полиацетали и эластомеры на их основе	<i>Ticona</i>
<i>Centrex</i>	Смеси типа AES/ASA	<i>Bayer</i>
<i>Crystalor</i>	Полиметилпентен	<i>Phyllips</i>
<i>Cyclac</i>	АБС-пластик	<i>G.E.</i>
<i>Cycloy</i>	Смеси АБС-пластика с поликарбонатом	<i>G.E.</i>
<i>Cyrolite</i>	Полиакрилаты	<i>Cyrol</i>
<i>Delrin</i>	Полиацетали и их сплавы с эластомером	<i>DuPont</i>
<i>Denka</i>	АБС-пластик	<i>Showa (Япония)</i>
<i>Desmopan</i>	Термопластичные полиуретаны	<i>Bayer</i>
<i>Dowlex</i>	Смесь полиэтилена низкой плотности с линейным полиэтиленом низкой плотности	<i>Dow</i>
<i>Durethan</i>	Полиамид 6	<i>Bayer</i>
<i>Dylark</i>	Сополимер стирола с малеиновым ангидридом и его смеси с полистиролом	<i>Arco</i>
<i>Dylene</i>	Полистирол	<i>Arco</i>
<i>Ektar</i>	Полиэфир на основе этиленгликоля	<i>Eastman</i>
<i>Engage</i>	Полиолефиновые эластомеры	<i>Dow Elastomers</i>
<i>Estamid</i>	Полиамид (CPTe)	<i>Dow</i>
<i>Estane</i>	Термопластичный эластомер на основе полиуретана	<i>D.F. Goodrich</i>
<i>Eval</i>	EVON	<i>Eval</i>
<i>Fiberloc</i>	Стеклонаполненный поливинилхлорид	<i>Polyone</i>
<i>Flexomer</i>	Смесь линейного полиэтилена низкой плотности с поливинилацетатом	<i>Union Carbide</i>
<i>Fluon</i>	Политетрафторэтилен	<i>ICI</i>
<i>Forafon</i>	Поливинилиденфторид	<i>Atochem</i>
<i>Forar</i>	Полиэтилен высокой плотности	<i>Amoco</i>
<i>Fortiflex</i>	Полиэтилены высокой и средней плотности	<i>Solvay</i>

Торговая марка	Продукт	Компания-производитель
<i>Fortilene</i>	Полипропилен	<i>Solvay</i>
<i>Fortron</i>	Полифениленсульфид	<i>Ticons</i>
<i>Geloy</i>	ASA и смеси ASA с поливинилхлоридом	<i>G.E.</i>
<i>Geolast</i>	Смесь полипропилена с нитрильным каучуком	<i>Advanced Elastomer Systems</i>
<i>Geon</i>	Поливинилхлорид	<i>Polyone</i>
<i>Grilamid</i>	Полиамид 12	<i>EMS America Grilon</i>
<i>GTX</i>	Смесь полифенилена с полиамидом	<i>G.E.</i>
<i>Halar</i>	Сополимер этилена с хлортрифторэтиленом	<i>Ausimot</i>
<i>Hostalen GUR</i>	Ультравысокомолекулярный полиэтилен	<i>Ticona</i>
<i>Hytrell</i>	Термопластичный полиэфирэфир	<i>DuPont</i>
<i>Isoplast</i>	Жесткий полиуретан	<i>Dow</i>
<i>K-Resin</i>	Термопластичный эластомер	<i>Phillips Chemical</i>
<i>Kadel</i>	Поликетон	<i>Amoco</i>
<i>Kama</i>	Полиакрилат	<i>Rohm & Haas</i>
<i>Kel-F</i>	Полихлортрифторэтилен	<i>3M</i>
<i>Kevlar</i>	Арамидные волокна	<i>DuPont</i>
<i>Kraton</i>	Термопластичный эластомер	<i>KRATON Polymers</i>
<i>Kynar</i>	Поливинилиденфторид	<i>Atochem</i>
<i>Lexan</i>	Поликарбонат	<i>G.E.</i>
<i>Lucite</i>	Полиакрилаты	<i>DuPont</i>
<i>Lupiac</i>	Полифениленэфир	<i>Mitsubishi</i>
<i>Lupital</i>	Полиацетали	<i>Mitsubishi</i>
<i>Luran</i>	Сополимер стирола с акрилонитрилом	<i>BASF</i>
<i>Lustran</i>	АБС-пластики и сополимеры стирола с акрилонитрилом	<i>Bayer</i>
<i>Lustrex</i>	Полистирол	<i>Novacor</i>
<i>Magnum</i>	АБС-пластик	<i>Dow</i>
<i>Makrobend</i>	Смеси на основе поликарбоната	<i>Bayer</i>
<i>Makrolon</i>	Поликарбонат	<i>Bayer</i>
<i>Maranyl</i>	Полиамид 66	<i>LNP</i>
<i>Marlex</i>	Полиэтилен высокой плотности	<i>Phillips</i>
<i>Merlon</i>	Поликарбонат	<i>Bayer</i>
<i>Mindel</i>	Смеси на основе полисульфона	<i>Amoco</i>
<i>Minlot</i>	Полиамид 66 с минеральным наполнителем	<i>DuPont</i>
<i>Mylar</i>	Полиэтилентерефталатные пленки	<i>DuPont</i>
<i>NAS 10</i>	Сополимер акрилата со стиролом	<i>Novacor</i>
<i>Noryl GTX</i>	Сплав полифениленоксида с полистиролом	<i>G.E.</i>
<i>Novodur</i>	АБС-пластик	<i>Bayer</i>
<i>Paxon</i>	Полиэтилен высокой плотности	<i>Paxon Polymers</i>
<i>Pellathane</i>	Термопластичный полиуретан	<i>Dow</i>
<i>Petrothene</i>	Полиэтилены	<i>Quantum</i>
<i>Plexiglas</i>	Полиакрилатные листы	<i>AtoHaas</i>
<i>Polyman</i>	Сплав АБС-пластика с поливинилхлоридом	<i>Schulman</i>
<i>Polystrol</i>	Полистирол	<i>BASF</i>
<i>Prevail</i>	Смеси АБС-пластика с термопластичным полиуретаном	<i>Dow</i>
<i>Prevex</i>	Сплав полифениленэфира с полистиролом	<i>G.E.</i>
<i>Pro-Fax</i>	Полипропилен	<i>Himont</i>
<i>Pulse</i>	Сплав поликарбоната с АБС-пластиком	<i>Dow</i>

Торговая марка	Продукт	Компания-производитель
<i>Radel</i>	Полиэфирсульфон	<i>Amoco</i>
<i>Rilsan</i>	Полиамиды 11 и 12	<i>Atochem</i>
<i>Royalite</i>	АБС-пластик и сплавы на его основе	<i>Uniroyal</i>
<i>Rynite</i>	Полиэтилентерефталат	<i>DuPont</i>
<i>Ryton</i>	Полифениленсульфид	<i>Phillips</i>
<i>Saran</i>	Поливинилиденхлорид	<i>Dow</i>
<i>Styron</i>	Полистирол	<i>Dow</i>
<i>Supec</i>	Полифениленсульфид	<i>G.E.</i>
<i>Surlyn</i>	Иономер	<i>DuPont</i>
<i>Teflon</i>	Политетрафторэтилен, полифторалкоксы и пленки на основе политетрафторэтилена	<i>DuPont</i>
<i>Tefzel</i>	Сополимер этилена с тетрафторэтиленом	<i>DuPont</i>
<i>TempRite</i>	Полихлортрифторэтилен	<i>B.F. Goodrich</i>
<i>Tenite</i>	Целлюлозные композиции	<i>Eastman Chemical</i>
<i>Terblend</i>	Сплав АСА с поликарбонатом	<i>BASF</i>
<i>Terluran</i>	АБС-пластик	<i>BASF</i>
<i>Texin</i>	Термопластичный полиуретан	<i>Bayer</i>
<i>Torlon</i>	Полиамидимид	<i>Amoco</i>
<i>Toyolac</i>	АБС-пластик	<i>Toray</i>
<i>TPX</i>	Полиметилпентен	<i>Mitsui</i>
<i>Troax</i>	Смесь АБС-пластика с полиамидом	<i>Bayer</i>
<i>Tyrl</i>	Сополимер стирола с акрилонитрилом	<i>Dow</i>
<i>Ubel</i>	Полисульфон	<i>Amoco</i>
<i>Iltem</i>	Полиэфиримид	<i>G.E.</i>
<i>Ultradur</i>	Полибутилентерефталат	<i>BASF</i>
<i>Ultraform</i>	Полиацетали	<i>BASF</i>
<i>Ultramid</i>	Полиамиды	<i>BASF</i>
<i>Ultrason</i>	Полиэфирсульфон	<i>BASF</i>
<i>Uvex</i>	Ацетат-бутират целлюлозы	<i>Eastman</i>
<i>Valox</i>	Полибутилентерефталат	<i>G.E.</i>
<i>Vectra</i>	Жидкокристаллический полимер	<i>Ticona</i>
<i>VespeI</i>	Полиамиды	<i>DuPont</i>
<i>Vydyne</i>	Полиамиды	<i>Monsanto</i>
<i>Xenoy</i>	Сплав поликарбоната с полиэфиром	<i>G.E.</i>
<i>XT</i>	Полиакрилат	<i>Cyrol</i>
<i>Xydar</i>	Жидкокристаллический полимер	<i>Amoco</i>
<i>Zylar</i>	Полиакрилат	<i>Novocor</i>
<i>Zytel</i>	Полиамиды	<i>DuPont</i>

Приложение E

Организации, занимающиеся стандартизацией

Американская газовая ассоциация (*American Gas Association, AGA, Arlington, Virginia*)

AGA объединяет компании, занимающиеся поставкой газа. На нее возлагается ответственность за исследования, разработку стандартов и информацию в области производства, поставки и использования газа. www.aga.org

Американский национальный институт стандартов (*American National Standards Institute, ANSI, New York, New York*)

ANSI является некоммерческой организацией, в состав которой входят представители бизнеса, производителей, поставщиков, рабочих объединений и правительства. ANSI во взаимодействии с этими группами определяет необходимость и приоритетные задачи в области разработки стандартов, поручает проведение исследовательских работ, обеспечивает организации, занимающиеся подготовкой стандартов. Эффективными методами и менеджментом и утверждает представленные на рассмотрение документы как Американские национальные стандарты. www.ansi.org

Американское общество контроля качества (*American Society for Quality, ASQ, Milwaukee, Wisconsin*)

ASQ — это профессиональная организация, ответственная за разработку и распространение стандартов, связанных с контролем качества. www.asq.com

Американское общество испытателей материалов — Международное (*ASTM International, Philadelphia, Pennsylvania*)

Международная организация испытателей материалов, ранее известная под названием Американского общества испытателей материалов; это научно-техническая организация, организованная для: «Создания стандартов на свойства и характеристики материалов, продуктов, систем и услуг и распространение значений об этих документах». Это общество является крупнейшей в мире добровольной организацией, работающей в области стандартов. www.astm.org

Национальная ассоциация обработчиков металлов (*National Association of Metal Finishers, NAMF, Washington, DC*)

NAMF объединяет владельцев и менеджеров, а также их поставщиков, работающих в металлообрабатывающей промышленности. В задачи этой организации входит развитие, защита интересов и сохранение предприятий металлообрабатывающей отрасли. Для этого разрабатываются стандарты, требующие достижения самого высокого уровня в обслуживании, контроле качества и проведении работ. В настоящее время NAMF объединяет более 900 членов по всему миру. www.namf.org

Американское общество инженеров техники безопасности (American Society of Safety Engineers, ASSE, Park Ridge, Illinois)

Это техническое общество, занимающееся повышением профессионального уровня ее членов. В обязанности этой организации входит разработка стандартов в области профессиональной подготовки инженеров по технике безопасности и участие в развитии политики в области техники безопасности. www.asse.org

Ассоциация производителей бытовых приборов (Association of Home appliance manufacturers, AHAM, Chicago, Illinois)

Эта ассоциация разрабатывает желательные требования к характеристикам бытовых приборов и рекомендации по их технике безопасности, которые она направляет в Гарантийные лаборатории (*Underwriters Laboratories*) и Американскую газовую ассоциацию. Эта ассоциация также представляет соответствующую отрасль промышленности в потребительских организациях и правительстве, собирает статистические данные, поддерживает программы по сертификации, и, кроме того, обеспечивает потребителей бытовых приборов необходимой информацией, технической поддержкой, а также осуществляет обучение. www.aham.org

Британская международная организация стандартизации (BSI Group, London, UK)

Эта группа, основанная в 1901 г., является ведущей мировой компанией, предоставляющей деловые услуги различным организациям по всему миру. В состав этой группы входят 4500 наемных работников в 110 странах. Она обеспечивает независимую сертификацию систем менеджмента и изделий, инспекцию продуктов потребления, сервис при испытаниях продукции, создание частных, национальных и международных стандартов, систем обучения менеджмента, информацию о стандартах в рамках международной торговли. В состав группы входят четыре отдела: Британский Институт стандартов (*British Institute of Standards*), Британская организация по стандартизации систем менеджмента (*BSI Management System*), Британская организация по стандартизации обслуживания (*BSI Product Services*) и Британская организация по инспекции (*BSI Insectorate*). www.bsi-global.org

Европейская организации по контролю качества (European Organization for Quality, EOQ)

EOQ является независимой некоммерческой организацией, действующей согласно законодательству Бельгии. EOQ — это европейская междисциплинарная организация, задачей которой является координация работ для эффективного улучшения ситуации в области контроля качества. EOQ была организована в 1956 г., и в настоящее время в нее входят представители организаций по контролю качества из 34 европейских стран, а также институты, компании и отдельные лица со всего мира. www.eoq.com

Европейская организация по оценке соответствия (*European Organization for Conformity Assessment, EOTC*)

EOTC представляет собой независимую некоммерческую организацию, созданную в апреле 1990 г. решением Европейской Комиссии, Европейской ассоциации свободной торговли (*European Free Trade Association, EFTA*) и европейскими организациями, занимающимися стандартизацией. Главным органом *EOTC* является Генеральная Ассамблея, а текущую работу осуществляет Административный совет, выбираемый генеральной Ассамблеей. Административный совет собирается четыре раза в год и несет ответственность за политику и стратегию планирования работы. *EOTC* состоит из национальных и европейских организаций, ответственных за оценку соответствия продукции установленным стандартам. *EOTC* сосредоточивает свое внимание на оценку соответствия продукции в пределах Европы, но сама по себе не проводит тестирования или сертификации товаров и услуг. www.eotc.com

ETL SEMKO

Эта организация, представляющая собой подразделение *Intertec*, является мировым лидером по испытаниям, сертификации и инспекции продуктов, обрабатываемых на мировом рынке. Торговый знак *ETL* дается продукции, которая отвечает требованиям по технике безопасности стандартов США и Канады. www.intertec-etslsemko.com

Европейская организация лабораторных испытаний (*A European Organization for Laboratory Testing, EUROLAB*)

EUROLAB представляет собой европейскую федерацию национальных ассоциаций лабораторий, занимающихся измерениями, тестированием и аналитическими исследованиями. Задачей *EUROLAB* является осуществление координации между сообществами, проводящими испытания и исполняющими аналогичные функции, с тем чтобы ускорить развитие и гармонизацию методов испытаний, обеспечить взаимное соответствие методов и получаемых результатов, а также обеспечить экспертную оценку в области испытаний. www.eurolab.org

FM Global (*Norwood, Massachusetts*)

FM Global является крупнейшей мировой организацией, занимающейся страхованием и защитой коммерческой и промышленной собственности. Исследовательское подразделение *FM Global* проводит работы в следующих областях: убытки и осуществление контроля за ними, исследования в области защиты от убытков, исследования материалов и структур, оценка рисков и надежности. В рамках этой организации были разработаны многочисленные стандарты. Связанные с оценкой горючести, ущерба от ветра и от средств пожаротушения и т. п. www.fmglobal.com

Ассоциация по безопасности промышленного оборудования (*Industrial Safety Equipment Association, Arlington, Virginia*)

Эта организация представляет производителей средств индивидуальной защиты и устройств, обеспечивающих безопасную работу промышленного оборудования. www.safetysystem.org

Международная ассоциация систем водоснабжения (International Association of Plumbing and Mechanical Officials, IAPMO, Los Angeles, California)

Эта организация спонсировала создание согласованных кодов на системы водоснабжения, которые используются в более чем 2500 организациях в Соединенных Штатах и принятых как обязательные в 10 штатах. www.iapmo.com

Международная организация стандартизации (International Organization for Standardization, ISO)

ISO, созданная в 1947 г., в настоящее время является всемирной федерацией, объединяющей национальные организации, занимающиеся стандартизацией, более чем в 90 странах. ISO способствует созданию стандартов, которые позволяют осуществлять международный обмен товарами и услугами. Целью этой организации является развитие интеллектуальной, научной, технологической и экономической кооперации стран-участников. ISO состоит из технических комитетов, подкомитетов, рабочих и исследовательских групп. Все эти группы представляют интересы производителей, поставщиков. Пользователей, инженеров, испытательных лабораторий, общественных организаций, правительств, организаций потребителей и исследовательских организаций во всех странах-участниках ISO. www.iso.org

Ассоциация производителей товаров для несовершеннолетних (Juvenile Products Manufacturer's Association, Moorestown, New Jersey)

Эта ассоциация, объединяющая производителей мебели и инвентаря для детей и несовершеннолетних, ответственна за разработку стандартов, обеспечивающих безопасность этой продукции. www.jpma.org

Национальная ассоциация производителей электрооборудования (International Electrical Manufacturer Association, NEMA, Washington, D.C.)

Эта ассоциация разработала более 200 стандартов, касающихся электрооборудования и приборов. В состав NEMA входят более 500 основных производственных компаний в США. www.nema.org

Национальная противопожарная ассоциация (National Fire Protection Association, NFPA, Boston, Massachusetts)

NFPA участвует в деятельности по стандартизации путем разработки кодов, стандартов рекомендаций, которые используются на практике для снижения потерь и защиты собственности от огня. Стандарты публикуются ежегодно в виде национальных пожарных кодов. www.nfpa.com

Национальный институт стандартов и технологий (National Institute of Standards and Technology, NIST, Gaithersburg, Maryland)

NIST представляет собой агентство Департамента Торговли США. В задачи NIST входит содействие в развитии методов измерений, испытаний, стандартов и технологий для повышения производительности, облегчения условий труда и повышения качества жизни. www.nist.gov

Национальный совет по технике безопасности (*National Safety Council, NSC, Chicago, Illinois*)

Центральной задачей *NSC* является определение и оценка методов и способов, которые бы способствовали предотвращению несчастных случаев, минимизации травм и экономических потерь от несчастных случаев. *NSC* также ответственен за ускорение внедрения этих методов и их применения, которые бы наилучшим образом служили общественным интересам. www.nsf.org

Национальное санитарное общество (*National Sanitation Foundation, NSF, Ann Arbor, Michigan*)

NSF разрабатывает и публикует стандарты и критерии, согласно которым проводятся испытания и сертификация. В настоящее время более 1600 производителей производят более 25000 изделий, на которые ставится маркировка *NSF*. www.nsf.org

Ассоциация производителей полиуретана (*Polyurethane Manufacturer's Association, Chicago, Illinois*)

Эта организация представляет собой некоммерческое объединение компаний, связанных с производством твердых термореактивных полиуретанов-эластомеров, а также используемых для этого химических продуктов и оборудования. www.pmahome.org

Институт контроля качества (*Quality management Institute, QMI*)

QMI — это зарегистрированная в Канаде организация, разрабатывающая систему контроля качества. Она представляет собой подразделение Канадской ассоциации стандартизации (*Canadian Standards Association, CSA*). www.qmi.com

Общество промышленности пластмасс (*Society of Plastics Industry, SPI, New York, New York*)

SPI представляет собой торговое и техническое сообщество, объединяющее более 1200 компаний, занятых в различных областях промышленности пластмасс, которые заинтересованы в создании качественных стандартов, исследованиях и унификации оценок продукции, сопоставлении заработной платы работников, разработке кодов, единой публичной политике, информации, технике безопасности, пожарной безопасности, упаковке пищевых продуктов и т. д. www.plastic-sindustry.com

Гарантийные лаборатории (*Underwriters Laboratories, UL*)

UL — это система независимых лабораторий, задачей которых является обеспечение безопасности общества путем проведения соответствующих испытаний и контроля деталей, систем и используемых материалов. www.ul.com

Приложение F

Профессиональные издания

Пластмассы

***Injection Molding Magazine**, Canon Communications LLC, 11444 W. Olympic Blvd., Suite 900, Los Angeles, CA 90064. www.immnet.com

Modern Plastics, Canon Communications LLC, 11444 W. Olympic Blvd., Suite 900, Los Angeles, CA 90064. www.modplas.com

Plastics Engineering, Society of Plastics Engineers, 14 Fairfield Drive, Brookfield Center, CT 06804. www.4spe.org

***Plastics Molding & Fabricating**, Vance Publishing, 800 Liberty Drive, Libertyville, IL 60048. www.plasticsmachining.com

***Plastics News**, Crain Communications, Inc., 1725 Merriman Road, Akron, OH 44313-5283. www.plasticsnews.com

***Plastics Technology**, Gardner Publications, 6915 Valley Avenue, Cincinnati, OH 45244. www.plasticstechnology.com

***Reinforced Plastics**, Elsevier Science, PO Box 945, New York, NY 10159-0945. www.reinforcedplastics.com

***Moldmaking Technology**, Communications Technology, Inc., 301 S. Main Street, Suite 1 West, Doylestown, PA 18901. www.moldmakingtechnology.com

***Additives & Compounding**, Elsevier Science, PO Box 945, New York, NY 10159-0945. www.addcomp.com

***Tool & Moldmaking Product News**, Access Communications North American, Inc., 21361-B Pacific Coast Highway, Malibu, CA 90265. www.Tool-moldmaking.com

***Plastics Machinery & Auxiliaries**, Canon Communications LLC, 11444 W. Olympic Blvd., Suite 900, Los Angeles, CA 90064. www.pma-magazine.com

Остальные публикации

***Design News**, Reed Elsevier, Inc., 29 West 34th Street, 8th Floor, New York, NY 10001. www.designnews.com

***Medical Devices & Diagnostic Industry**, Canon Communications, 11444 W. Olympic Blvd., Los Angeles, CA 90064. www.deviceblink.com/mddi/

***Quality**, Quality Magazine, 1050 IL Route 83, Suite 200, Bensenville, IL 60106. www.qualitymag.com

***Product Design and Development**, Reed Elsevier, Inc., 301 Gibraltar Drive, Box 650, Morris Plains, NJ 07950-0650. www.pddnet.com

* Эти издания распространяются среди профессиональных читателей бесплатно. Полный перечень профессиональных публикаций можно найти на сайте: www.plastics.com

Macromolecules, American Chemical Society Member & Subscriber Services, PO Box 3337, Columbus, OH, 43210. <http://pubs.acs.org/journals/mamobx>

Applied Spectroscopy, Society of Applied Spectroscopy, 201B Broadway Street, Frederick, MD 21701-6501. www.s-a-s.org

Spectroscopy, Advanstar Communications, 485 Route One South, Building F, Iselin, NJ 08830. www.spectroscopymag.com

Polymer, Elsevier Science, P.O. Box 945, New York, NY 10159-0945 <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00323861>

Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Elsevier Science, P.O. Box 945, New York, NY 10159-0945. www.sciencedirect.com/science/journal/01652370

Journal of Chromatography, Elsevier Science, P.O. Box 945, New York, NY 10159-0945. <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00219673>

Journal of Polymer Science, John Wiley & Sons, 111 River Street, Hoboken, NJ 07030-5774. <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jhome/36444>

laboratory Equipment, Reed Elsevier, 301 Gibraltar Drive, Morris Plains, NJ 07950. www.labequipmag.com

Корпоративные издания

Dupont Magazine, E.I. DuPont de Nemours and Co., Wilmington, Delaware 19898. www.dupont.com

Compounding Lines, RTP Company, 580 E. Front Street, Winona, MN 55987. www.rtpcompany.com

FLOWfront, Moldflow Corporation, 430 Boston Post Road, Wayland, MA 01778-9910. www.moldflow.com

Приложение G

Список независимых испытательных лабораторий

American Research and Testing Inc.
14934 S. Figueroa Street
Gardena, CA 90248
(800) 538-1655 or (310) 538-9709
www.americanresearch.com

Ashland Specialty Chemical Company
5200 Blazer Parkway
Technical Center West
Dublin, OH 43017
(614) 790-3278 or (800) 545-8779
www.ashlandanalytical.com

Atlas Weathering Services Group South
Florida Test Service
17301 Okeechobee Road
Miami, Florida 33018
(305) 824-3900
www.atlaswsg.com

Battelle Memorial Institute
425 King Avenue
Columbus, OH 43201
(614) 424-5214
www.battelle.org/chembio/default.htm

Benz Materials Testing Instruments 73
Maplehurst Ave.
Providence, RI 02908
(401) 331-5650
www.benztesters.com

Bodycote Polymer Broutman Laboratory
1975 North Ruby Street
Melrose Park, IL 60160
(708) 236-5360
www.na.bodycote-mt.com

Broutman, L.J., Associates Ltd.
3424 South State St. Chicago, IL 60616
(312) 842-4100

Chemical Electro Physics Corp.
705 Yorklyn Road
Hockessin, DE 19707
203-239-1378
www.cep-corp.com

Chemir Analytical Services.
2672 Metro Boulevard Maryland Heights,
MI 63043
(314) 291-6620 or (800) 659-7659
www.chemir.com

Corn-Ten Industries
6405 49th Street N. Pinellas Park, FL
33781
(727) 520-1200
www.com-ten.com

CRT Labs Inc. (California Resin Testing)
1680 Main Orange, CA 92867
(714) 283-2032
www.crtlabs.com
C.W. Brabender Instruments, Inc.
50 East Wesley Street
South Hackensack, NJ 07606
(201) 343-8425
www.cwbrabender.com

Datapoint Labs
95 Brown Road Suite 102
Ithaca, NY 14850
(888) DATA-4-CAE
www.datapointlabs.com

Delsen Testing Laboratories, Inc.
1024 Grand Central Avenue
Glendale, CA 91201
(818) 247-4106 or (888) 433-5736
www.delsen.com

Detroit Testing Laboratory, Inc.
7111 E. Eleven Mile Road

Warren, MI 48092-2709
(586) 754-9000
www.dtl-inc.com

Dow Corning Analytical Solutions
P.O. Box 994, Mail # C041C1
Midland, MI 48686-0994
(877) 322-8378
<http://dowcorning.com/analytical>

Dynisco Polymer Test
730 Hemlock Road
Morgantown, PA 19543
(508) 541-6206
www.dynisco.com

Engineered Polymers International, LLC
(EPI)
2842 Progress Road
Madison, WI 53716
(608) 661-2800
www.engineeredpolymers.com

Gaynes Labs Incorporated
9708 Industrial Drive Bridgeview, IL
600455
(708) 233-6655
www.nrinc.com/gayness

Ghesquire Plastic Testing, Inc.
20450 Harper Avenue
Harper Woods, MI 48225
(313) 885-3535
GretagMacbeth USA
617 Little Britain Road
New Windsor, NY 12553
(800) 622-2384 or (845) 565-7660
www.gretagmacbeth.com

GTI Testing Laboratories
1700 S. Mount Prospect Avenue
Des Plaines, IL 60018
(866) GTI-LABS
www.gastechnology.org/gtilabs

Harrop Industries, Inc.
3470 E. Fifth Avenue
Columbus, OH 43219
(614) 231-3621
www.harropusa.com

Hauser Laboratories
4750 Nautilus Court South unit A Boulder,
CO 80301
(720) 406-4800
www.hauserlabs.com

HunterLab
11491 Sunset Hills Road
Reston, VA 20190
(703) 471-6870
www.hunterlab.com

IMPACT Analytical
1910 West Saint Andrew Road
Midland, MI 48640
(989) 832-5555
www.impactanalytical.com

Intertek Caleb Brett
27611 La Paz Road Suit C
Laguna Niguel, CA 92677
(949) 448-4100
www.intertek-cb.com

Jordy Associates Inc.
4 Mill Street
Bellingham, MA 02019
(508) 966-1301
www.jordiassoc.com

Kars' Advanced Materials, Inc.
2528 W. Woodland Drive
Anaheim, CA 92801
(714) 527-7100
www.karslab.com

MATCO Associates, Inc.
4640 Campbell's Run Road

Pittsburgh, PA 15205
(800) 221-9090
www.matcoinc.com

Materials Engineering, Inc.
47W605 Indian Creek Trail
Virgil, IL 60151
(630) 3365-9060
www.material-engr.com

Measurement Technology Corp. (Measure
Tech)
4396 Round Lake Road West
St. Paul, MN 55112-3923
(651) 623-7651
www.measuretech.com

Measurement Technology Inc.
4240 Lock Highland Parkway
Roswell, GA 30075
(770) 587-2222
www.mti-phoenix.com

Microbac Laboratories, Inc.
Hauser Division
4750 Nautilus Court South
Boulder, CO 80301
720.406.4805 (P)
www.microbac.com

Monarch Analytical Laboratories, Inc.
349 Tomahawk Drive
Maumee, OH 43537
(419) 897-9000
www.testing@monarchlab.com

MTS Systems Corp./Materials Testing
Division
14,000 Technology Drive
Eden Prairie, MN 55344
(800) 944-1687
www.mts.com

Neolytica
3606 W. Liberty Road

Ann Arbor, MI 48103
(800) 704-4034
www.neolytica.com

OCM Test Laboratories, Inc.
3883 East Eagle Drive
Anaheim, CA 92807
(714) 630-3003
www.ocmtestlabs.com

Orange County Material Test
Laboratories Inc.
3883 E. Eagle Drive
Anaheim, CA 92807
(714) 630-3003 X 222
www.ocmtestlabs.com

Plastics Technology Laboratories, Inc.
50 Pearl Street
Pittsfield, MA 01201
(413) 499-0983
www.ptli.com

Polyhedron Laboratories, Inc.
10626 Kinghurst Street
Houston, TX 77099
(281) 879-8600
www.polyhedronlab.com

Polymer Solutions Inc.
1872 Pratt Drive #1375
Blacksburg, VA 24060-6363
(540) 961-4300 or (877) 961-4341
www.polymersolutions.com

Q -Panel Lab Products
800 Canterbury Road
Cleveland, OH 44145
(440) 835-8700
www.q-panel.com

RTS — Rexnord Technical Services
5101 West Beloit Road
Milwaukee, WI 533214

(414) 643-3067
www.rts-rexnord.com

Scientific Process and Research, Inc.
67 Veronica Avenue
Somerset, NJ 08873
(732) 846-3477
www.spar.com

Seal Laboratories
250 North Nash Street
El Segundo, CA 90245
(310) 322-2011
www.seallabs.com

SEM Lab, Inc.
20219 10th Place SE
Snohomish, Washington 98290
(425) 335-4400
www.sem-lab.com

SGS U.S. Testing Co., Inc.
291 Fairfield Avenue
Fairfield, NJ 07004
(973) 575-5252
www.ustesting.sgsna.com

Skeist Inc.
375 Route 10
Whippany, NJ 07891
(973) 515-2020
www.skeistinc.com

Southwest Research Institute
6220 Culebra Road P.O. Drawer 28510
San Antonio, TX 78228
(210) 684-5111
www.swri.org

Springborn Smithers Laboratories
790 Main Street
Wareham, MA 02571-1075

(508) 295-2550
www.springbornsmithers.com

Tandex Test Labs, Inc.
15849 Business Ctr. Drive
Irwindale, CA 91706
(800) 729-8378 or (626) 962-7166
www.tandexlabs.com

The Madison Group
505 S. Rosa Road Suite 124
Madison, WI 53719
(608) 231-1907
www.madisongroup.com

Underwriters Laboratories
333 Pfingsten Road
Northbrook, IL 60062
(847) 272-8800
www.ul.com

University of Massachusetts Lowell
Plastics Engineering Dept.
1 University Avenue
Lowell, MA 01854-2881
(978) 934-3420
www.uml.edu

VTEC Laboratories, Inc.
212 Manida Street
Bronx, NY 10474
(718) 542-8248 X 3
www.vteclabs.com

X-Rite, Inc.
3100 44th Street
S.W. Grandville, MI 49418
(616) 534-7663
www.x-rite.com

Приложение H

Спецификации (Методы испытаний конкретных материалов)

Ацетат целлюлозы*ASTM D 706**FED-L-P-397**MIL-M-3165A***Ацетат-бутират целлюлозы***ASTM D 707**MIL-P-349***Винилхлорид***ANSI/ASTM D 1784-78**ANSI/ASTM D 2287-78**ANSI/ASTM D 2474-78**ASTM D 729-78**ISO 2798-1974***Кремнийорганические смолы***MIL-M-14**ASTM D 1418***Меламиновые смолы***ASTM D 709**MIL-M-14***Меламиноформальдегидные смолы***ASTM D 704-62 (1975)**ISO 2112-1977***Мочевиноформальдегидная смола***ANSI/ASTM D 705-62 (19)**ISO 2112-1977**MIL-HDBK-700 (MR)***Полиакрилаты***ASTM D 788**BS 3412 FED-L-P-380**MIL-I-46058C**MIL-P-19735B***Полиамиды***ASTM D 4066**ASTM D 786**ISO R 1874**FED-L-P-410**FED-L-P-395**MIL-M-19887**MIL-M-20693***Полиариленсульфон***MIL-P-46133 (MR)***Полиацетали***ASTM D 4181**FED-L-P-392**MIL-P-46137***Полибутилен***ASTM D 2581***Поливинилхлорид***ASTM D 1755**ASTM D 1784**ASTM D 2287**ASTM F 437**FED-L-P-535**ISO 1060**MIL-P-47136***Поликарбонат***ASTM D 3935**FED-L-P-393A (2)**MIL-P-81390***Полиметилметакрилат***ANSI/ASTM D 1788-78A***Полипропилен***ASTM D 4101**ASTM D 4104**FED-L-P-394**MIL-P-46109***Полистирол***ASTM D 3011**ASTM D 703**ASTM D 1892**ISO 1622**FED-L-P-396**MIL-S-676*

MIL-P-19644C
MIL-C-26861

Полисульфон
MIL-P-46120A (MR)

Политетрафторэтилен
ASTM D 1457
ASTM D 1710
ASTM D 3295
MIL-R-8791

Полиуретан
ASTM D 3574
ASTM D 412

Полифениленоксид
MIL-P-46131
ASTM D 2874

Полифениленсульфид
ASTM D 4067
MIL-M-24519

Полиэтилен
ASTM D 1248
ASTM D 2513
ASTM D 2103
FED-L-P-378
FED-L-P-390

Полиэфир
ASTM D 4507
ASTM D 3220
MIL-M-24519
FED-L-P-383

Пропилен
ANSI/ASTM D 2853-70(1)
ASTM D 2147-77

Пропионат целлюлозы
ASTM D 1562
MIL-P-46074

Сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола (АБС-пластик)
ASTM D 3011
FED-L-P-1183

Сополимер стирола с акрилонитрилом
ASTM D 3011
ASTM D 1431
FED-L-P-399A

Стирол ANSI/ASTM D 1788-78A
ASTM D 1892-78
ASTM D 703-78
MIL-R-82483A (OS)

Уретан ASTM D 2000-77A
MIL-HDBK-700 (MR)

Фенолоформальдегидные смолы
ASTM D 700-75
MIL-M-47134 (MI)
MIL-R-3745

Фенольные смолы
AMS 3828B
AMS 3830
AMS 3837
AMS 3858A
ASTM D 700 ISO 800
MIL-M-14
FED-L-P-1125

Хлорированный поливинилхлорид
ANSI/ASTM D 1748-78

Плотность
ANSI/ASTM D 1248-74
ANSI/ASTM D 2581-73
BS 3412-1976
MIL-P-5143 (EA)

Эпоксидные смолы
ASTM D 3013
MIL-P-46069
MIL-P-46892

Общая сводка – соответствие методов ISO и ASTM

Методы ISO	Название	ASTM №	Название
60-1977	Пластмассы. Определение кажущейся плотности материалов, на-сыпаемых через воронку	D 1895-89(90)	Определение кажущейся плотности, коэффициента заполнения и текучести полимерных материалов
61-1976	Пластмассы. Метод определения насыпной плотности пресс-материала, который не просыпается через воронку	То же	То же
62-2008	Пластмассы. Определение водопоглощения	D 570-81(88)	Адсорбция воды пластмассами
75-1987	Пластмассы. Определение температуры прогиба под нагрузкой	D 648-82(88)	Определение температуры прогиба пластмасс под нагрузкой
171-1980	Пластмассы. Определение коэффициента уплотнения формовоч-ных материалов	D 1895-89(90)	См. выше
178-2001	Пластмассы. Определение свойств при изгибе	D 790M-86	Определение свойств пластмасс и электроизоляци-онных материалов при изгибе
179-2000	Пластмассы. Определение ударной прочности по Шарпи	D 256-90b	Определение сопротивления удару пластмасс и изо-ляционных материалов
180-2000	Пластмассы. Определение ударной прочности по Изоду	То же	То же
291-2008	Пластмассы. Стандартные атмосферы для кондиционирования и испытаний	D 618-61 (90)	Методы кондиционирования
292-1967	см. 1133-1997	D 1238-90b	Определение скорости течения термопластов с по-мощью экструзионного пластометра
306-1994	Пластмассы. Термопластичные материалы. Определение темпера-туры размягчения по Вика (VST)	D 1525-87	Определение температуры размягчения по Вика
307-1994	Пластмассы. Полиамиды. Определение числа вязкости	D 2857-87	Определение вязкости разбавленных растворов по-лимеров
458/1-1985	Пластмассы. Определение жесткости гибких материалов при кручении. Часть 1. Общий метод	D 1043-87	Определение жесткости пластмасс при кручении в зависимости от температуры
489-1999	Пластмассы. Определение показателя преломления	D 542-90	Определение показателя преломления прозрачных органических пластиков
R527—1997	Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении	D 638M-89	Определение механических свойств пластмасс при растяжении
537-1989	Пластмассы. Испытание с применением крутильного маятника	D 2236-81	Определение динамических механических свойств пластмасс с помощью крутильного маятника
846-1997	Пластмассы. Оценка воздействия микроорганизмов	G 21-90 и G 22-79(90)	Методика определения сопротивления плесени Методика определения сопротивления пластмасс воздействию бактерий
868-2003	Эбонит и пластмассы. Определение инденторной твердости с помощью дюрометра (твердость по Шору)		Определение твердости резиноподобных материалов с помощью дюрометра
899-2003	Пластмассы. Определение поведения при ползучести	D 2990-90	Определение ползучести и разрушения при ползуче-сти в условиях растяжения, сжатия и изгиба

974-1980	Пластмассы. Определение температуры хрупкости при ударе	<i>D 746-79(87)</i>	Определение температуры хрупкости пластмасс и эластомеров при ударе
1133-1997	Пластмассы. Определение индекса текучести расплава по массе термопластов	<i>D 1238-90b</i>	Определение скорости течения термопластов с помощью экструзионного пластометра
1183-2004	Пластмассы. Методы определения плотности непористых пластмасс	<i>D 1505-90</i>	Определение плотности пластмасс градиентным методом
1628/1-1998	Пластмассы. Определение вязкости полимеров в разбавленном растворе с применением капиллярных вискозиметров. Часть 1. Общие принципы	<i>D 2857-87</i>	Определение вязкости разбавленных растворов полимеров
2039/1-1987	Пластмассы. Определение твердости. Часть 1. Метод с применением шарикового индентора	<i>D 785-89</i>	Определение твердости по Роквеллу пластмасс и электроизоляционных материалов
3146-1985	Пластмассы. Определение характеристик плавления (температуры плавления или температурного интервала плавления) частично кристаллических полимеров	<i>D 2117-82(88)</i>	Определение температуры плавления частично кристаллических полимеров
3268-1978	Пластмассы. Материалы, армированные стекловолокном. Определение механических свойств при растяжении	<i>D 639-90 и D 3039-76(89)</i>	Измерения свойств пластмасс при растяжении. Определение свойств стеклонаполненных композиций при растяжении
3582-2000	Материалы полимерные пористые гибкие. Лабораторная оценка характеристик горения горизонтально расположенных небольших образцов под действием небольшого пламени	<i>D 635-88</i>	Определение скорости горения и/или области и продолжительности горения горизонтально расположенных достаточно жестких образцов
4574-1978	Пластмассы. Поливинилхлоридные смолы общего назначения. Определение погашения пластификатора при нагревании.	<i>D 3367-75 (1989)</i>	Определение сорбции пластификатора поливинилхлоридом под действием центробежных сил
4589-1996	Пластмассы. Определение характеристик горения по кислородному индексу	<i>D 2863-87</i>	Определение минимальной концентрации кислорода для поддержания горения (кислородный индекс)
4607-1978	Методы исследования климатического старения	<i>D 1435-85</i>	Методика климатических испытаний пластмасс вне помещения
4608-1998	Пластмассы. Смолы на основе томополимеров и сополимеров винилхлорида общего назначения. Определение абсорбции пластификатора при комнатной температуре	<i>D 3367-75 (90)</i>	Определение сорбции пластификатора поливинилхлоридом под действием центробежных сил
4892-1981	Пластмассы. Методы экспонирования под лабораторными источниками света	<i>D 1499-84</i>	Методика работы с аппаратурой для исследования воздействия влаги и света (угловой дуги) при экспозиции пластмасс
6186-1998	Пластмассы. Определение текучести	<i>D 1895-89 (90)</i>	Определение кажущейся плотности, коэффициента заполнения и текучести полимерных материалов
6239-1986	Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении на образцах небольшого размера	<i>D 638-90</i>	Определение свойств пластмасс при растяжении
6602-1985	Пластмассы. Определение ползучести при изгибе методом трехточечной нагрузки	<i>D 2990-90</i>	Определение ползучести и разрушения при ползучести в условиях растяжения, сжатия и изгиба
6603/1-1985	Пластмассы. Определение поведения жестких пластмасс при многоосном ударе. Часть 1. Метод падающего груза	<i>D 3090-90</i>	Определение сопротивления жестких пластмассовых листов или изделий удару с помощью метода падающего груза

Стандарты для военной приемки

<i>MIL-P-77</i>	Листы и стержни из литевых полиэфиров или диаллилфталата
<i>MIL-P-78°</i>	Ламинированные жесткие листы как основы для гравировальных досок
<i>MIL-P-79C</i>	Стержни и трубы из термореактивных меламинных и фенольных смол, армированных стеклом, волокнами или бумагой
<i>MIL-P-80</i>	Полиакриловые листы с антистатическим покрытием
<i>MIL-I-631</i>	Электроизолирующие трубки, пленки, листы и ленты из винила, полиэтилена и полиэфира
<i>MIL-I-742C</i>	Изолирующие плиты из стеклопластика
<i>MIL-P-999C</i>	Листы из термореактивных кремнийорганических смол, армированных стеклом
<i>MIL-Y-1140E</i>	Пряжа, корд, ленты и ткани из стекловолокон
<i>MIL-P-3954A</i>	Специальные материалы на основе полиэтилена
<i>MIL-P-3086</i>	Нежесткие полиамидные смолы
<i>MIL-P-3115B</i>	Листы из термореактивных фенольных смол, армированных бумагой
<i>MIL-P-3158C</i>	Изолирующая лента из пластмассы, армированной стеклянным кордом
<i>MIL-I-3190B</i>	Изолирующие втулки, гибкие, обработанные
<i>MIL-I-3825C</i>	Электроизолирующая лента, самоклеющаяся
<i>MIL-P-4640A</i>	Полиэтиленовая пленка для баллонов
<i>MIL-P-5425B</i>	Термостойкие полиакриловые листы
<i>MIL-P-5431A</i>	Листы, стержни, трубки и профили из фенольной смолы с графитовым наполнителем
<i>MIL-P-6264B</i>	Виниловые сополимеры, непластифицированные, неокрашенные и ненаполненные
<i>MIL-I-7444B</i>	Изолирующие втулки, гибкие
<i>MIL-I-7798A</i>	Электроизолирующая лента, чувствительная к давлению
<i>MIL-P-8059A</i>	Листы и трубы из термореактивных фенольных смол, армированных асбестовыми листами и тканью
<i>MIL-P-8184</i>	Полиакриловые пластмассовые листы, модифицированные
<i>MIL-P-8257</i>	Прозрачные листы, получаемые свободной заливкой, на основе термореактивных полиэфирных смол
<i>MIL-P-8587A</i>	Окрашенные прозрачные листы из ацетата целлюлозы
<i>MIL-P-8655A</i>	Листы из термореактивных фенольных смол с последующим армированием тканью
<i>MIL-P-1394C</i>	Ламинированные пластмассовые листы с медным покрытием
<i>MIL-P-9969</i>	Полиуретан, жесткий; образующий пену непосредственно при использовании в качестве упаковки
<i>MIL-P-13436A</i>	Наполненные листы из фенольной смолы, неструктурированные
<i>MIL-P-13491</i>	Листы, стержни и трубы из полистирола

<i>MIL-P-13949D</i>	Ламинированные пластмассовые листы (с использованием бумаги или стекла в качестве основы), покрытые медью
<i>MIL-P-14591B</i>	Пластмассовые пленки, нежесткие, прозрачные
<i>MIL-P-15305C</i>	Листы из термореактивных фенольных смол, армированные тканью
<i>MIL-P-15037E</i>	Листы из термореактивных меламиновых смол, армированные стеклом
<i>MIL-P-15047B</i>	Листы из термореактивных фенольных смол, армированные полиамидным волокном
<i>MIL-I-15126F</i>	Электроизолирующие ленты, чувствительные к давлению с термореактивным адгезивом
<i>MIL-P-16413</i>	Литьевые материалы на основе полиметилметакрилата
<i>MIL-P-16414</i>	Литьевые материалы на основе ацетат-бутират целлюлозы
<i>MIL-P-16416</i>	Литьевые материалы на основе ацетата целлюлозы
<i>MIL-P-17091B</i>	Стержни, листы и изделия из полиамидов
<i>MIL-P-17276</i>	Листы из ацетата целлюлозы
<i>MIL-P-17549C</i>	Ламинаты, армированные стекловолокном, для морского применения
<i>MIL-P-18057A</i>	Изолирующие рукава, гибкие, стекло, покрытое кремнийорганическим полимером
<i>MIL-P-18080</i>	Винил, гибкий, прозрачный, оптического качества
<i>MIL-P-18177C</i>	Термореактивные эпоксидные листы, армированные стеклом
<i>MIL-P-18324C</i>	Термореактивные фенольные смолы, армированные тканью, водостойкие
<i>MIL-N-18352</i>	Пластмассы на основе полиамидов, гибкие, литьевые или экструзионные марки
<i>MIL-I-18622A</i>	Электроизоляционная лента, чувствительная к давлению кремнийорганической смола с обработанным стеклом
<i>MIL-I-18746A</i>	Изолирующая лента, фторопласт со стеклом
<i>MIL-M-19098</i>	Литьевые марки полиамидов, литьевые и экструзионные пластмассы на основе полиамидов
<i>MIL-I-19161A</i>	Пластмассовые листы, тефлон и ламинаты, армированные стеклотканью
<i>MIL-I-18166A</i>	Электроизоляционная лента, чувствительная к давлению, термостойкое стекло
<i>MIL-P-19336C</i>	Пластмассовые листы из полиэтилена, исходные и содержащие бор, защита от нейтронного излучения
<i>MIL-P-19468A</i>	Стержни, изготовленные литьем или экструзией из полиэтилен-терефталата
<i>MIL-P-19735B</i>	Световая арматура из полиакрилатов, термостойкая, окрашенная и белая, изготовленная литьем под давлением
<i>MIL-P-19833B</i>	Стеклонаполненная диаллилфталатная смола
<i>MIL-P-19904</i>	Листы из АБС-пластика, жесткие
<i>MIL-M-20693A</i>	Пластмассовые литьевые материалы, жесткие, полиамиды

<i>MIL-P-21094A</i>	Ацетат целлюлозы, оптического качества
<i>MIL-P-21105C</i>	Пластмассовые листы из полиакрилатов общего назначения
<i>MIL-P-21347B</i>	Пластмассовые литые материалы, полистирол, армированный стекловолокном
<i>MIL-M-21470</i>	Литые марки полихлортрифторэтилена
<i>MIL-I-21557B</i>	Электроизоляционные рукава, гибкие из винила с обработанным стеклом
<i>MIL-P-21922A</i>	Стержни и трубы из полиэтилена
<i>MIL-P-22035</i>	Листы из полиэтилена
<i>MIL-P-22076A</i>	Электроизоляционные рукава, гибкие, для применения в области низких температур
<i>MIL-P-22096A</i>	Пластмассы на основе полиамидов, гибкие, литые и экструзионные марки
<i>MIL-I-22129C</i>	Электроизоляционные рукава, нежесткие, из полиэтилентерефталата
<i>MIL-P-22241A</i>	Листы и пленки из полиэтилентерефталата
<i>MIL-P-22242</i>	Отменен. Заменен на <i>MIL-P-22241</i>
<i>MIL-P-22270</i>	Пластмассовые пленки, полиэфирные, покрытие полиэтиленов (для идентификационных карточек)
<i>MIL-P-22296</i>	Толстостенные пластмассовые трубки и трубы из полиэтилентерефталата
<i>MIL-P-22324A</i>	Листы из термореактивной эпоксидной смолы, армированные бумагой
<i>MIL-T-22742</i>	Электроизоляционная лента, чувствительная к давлению, изготовленная из полиэтилентерефталата
<i>MIL-P-22748A</i>	Литые и экструзионные марки полиэтилена высокой плотности и сополимеров
<i>MIL-I-23053A</i>	Электроизоляционные рукава, гибкие, термоусадочные
<i>MIL-T-23145</i>	Пленочные ленты, чувствительные к давлению
<i>MIL-P-23536</i>	Листы из полиэтилена, исходные и наполненные бором
<i>MIL-I-23594A</i>	Электроизоляционная лента, термостойкая, чувствительная к давлению, изготовленная из полиэтилентерефталата
<i>MIL-I-24204</i>	Плена, изготовленная из Номекса (<i>Nomex</i>)
<i>MIL-P-24191</i>	Листы из полиакрилата, окрашенные и белые, термостойкие для применения на транспорте
<i>MIL-P-25374A</i>	Листы из полиакрилата, модифицированные, ламинированные
<i>MIL-P-25395A</i>	Термостойкие листы из полиэфирной смолы, армированные стекловолокном
<i>MIL-P-25395A</i>	Термостойкие листы из полиэфирной смолы, армированные стекловолокном, ламинаты, полученные под низким давлением
<i>MIL-P-25421A</i>	Основа из стекловолокон — ламинированные пластики, полученные под низким давлением из эпоксидных смол
<i>MIL-P-25518A</i>	Ламинированные пластики на основе кремнийорганических смол, армированные стекловолокном, полученные под низким давлением

<i>MIL-P-25690A</i>	Пластмассовые листы и изделия на основе модифицированных полиакрилатов, стойкие к образованию трещин, покрыты вытянутыми акриловыми волокнами под углами от 0,60 до 0,675° по толщине
<i>MIL-P-25770A</i>	Листы из термореактивных фенольных смол, армированные асбестом
<i>MIL-P-26692</i>	Пластмассовые трубы и трубки из полиэтилена
<i>MIL-P-27538</i>	Пластмассовые листы из фторполимера, с медным покрытием
<i>MIL-P-27730A</i>	Лента, антизадирающая, изготовленная из полиэтилентерефталата
<i>MIL-P-40619</i>	Пенополистирол
<i>MIL-P-43037</i>	Стержни из термореактивных фенольных смол, армированных полиамидными волокнами
<i>MIL-T-43036</i>	Лента, чувствительная к давлению, филаментная армированная пластмассовая пленка
<i>MIL-P-43081</i>	Пластмасса на основе низкомолекулярного полиэтилена
<i>MIL-P-43036</i>	Листы, стержни и трубки полихлортрифторэтилена
<i>MIL-P-46040A</i>	Листы из фенольных смол, теплостойкие, армированные стекловолокном
<i>MIL-P-46041</i>	Пластмассовые листы из гибкого винила
<i>MIL-P-43060</i>	Пластмассы на основе полиамидов
<i>MIL-P-46112</i>	Пластмассовые листы и полосы из полиимидных <i>H</i> -пленок
<i>MIL-P-46115</i>	Литьевые и экструзионные марки полифениленоксида
<i>MIL-P-46120</i>	Литьевые и экструзионные марки полисульфона
<i>MIL-P-46122</i>	Литьевые марки поливинилиденфторида — <i>Kynar</i> (Кайнар)
<i>MIL-P-46129</i>	Литьевые и экструзионные марки модифицированного полифениленоксида — <i>Noryl</i> (Норил)
<i>MIL-P-46131</i>	Модифицированный стеклонеполненный полифениленоксид
<i>MIL-P-52189</i>	Трубки из термореактивных фенольных смол, армированных полиамидными волокнами
<i>MIL-P-55010</i>	Пластмассовые листы из полиэтилентерефталата
<i>MIL-P-81390</i>	Литьевые марки поликарбоната, армированного стекловолокном
<i>MIL-P-5\82540</i>	Трубы, получаемые намоткой из стекловолокна с полиэфирным связующим.

Федеральные стандарты

<i>L-P-315</i>	Трубы из полиэтилена
<i>L-P-349A</i>	Литьевые и экструзионные марки ацетат-бутират целлюлозы
<i>L-P-370</i>	Сополимеры винилхлорида и винилиденхлорида. Хлорированные пластмассовые пленки
<i>L-P-375B</i>	Поливинилхлоридные пластиковые пленки, гибкие
<i>L-P-377A</i>	Полиэтилентерефталатные пластиковые пленки
<i>L-P-378A</i>	Полиэтиленовые пластиковые пленки, тонкие
<i>L-P-380</i>	Литьевые марки полиметакрилата

<i>L-P-383</i>	Ламинаты из полиэфирных смол, армированных стекловолокном, получаемые под низким давлением
<i>L-P-395A</i>	Литьевые материалы на основе полихлортирифторэтилена — KeL-F (Кель-Ф)
<i>L-P-386</i>	Пенополиуретан, гибкий
<i>L-P-387</i>	Литьевые марки полиэтиленов низкой и средней плотности
<i>L-P-389A</i>	Политетрафторэтилен для литья и экструзии
<i>L-P-390A</i>	Литьевые марки полиэтиленов низкой и средней плотности
<i>L-P-391A</i>	Листы, стержни и трубы из полиметилметакрилата, получаемые свободной заливкой
<i>L-P-392A</i>	Литьевые и экструзионные марки пластмасс на основе полиацеталей
<i>L-P-393A</i>	Литьевые и экструзионные марки пластмасс на основе поликарбоната
<i>L-P-394A</i>	Литьевые и экструзионные марки пластмасс на основе полипропилена
<i>L-P-395A</i>	Литьевые материалы на основе стеклонеполненного полиамида
<i>L-P-396</i>	Литьевые марки полистирола
<i>L-P-397</i>	Литьевые материалы на основе ацетата целлюлозы
<i>L-P-398</i>	Литьевые материалы на основе сополимера бутадиена со стиролом
<i>L-P-399</i>	Литьевые материалы на основе сополимера стирола с акрилонитрилом
<i>L-P-401</i>	Литьевые мочевиноформальдегидные смолы
<i>L-P-403</i>	Литьевые материалы на основе политетрафторэтилена (тефлона, TFE)
<i>L-P-410</i>	Полиамиды жесткие: листы, стержни, трубы и литьевые изделия
<i>L-P-501</i>	Литьевой поливинилхлорид — <i>Saran</i> (Саран)
<i>L-P-503</i>	Стержни из поливинилхлорида, твердые и жесткие
<i>L-P-504B</i>	Листы и пленки из ацетата целлюлозы
<i>L-P-505B</i>	Стойкие к образованию осколков, жесткие, армированные, гофрированные листы из полиэфиров, полиакрилата и их комбинации
<i>L-P-506</i>	Двухосноориентированные листы и пленки из полистирола
<i>L-P-507</i>	Экструдированные листы из полиакрилатов
<i>L-P-508</i>	Ламинированные декоративные и недекоративные листы из пластмасс
<i>L-P-509A</i>	Листы, стержни и трубы из термореактивных смол
<i>L-P-510A</i>	Ударопрочные листы из жесткого поливинилхлорида
<i>L-P-511</i>	Листы из термореактивных смол, армированные тканью, для последующего формования
<i>L-P-512A</i>	Полиэтиленовые листы
<i>L-P-513A</i>	Листы из термореактивных смол, армированные бумагой
<i>L-P-514A</i>	Пластмассовые листы с бумажным слоем и нанесенным адгезивом

<i>L-P-516A</i>	Листы и стержни, полученные из термореактивных смол свободной заливкой
<i>L-P-517A</i>	Пластмассовые листы с нанесенной разметкой
<i>L-P-519B</i>	Пластмассовые листы с отделкой поверхности
<i>L-P-523</i>	Экструдированные листы и пленки из полиэтилентерефталата
<i>L-P-524</i>	Ламинированные листы из полиэтилена, армированные полиамидными волокнами
<i>L-P-527A</i>	Листы из сополимера бутадиена и стирола
<i>L-P-528A</i>	Листы из ацетата целлюлозы и полиэфира с нанесенным адгезивом
<i>L-P-535</i>	Жесткие пленки из поливинилхлорида и сополимера винилхлорида с винилацетатом
<i>L-P-540</i>	Толстостенные трубы из поливинилхлорида
<i>L-P-590</i>	Полиэтиленовые листы, стержни и трубки
<i>L-P-1036</i>	Толстостенные изделия из поливинилхлорида
<i>L-P-1040</i>	Листы и полоски из поливинилфторида
<i>L-P-1125</i>	Литьевые материалы на основе фенольных смол
<i>L-P-1174</i>	Экструзионные марки сополимеров хлортрифторэтилена
<i>L-P-1184</i>	Литьевые материалы на основе АБС-пластика

Ниже приводится список стандартов *ASTM*, которые были переработаны Министерством обороны США для замены федеральных стандартов и стандартов для военной приемки.

Таблица 1. Спецификации термопластичных материалов

Номер стандарта	Стандарты ASTM
<i>Федеральные стандарты</i>	
<i>L-P-349C</i>	<i>D707</i>
<i>L-P-385C</i> (6 окт. 1988)	<i>D 1430</i>
<i>L-P-389A</i> (7 июль 1987)	<i>D2116</i>
<i>L-P-392A</i> (5 окт. 1988)	<i>D4181</i>
<i>L-P-393A</i> (29 июнь 1988)	<i>D3935</i>
<i>L-P-394B</i> (6 окт. 1988)	<i>D4101</i>
<i>L-P-395C</i> (31 дек. 1985)	<i>D4066</i>
<i>L-P-396B</i> (6 окт. 1988)	<i>D4549</i>
<i>L-P-397C</i>	<i>D706</i>
<i>L-P-398B</i>	<i>D4549</i>
<i>L-P-399B</i> (6 окт. 1988)	<i>D4203</i>
<i>L-P-403C</i> (5 авг. 1983)	<i>D1457</i>
<i>L-P-506A</i> (7 июль 1987)	<i>D1463</i>
<i>L-P-523D</i>	<i>D3368</i>
<i>L-P-1035A</i> (6 окт. 1988)	...
<i>L-P-1041A</i>	<i>D729</i>
<i>L-P-1183B</i>	<i>D1788</i>

Окончание табл. 1

Номер стандарта	Стандарты ASTM
<i>Стандарты для военной приемки</i>	
MIL-A-19468A (9 Oct. 1987)	D1710
MIL-M-19887A(SH) (12 Feb. 1985)	D4066
MIL-M-20693B (26 Aug. 1982)	D4066
MIL-P-22096B (19 Aug. 1982)	D4066
MIL-I-22129C	D3295
MIL-P-22241B (TyPe I)	D3293
MIL-P-22241B (TyPe II)	D3308
MIL-P-22241B (TyPe III)	D3369
MIL-P-22985B (27 Aug. 1981)	D787
MIL-P-46074B(MR) (4 Jan. 1982)	D1562
MIL-P-46109C(MR) (15 Jan. 1986)	D4101
MIL-P-46160(MR) (26 May 1982)	D3221
MIL-P-46161A(MR)	D3220
MIL-P-46174(MR) (2 Aug. 1984)	D4067
MIL-P-46180(MR) (3 Aug. 1981)	D4066
MIL-P-46181(MR) (1 Nov. 1985)	D4066

Таблица 2. Методы испытаний пластмасс

Методы в федеральных стандартах	Методы ASTM	Методы в федеральных стандартах	Методы ASTM
1011	D638	3041	D637
1012	D651	3051	D523
1013	D882		
1021	D695	4011	D495
1031	D790	4021	D150
1032	D1502	4031	D149
1041	D732	4041	D257
1042	D3846	4042	D257
1051	D953	4052	D257
1061	D671		
1062	D671	5011	D792
1063	D2990	5012	D792
1071	D256	5021	D2734
1072*		5031	D617
1073*		5041*	
1074	D3029		
1075*		6011	D756
1081	D785	6022	G23
1082	D2240	6023	G53
1083	D2240	6024	
1084	D2240	6031*	
1091	D1242	6041**	

* Отменен без замены.

** Действующий стандарт.

Окончание табл. 2

Методы в федеральных стандартах	Методы <i>ASTM</i>	Методы в федеральных стандартах	Методы <i>ASTM</i>
1092	<i>D</i> 1044	6051**	<i>D</i> 1435
1093	<i>D</i> 673	6052*	<i>F</i> 484
1101	<i>D</i> 621	6053	<i>B</i> 117, <i>G</i> 43
1111	<i>D</i> 229	6054*	<i>D</i> 1203
1121	<i>D</i> 1004	6061*	<i>G</i> 21
1131	<i>D</i> 1893	6062*	<i>D</i> 543
2011	<i>D</i> 648	6071	<i>D</i> 494
2021	<i>D</i> 635	6081	<i>D</i> 570
2022	<i>D</i> 568	6091	<i>E</i> 96
2023	<i>D</i> 2863	7011	<i>D</i> 793
2031	<i>D</i> 696	7021	<i>C</i> 613
2032	<i>D</i> 696	7031	<i>D</i> 4350
2041	<i>D</i> 569	7032	
2051	<i>D</i> 746	7041	
3011	<i>D</i> 542	7051	
3022	<i>D</i> 1003	7061	
3031	<i>E</i> 167	7071	
3032	<i>D</i> 1494	7081**	

Таблица 3. Сопоставление стандартов, разработанных *ASTM* и *ISO* в области методов испытаний пластмасс

Эта таблица в полном объеме приведена в главе 20 (см. таблицу 20.2)

Приложение I

Справочные таблицы

1. Химическое сопротивление (воспроизведено с разрешения *Plastics Word, A, Cahner Publication*).
2. Схемы получения полимеров (*Publics Technology*).
3. Таблицы соответствия температурных шкал.
4. Десятичные эквиваленты дробных долей дюйма.
5. Соответствие между различными шкалами твердости.
6. Соответствие между шкалами твердости по Шору и по Роквеллу.
7. Таблицы пересчета различных мер.
8. Таблицы пересчета величин, используемых в технологии полимеров.
9. Таблицы обозначений, используемых в научных исследованиях.
10. Сопоставление свойств различных материалов.
11. Сопоставление применимости пластмасс в различных условиях.
12. Организации, подтверждающие возможность использования пластмасс.
13. Четыре основные базы данных по свойствам пластмасс

Полихлортрифторэтилен (ПХТФЭ)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	1		1	1	1	2	2	2	1	1	1	5	5	1	1					0,01–0,20
Фурановые смолы	4		4	4	4	1	4	1	4	2	4	1	5	1	4					0,1–1,4
Иономеры	1		1	1	1	2	3	2	3	2	3	2	3	1	2					0,01–1,30
Малеминовые смолы, наполненные	4		2–4	1–4	2–5	1	2–4	1	2–4	2–5	5	3–5	5	1–5	5					0,2–0,5
Нитрилы (барьерные композиции – сплавы с АБС-пластиком и САН)	1		1	1	2	1	2	2	3	5	5	5	5	1	1					0,2–1,9
Полиамиды	1		1	1	1	2	3	3	5	1	1	4	5	2	2					0,1–2,0
Фенольные смолы, наполненные	4		4	4	5	1	1	1	1	1	3	1	4	1	3					<0,01
Полиалломеры	1		1	2	3	1	1	3	4	2	3	2	3	1	1					0,22–0,28
Полиамидимиды	5		3	4	5	1	2	2	2	1	1	2	4	3	4					1,2–1,8
Полиарилсульфоны (ПАС)	3	5		5	4	5	1	2	1	3	1	3	1	4	1					<0,01–0,3
Полибутадиены (ПБ)	5	5		1	5	5	1	5	5	1	1	1	1	1	5					0,15–0,35
Поликарбонаты (ПК)	2	5		3–5	3	5	1	3–4	2	5	3	4–5	2	3–5	2	3–4				0,06–0,09
Полиэфир термопластичный	1–3	3–5	2	3	2	4	2	3	3	5	2	3	2	4	3–4	4–5				0,01–2,50
Полиэфирная термореактивная смола, армированная стекляными волокнами	4	5	4	5	4	5	1	1	1	1	1–2	1–3	3–5	2	3					0,00–0,01
Полиэтилены низкой и высокой плотности (ПЭНП, ПЭВП)	3	4	3	4	3	4		1	1	1	1	1	1	3	4					<0,01
Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)	1	1	1	1	1	1		3	4	5	3	4	2	5	1	1				0,3–0,4
Полиимиды	4	5	2	3	4	5		1	1	1	2	1	2	2	3					0,06–0,07
Полифениленоксид (ПФО)	1	2	1	1	1	2		1	1	1	1	1	2	1	1					<0,05

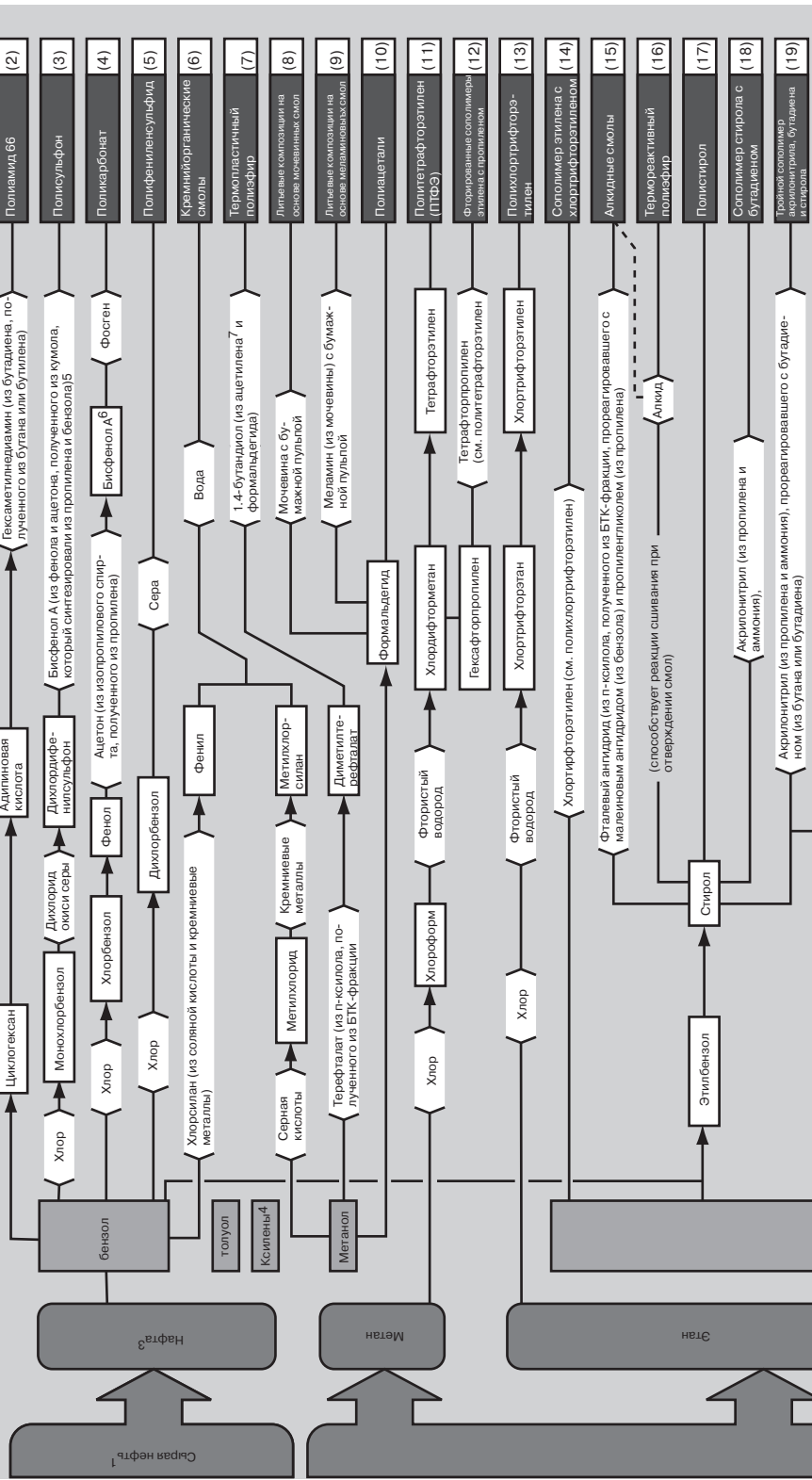
3. Таблицы соответствия температурных шкал

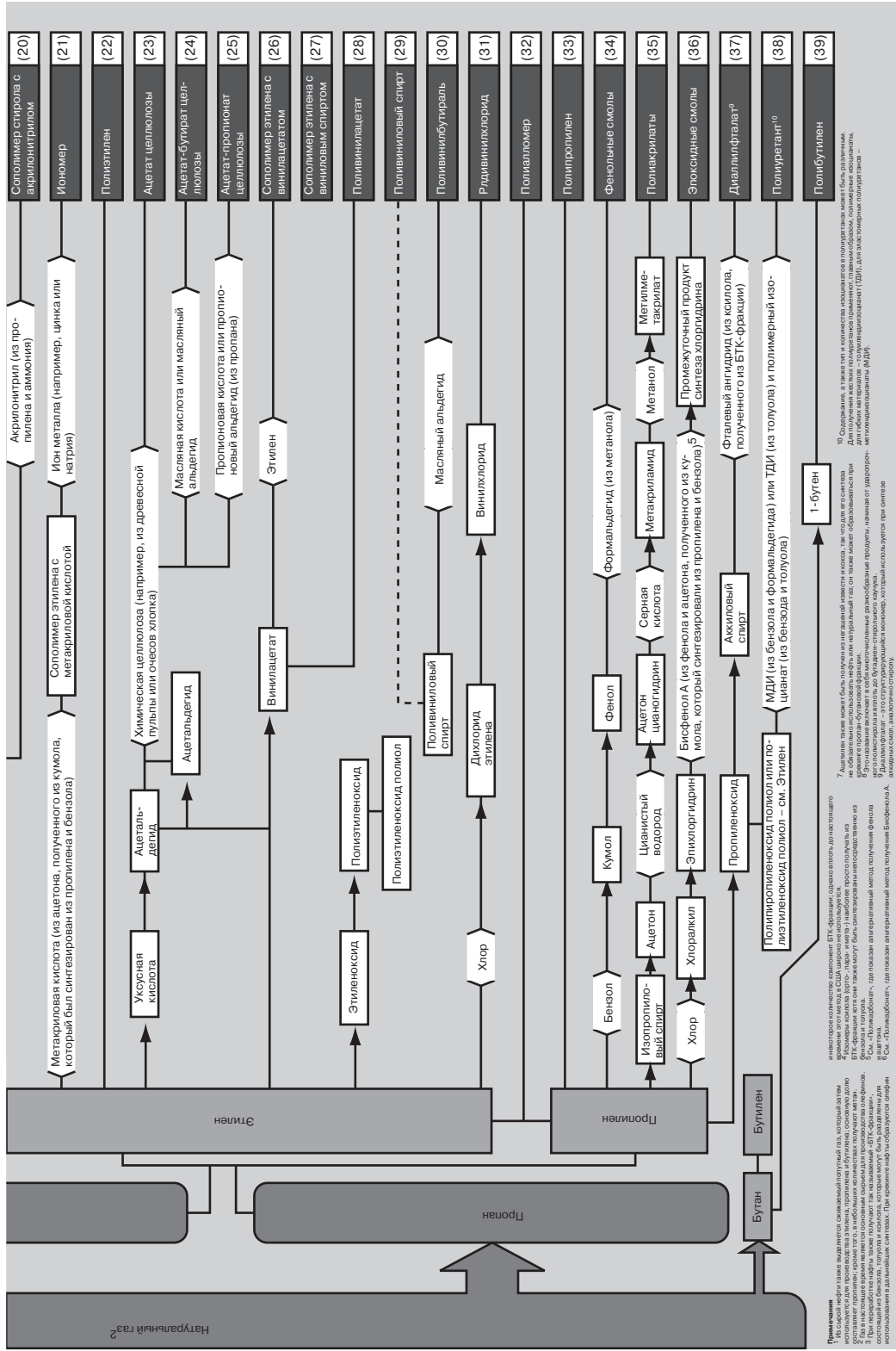
°C = 5/9 (°F – 32)						°F = (9/5 × °C) + 32					
°C			°F			°C			°F		
–17,8	0	32	8,89	48	118,4	35,6	96	204,8	271	520	968
–17,2	1	33,8	9,44	49	120,2	36,1	97	206,6	277	530	986
–16,7	2	35,6	10,0	50	122,0	36,7	98	208,4	282	540	1004
–16,1	3	37,4	10,6	51	123,8	37,2	99	210,2	288	550	1022
–15,6	4	39,2	11,1	52	125,6	37,8	100	212,0	293	560	1040
–15,0	5	41,0	11,7	53	127,4	38	100	212	299	570	1058
–14,4	6	42,8	12,2	54	129,2	43	110	230	304	580	1076
–13,9	7	44,6	12,8	55	131,0	49	120	248	310	590	1094
–13,3	8	46,4	13,3	56	132,8	54	130	266	316	600	1112
–12,8	9	48,2	13,9	57	134,6	60	140	284	321	610	1130
–12,2	10	50,0	14,4	58	136,4	66	150	302	327	620	1148
–11,7	11	51,8	15,0	59	138,2	71	160	320	332	630	1166
–11,1	12	53,6	15,6	60	140,0	77	170	338	338	640	1184
–10,6	13	55,4	16,1	61	141,8	82	180	356	343	650	1202
–10,0	14	57,2	16,7	62	143,6	88	190	374	349	660	1220
–9,44	15	59,0	17,2	63	145,4	93	200	392	354	670	1238
–8,89	16	60,8	17,8	64	147,2	99	210	410	360	680	1256
–8,33	17	62,6	18,3	65	149,0	100	212	413	366	690	1274
–7,78	18	64,4	18,9	66	150,8	104	220	428	371	700	1292
–7,22	19	66,2	19,4	67	152,6	110	230	446	377	710	1310
–6,67	20	68,0	20,0	68	154,4	116	240	464	382	720	1328
–6,11	21	69,8	20,6	69	156,2	121	250	482	388	730	1346
–5,56	22	71,6	21,1	70	158,0	127	260	500	393	740	1364
–5,00	23	73,4	21,7	71	159,8	132	270	518	399	750	1382
–4,44	24	75,2	22,2	72	161,6	138	280	536	404	760	1400
–3,89	25	77,0	22,8	73	163,4	143	290	554	410	770	1418
–3,33	26	78,8	23,3	74	165,2	149	300	572	416	780	1436
–2,78	27	80,6	23,9	75	167,0	154	310	590	421	790	1454
–2,22	28	82,4	24,4	76	168,8	160	320	608	427	800	1472
–1,67	29	84,2	25,0	77	170,6	166	330	626	432	810	1490
–1,11	30	86,0	25,6	78	172,4	171	340	644	438	820	1508
–0,56	31	87,8	26,1	79	174,2	177	350	662	443	830	1526
–0	32	89,6	26,7	80	176,0	182	360	680	449	840	1544
0,56	33	91,4	27,2	81	177,8	188	370	698	454	850	1562
1,11	34	93,2	27,8	82	179,6	193	380	716	460	860	1580
1,67	35	95,0	28,3	83	181,4	199	390	734	466	870	1598
2,22	36	96,8	28,9	84	183,2	204	400	752	471	880	1616
2,78	37	98,6	29,4	85	185,0	210	410	770	477	890	1634
3,33	38	100,4	30,0	86	186,8	216	420	788	482	900	1652
3,89	39	102,2	30,6	87	188,6	221	430	806	488	910	1670
4,44	40	104,0	31,1	88	190,4	227	440	824	493	920	1688
5,00	41	105,8	31,7	89	192,2	232	450	842	499	930	1706
5,56	42	107,6	32,2	90	194,0	238	460	860	504	940	1724
6,11	43	109,4	32,8	91	195,8	243	470	878	510	950	1742
6,67	44	111,2	33,3	92	196,7	249	480	896	516	960	1760
7,22	45	113,0	33,9	93	199,4	254	490	914	521	970	1778
7,78	46	114,8	34,4	94	201,2	260	500	932	527	980	1796
8,33	47	116,6	35,0	95	203,0	266	510	950	532	990	1814

Упрощенная схема путей синтеза полимеров

Как их получают @Pastic Technology Magazine, 1974
Схема показывает основные принятые в настоящее время способы синтеза полимерных материалов, исходя из нефти и природного газа

Символ означает, что химическое соединение, заключенное в скобки, реагирует с веществом, которое указано слева непосредственно перед этим соединением

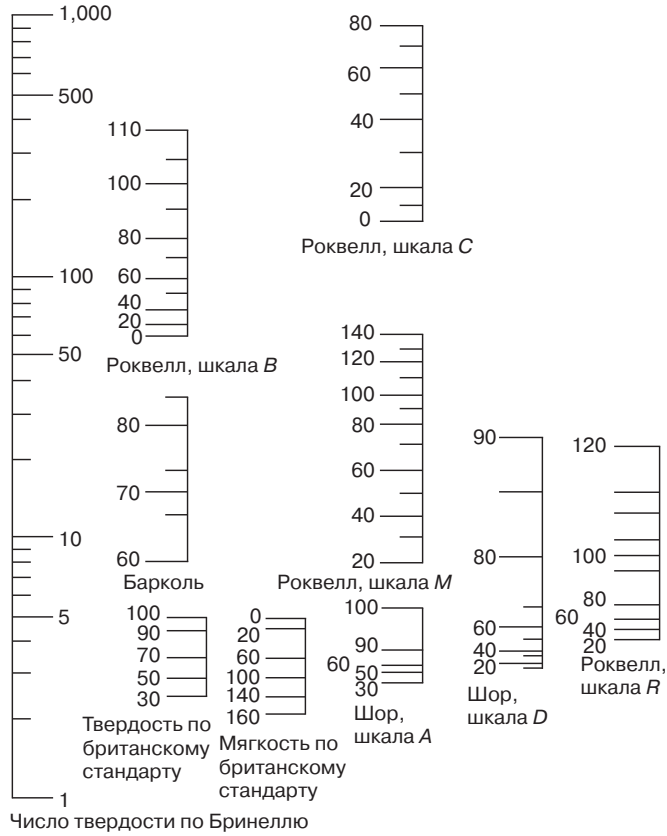




4. Десятичные эквиваленты дробных долей дюйма

1/64	0,015	625	17/64	0,265	625	33/64	0,515	625	49/64	0,765	625
1/32	0,031	250	9/32	0,281	250	17/32	0,531	250	25/32	0,781	250
3/64	0,046	875	19/64	0,296	875	35/64	0,546	875	51/64	0,796	875
1/16	0,062	500	5/16	0,312	500	9/16	0,562	500	13/16	0,812	500
5/64	0,078	125	21/64	0,328	125	37/64	0,578	125	53/64	0,828	125
3/32	0,093	750	11/32	0,343	750	19/32	0,593	750	27/32	0,843	750
7/64	0,109	375	23/64	0,359	375	39/64	0,609	375	55/64	0,859	375
1/8	0,125	000	3/8	0,375	000	5/8	0,625	000	7/8	0,875	000
9/64	0,140	625	25/64	0,390	625	41/64	0,640	625	57/64	0,890	625
5/32	0,156	250	13/32	0,406	250	21/32	0,656	250	29/32	0,906	250
11/64	0,171	875	27/64	0,421	875	43/64	0,671	875	59/64	0,921	875
3/16	0,187	500	7/16	0,437	500	11/16	0,687	500	15/16	0,937	500
13/64	0,203	125	29/64	0,453	125	45/64	0,703	125	61/64	0,953	125
7/32	0,218	750	15/32	0,468	750	23/32	0,718	750	31/32	0,968	750
15/64	0,234	375	31/64	0,484	375	47/64	0,734	375	63/64	0,984	375
1/4	0,250	000	1/2	0,500	000	3/4	0,750	000	1	1,000	000

5. Соответствие между различными шкалами твердости



6. Соответствие между шкалами твердости по Шору и по Роквеллу

Твердость материала может быть оценена различными способами. Твердость по Роквеллу определяется сопротивлением материала внедрению в него стального шарика. Для оценки твердости мягких полимерных материалов и резин более подходит метод определения сопротивления внедрению по Шору. Ниже приводится таблица соответствия между оценками твердости по наиболее часто используемым шкалам.

Обычные эластомеры								Термопласты										Реакто- пласты	
						Термопластичные эластомеры													
20 A	30 A	40 A	50 A	60 A	70 A	80 A	90 A	100 A											
							40 D	50 D	60 D	70 D	80 D	90 D							
									50 R	60 R	70 R	80 R	90 R	100 R	110 R	120 R	130 R	140 R	150 R
Мягкие																		Жесткие	

7. Таблицы пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Акр (<i>acre</i>)	43,560	фут ² (<i>ft</i> ²)
	1,562 · 10 ⁻³	кв. мили (<i>sq. mi</i>)
	160	кв. род (<i>sq. rod</i>)
	0,4047	гектар (<i>hectare</i>)
Ангстрем	3,937 · 10 ⁻⁷	дюйм (<i>in.</i>)
	1 · 10 ⁻⁴	мк (μ)
	0,1	мкм (μm)
	1 · 10 ⁻⁸	см (<i>cm</i>)
	1 · 10 ⁻¹⁰	м (<i>m</i>)
Ар	3,954	кв. род (<i>sq. rod</i>)
	100	м ² (<i>m</i> ²)
Атмосфера	119,6	ярд ² (<i>yd</i> ²)
	760	мм рт. ст. (<i>mm Hg</i>) при 0 °С
	29,92	дюйм рт. ст. (<i>in Hg</i>) при 0 °С
	406,79	дюйм Н ₂ О (<i>in H₂O</i>) при 4 °С
	33,899	фут Н ₂ О (<i>ft H₂O</i>) при 4 °С
	407,16	дюйм Н ₂ О (<i>in H₂O</i>) при 15 °С
	33,95	фут Н ₂ О (<i>ft H₂O</i>) при 15 °С
	1,0333	кг/см ² (<i>kg/cm²</i>)
	1033,3	кг/м ² (<i>kg/m²</i>)
	1,01325 · 10 ⁶	дин/см ² (<i>dynes/cm²</i>)
	14,696	фунт/дюйм ² (<i>lb/in²</i>)
	2116,32	фунт/фут ² (<i>lb/in²</i>)

Продолжение табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Бар	1,0333	бар (<i>bar</i>)
	0,9869	атм (<i>atm</i>)
	750	мм рт.ст. (<i>mm Hg</i>) при 0 °С
	10,197	кг/м ² (<i>kg/m²</i>)
	$1 \cdot 10^6$	дин/см ² (<i>dyne/cm²</i>)
Баррель	14,50	фунт/дюйм ² (<i>lb/in²</i>)
	42	галлон (<i>gal</i>)
	777,98	фут-фунт (<i>ft-lb</i>)
	3,930 · 10 ⁻⁴	л.с.-ч (<i>hp-hr</i>)
	2,931 · 10 ⁻⁴	кВт-ч (<i>kw-hr</i>)
БЕТ (BTU) (британская единица теплоты)	2,520 · 10 ⁻¹	кал (<i>cal</i>)
	107,6	кг-м (<i>kg-m</i>)
	1,055	Дж (<i>Joule</i>)
	1,055	Вт (<i>watt</i>)
	0,0236	л.с. (<i>hp</i>)
БЕТ/с	17,58	Вт (<i>watt</i>)
БЕТ/мин	0,55556	кал/г (<i>cal/gm</i>)
	3,238	л (<i>l</i>)
БЕТ/фунт	0,3524	гл (<i>hectoliter</i>)
	4	пек (<i>peck</i>)
Бушель	3,968 · 10 ⁻³	БЕТ (BTU)
Калория	1,8	БЕТ/фунт (<i>BTU/lb</i>)
Калория/г	0,2	г (<i>g</i>)
Карат	100	фунт (<i>lb</i>)
Центал	0,032808	фут (<i>ft</i>)
Сантиметр	0,373700	дюйм (<i>in</i>)
	10000	мкм (μ)
	$1 \cdot 10^8$	ангстрем (Å)
	0,01	м (<i>m</i>)
	10	мм (<i>mm</i>)
См. рт. ст. при 0 °С	0,01316	атм
	0,1934	фунт/дюйм ² (<i>lb/in²</i>)
	27,845	фунт/фут ² (<i>lb/ft²</i>)
	0,44604	фут H ₂ O (<i>ft H₂O</i>) при 40 °С
	135,95	кг/м ² (<i>kg/m²</i>)
Сантиметр ²	13,332	дин/см ² (<i>dyne/cm²</i>)
	100	мм ² (<i>mm²</i>)
	$1 \cdot 10^{-4}$	м ² (<i>m²</i>)
	0,1550	дюйм ² (<i>in²</i>)
	0,00108	фут ² (<i>ft²</i>)
Сантиметр ³	$1,196 \cdot 10^{-4}$	ярд ² (<i>yd²</i>)
	0,061	дюйм (<i>in³</i>)
	$3,531 \cdot 10^{-5}$	фут ³ (<i>ft³</i>)
	$1,3079 \cdot 10^{-6}$	ярд ³ (<i>yd³</i>)
	$1 \cdot 10^{-6}$	дюйм ³ (<i>in³</i>)
Сантиметры ³ (сотая часть дюйма) ³	0,99997	мл (<i>ml</i>)
	0,0388	унции – фут США (<i>oz US ft</i>)
	0,0351	унции – брит. фут (<i>oz Brit. Ft</i>)

Продолжение табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Сантиметр/с	$10,567 \cdot 10^{-4}$	кварта – фут США (<i>qt US ft</i>)
	$8,7988 \cdot 10^{-4}$	кварта – британский фут (<i>qt Brit. Ft</i>)
	$2,6417 \cdot 10^{-4}$	галлон США – (<i>gal US</i>)
	$2,1997 \cdot 10^{-4}$	галлон брит. (<i>gal Brit</i>)
	0,0328	фут/с (<i>ft/s</i>)
	1,985	фут/мин (<i>ft/min</i>)
	0,06	м/мин (<i>m/min</i>)
	$3,728 \cdot 10^{-4}$	миль/мин (<i>mi/min</i>)
	0,02237	миль/ч (<i>mi/hr</i>)
	0,03600	км/ч (<i>km/hr</i>)
Сантипуаз	$6,72 \cdot 10^{-4}$	фунт/с-фут (<i>lb/s-ft</i>)
Чейн (землемерная)	3,60	кг/ч-м (<i>kg/h-m</i>)
	100	линия (<i>link</i>)
	66	фут (<i>ft</i>)
Шеваль-вапо (<i>Cheval-vapeur</i>)	20,117	м (<i>m</i>)
	735,499	Вт (<i>watt</i>)
	0,9867	л.с. (<i>hp</i>)
Корд	1,28	фут ³ (<i>ft³</i>)
	3,625	стер (<i>stere</i>)
	86,400	с (<i>s</i>)
Сутки	1,441	мин (<i>min</i>)
	0,143	неделя (<i>wk</i>)
	0,0028	год (<i>yr</i>)
	3,937	дюйм (<i>in</i>)
Дециметр	0,328	фут (<i>ft</i>)
Драм (сухой)	0,0625	унция, сухая (<i>oz, wt</i>)
	1,7718	г (<i>g</i>)
Драм (жидкостной)	3,6967	см ³ (<i>cc</i>)
	0,25	унция, жидкая (<i>oz, fl</i>)
Дина	$1,020 \cdot 10^{-3}$	г (<i>g</i>)
	$2,248 \cdot 10^{-6}$	фунт (<i>lb</i>)
Дина/сантиметр ²	$1 \cdot 10^{-6}$	бар (<i>bar</i>)
	$10,197 \cdot 10^{-4}$	г/см ² (<i>g/cm²</i>)
	$1,4504 \cdot 10^{-5}$	фунт/см ² (<i>lb/cm²</i>)
Эль	45	дюйм (<i>in</i>)
Эрг	$9,4805 \cdot 10^{-10}$	БЕТ (<i>BTU</i>)
	1	дин-см (<i>dyn-cm</i>)
	$7,376 \cdot 10^{-8}$	фут-фунт (<i>ft-lb</i>)
	$2,388 \cdot 10^{-11}$	ккал (<i>cal, kg</i>)
	6	фут (<i>ft</i>)
Фатом (морская сажень)	9	галлон (<i>gal</i>)
Фиркин	30,48	см (<i>cm</i>)
Фут	0,3048	м (<i>m</i>)
Фут водяного столба, 4 °С	0,0295	атм (<i>atm</i>)
	0,883	дюйм рт. ст. (<i>in Hg</i>) 0 °С
	2,419	см рт. ст. (<i>cm Hg</i>) 0 °С
	0,4335	фунт/дюйм ² (<i>lb/in²</i>)

Продолжение табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Фут ²	62,427	фунт/фут ² (<i>lb/ft²</i>)
	304,79	кг/м ² (<i>kg/m²</i>)
	0,111	ярд ² (<i>yd²</i>)
	$3,587 \cdot 10^{-8}$	миля ² (<i>mi²</i>)
	$2,296 \cdot 10^{-5}$	акр (<i>acre</i>)
Фут ³	0,0929	м ² (<i>m²</i>)
	929	см ² (<i>cm²</i>)
	1,728	дюйм ³ (<i>in³</i>)
	0,037	ярд ³ (<i>yd³</i>)
	28,316	см ³ (<i>cm³</i>)
	0,02832	м ³ (<i>m³</i>)
	28,316	л (<i>l</i>)
Фут (H ₂ O)	7,4805	галлон США (<i>gal US</i>)
	6,2288	галлон, брит. (<i>gal Brit.</i>)
Фут ³ /минута	62,42	Фунт (<i>lb</i>) при 4°C
	62,36	Фунт (<i>lb</i>) при 15°C
	0,4720	л/с (<i>hp</i>)
Фут·фунт Фут·фунт/минута Фут/минута	472	см ³ /с (<i>cc/sec</i>)
	448,831	галлон/мин (<i>gal/min</i>)
	0,1383	кг·м (<i>kg·m</i>)
	$3,030 \cdot 10^{-5}$	л.с. (<i>hp</i>)
	0,01667	фут/с (<i>ft/sec</i>)
	0,0114	м/ч (<i>mph</i>)
	0,508	см/с (<i>cm/sec</i>)
	0,005	м/с (<i>m/sec</i>)
	0,3048	м/мин (<i>m/min</i>)
	0,0183	км/ч (<i>km/h</i>)
Фут/секунда	0,01136	миль/мин (<i>mi/hr</i>)
	0,6818	м/ч (<i>mph</i>)
	30,48	см/с (<i>cm/sec</i>)
	18,288	м/мин (<i>m/min</i>)
	1,097	км/ч (<i>km/hr</i>)
Фарлонг	660	фут (<i>ft</i>)
	220	ярд (<i>yd</i>)
	40	рд (<i>rod</i>)
Галлон (США)	0,8327	галлон брит. (<i>gal Brit</i>)
	128	унция (<i>oz</i>)
	8	пинта (<i>pt</i>)
	3785,4	см ³ (<i>cc</i>)
	3,785	л (<i>l</i>)
	0,00379	м ³ (<i>m³</i>)
	231	дюйм ³ (<i>in³</i>)
	0,1337	фут ³ (<i>ft³</i>)
	0,00495	ярд ³ (<i>yd³</i>)
	8,3378	фунт H ₂ O (<i>lb H₂O</i>) при 60 °F
Галлон, британский	1,2009	галлон США (<i>gal US</i>)
	4546	см ³ (<i>cc</i>)
	4546	л (<i>l</i>)

Продолжение табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Галлон США/минута	277,419	дюйм ³ (<i>in</i> ³)
	0,16054	фут ³ (<i>ft</i> ³)
	10	фунт H ₂ O (<i>lb H₂O</i>) при 60 °F
	160	унция, брит. жидк. (<i>oz Brit. fl</i>)
	8,0208	фут ³ /ч (<i>ft</i> ³ / <i>hr</i>)
Гилл США	0,06308	л/с (<i>l/sec</i>)
Гран	4	унция (<i>oz</i>)
Грамм	0,00229	унция, англ. (<i>oz avoir.</i>)
	0,0648	г (<i>g</i>)
	0,0353	унция, англ. (<i>oz avoir.</i>)
Грамм/сантиметр ²	0,0022	фунт (<i>lb</i>)
	15,432	гран (<i>grain</i>)
	9,6784 · 10 ⁻⁴	атм (<i>atm</i>)
	0,7356	мм рт. ст. (<i>mm Hg</i>) при 0 °C
	0,0289	дюйм рт. ст. (<i>in Hg</i>) при 0 °C
	0,3284	фут рт. ст. (<i>ft Hg</i>) при 0 °C
	0,0142	фунт/дюйм ² (<i>lb/in</i> ²)
	2,0482	фунт/фут ² (<i>lb/ft</i> ²)
	980,665	дин/см ² (<i>dyne/cm</i> ²)
	10	кг/м ² (<i>kg/m</i> ²)
Грамм/сантиметр ³	62,428	фунт/фут ³ (<i>lb/ft</i> ³)
	8,345	фунт/галлон США (<i>lb/gal US</i>)
	0,0361	фунт/дюйм ³ (<i>lb/in</i> ³)
	1	г/мл (<i>g/ml</i>)
	1000	частей на миллион (<i>ppm</i>)
Ускорение свободного падения	0,0624	фунт/фут ³ (<i>lb/ft</i> ³)
	32,724	фут/с ² (<i>ft/sec</i> ²)
	980,665	см/с ² (<i>cm/sec</i> ²)
Хэнд	4	дюйм (<i>in</i>)
	2,471	акр (<i>acre</i>)
	100	ар (<i>are</i>)
	107,640	фут ² (<i>ft</i> ²)
Большая бочка	10,000	м ² (<i>m</i> ²)
Лошадиные силы	63	галлон (<i>gal</i>)
	42,418	БЕТ/мин (<i>BTU/min</i>)
	33,000	фут-фунт/мин (<i>ft-lb/min</i>)
	550	фут-фунт/с (<i>ft-lb/sec</i>)
	0,7457	кВт (<i>kw</i>)
Час	10,688	ккал/мин (<i>cal-kg/min</i>)
	1,014	шеваль-вапо (<i>cheval-vapeur</i>)
	3600	с (<i>sec</i>)
	0,04167	сут (<i>day</i>)
Центнер	0,0059	неделя (<i>wk</i>)
	100	фунт, коротких (<i>lb, short</i>)
Дюйм	112	фунт, длинных (<i>lb, long</i>)
	1000	мил (<i>mil</i>)
	0,083	фут (<i>ft</i>)

Продолжение табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Дюйм рт. ст. при 0 °С	0,02778	ярд (<i>yd</i>)
	2,54	см (<i>cm</i>)
	0,0254	м (<i>m</i>)
	$2,54 \cdot 10^8$	Ангстрем (\AA)
	13595	дюйм вод. ст. (<i>in H₂O</i>)
	1,133	фут вод. ст. (<i>ft H₂O</i>)
	0,0334	атм (<i>atm</i>)
	25,4	мм рт. ст. (<i>mm Hg</i>)
	34,5	г/см ² (<i>g/cm²</i>)
	345,3	кг/м ² (<i>kg/m²</i>)
Дюйм рт. ст. при 4 °С	33864	дин/см ² (<i>dyne/cm²</i>)
	0,4912	фунт/дюйм ² (<i>lb/in²</i>)
	70,73	фунт/фут ² (<i>lb/ft²</i>)
	0,00245	атм (<i>atm</i>)
	0,07355	дюйм рт. ст. (<i>in Hg</i>)
	25,399	кг/м ² (<i>kg/m²</i>)
	5,2022	фунт/фут ² (<i>lb/ft²</i>)
Дюйм ²	0,0361	фунт/дюйм ² (<i>lb/in²</i>)
	6,4516	см ² (<i>cm²</i>)
	$6,4516 \cdot 10^{-4}$	м ² (<i>m²</i>)
Дюйм ³	0,0069	фут ² (<i>ft²</i>)
	0,00077	ярд ² (<i>yd²</i>)
	16,387	см ³ (<i>cm³</i>)
	$5,6870 \cdot 10^{-4}$	фут ³ (<i>ft³</i>)
	$1,6387 \cdot 10^{-5}$	м ³ (<i>m³</i>)
	$2,14336 \cdot 10^5$	ярд ³ (<i>yd³</i>)
	0,003606	галлон. Брит. (<i>gal Brit</i>)
	0,004329	галлон США (<i>gal USA</i>)
	0,01639	л (<i>l</i>)
	0,5541	унция США, жидк. (<i>oz US fl</i>)
Килограмм	0,01488	кварта США, сухая (<i>qt US dry</i>)
	0,01732	кварта США, жидк. (<i>qt US fl</i>)
	35,234	унция, англ. (<i>oz, avoird.</i>)
	2,20246	фунт (<i>lb</i>)
	$9,843 \cdot 10^{-4}$	тонна, длинная (<i>ton long</i>)
	0,0011	тонна, короткая (<i>ton short</i>)
	7,2330	фут-фунт (<i>ft-lb</i>)
	0,67197	фунт/фут (<i>lb/ft</i>)
	0,07356	мм рт. ст. (<i>mm Hg</i>) при 0 °С
	0,00142	фунт/дюйм ² (<i>lb/in²</i>)
Килограмм/метр	$9,6777 \cdot 10^{-5}$	атм (<i>atm</i>)
	0,20482	фунт/фут ² (<i>lb/ft²</i>)
Килограмм/метр ²		
Килограмм/метр ³	0,06243	фунт/фут ³ (<i>lb/ft³</i>)
	0,001	г/см ³ (<i>g/cm³</i>)

Продолжение табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Килолитр	35,317	фут ³ (<i>ft</i> ³)
Километр	3280,8	фут (<i>ft</i>)
	0,53939	миль морских (<i>mi naut</i>)
	0,62137	миль (<i>mi</i>)
	1093,6	ярд (<i>yd</i>)
Километр/час	27,7778	см/с (<i>cm/sec</i>)
	54,68	фут/мин (<i>ft/min</i>)
	0,9113	фут/с (<i>ft/sec</i>)
	0,5396	узлы (<i>knot</i>)
	16,667	м/мин (<i>m/min</i>)
	0,27778	м/с (<i>m/sec</i>)
Километр ²	1,076 · 10 ⁷	фут ² (<i>ft</i> ²)
	1,196 · 10 ⁸	ярд ² (<i>yd</i> ²)
	0,386	миль ² (<i>mi</i> ²)
	1 · 10 ⁶	м ² (<i>m</i> ²)
	247,1	акр (<i>acre</i>)
Киловатт	56,884	БЕТ/мин (<i>BTU/min</i>)
	1,3410	л. с. (<i>hp</i>)
Киловатт-час	3413	БЕТ (<i>BTU</i>)
	1,3410	л. с.-ч (<i>hp-hr</i>)
Узел	51,479	см/с (<i>cm/sec</i>)
	6080,2	фут/ч (<i>foot/hr</i>)
	1,15155	миль/ч (<i>mph</i>)
Лига	3	миль (<i>mi</i>)
Световой год	94637 · 1012	км (<i>km</i>)
	5,88 · 1012	миль (<i>mi</i>)
Линия (<i>link</i>)	0,66	фут (<i>ft</i>)
Литр	61,025	дюйм ³ (<i>in</i> ³)
	0,035	фут ³ (<i>ft</i> ³)
	0,2642	галлон США (<i>gal US</i>)
	33,814	унция США, жидк. (<i>oz US fl</i>)
	1,05668	кварта США, жидк. (<i>qt US fl</i>)
	0,8799	кварта Брит., жидк. (<i>qt Brit fl</i>)
Литр/секунда	15,8507	галлон/мин (<i>gal/min</i>)
Метр	1 · 10 ¹⁰	Ангстрем (<i>Å</i>)
	3,2808	фут (<i>ft</i>)
	39,370	дюйм (<i>in</i>)
	5,3959 · 10 ⁻⁴	миля морская (<i>mi naut</i>)
	6,2137 · 10 ⁻⁴	миль (<i>mi</i>)
	1,0936	ярд (<i>yd</i>)
	1 · 10 ⁹	мкм (<i>μ</i>)
Метр/минута	0,05468	фут/с (<i>ft/sec</i>)
	0,06	км/ч (<i>km/hr</i>)
	0,03728	миль/ч (<i>mph</i>)
Метр ²	0,01	ар (<i>are</i>)

Продолжение табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Метр ³	$2,471 \cdot 10^{-4}$	акр (<i>acre</i>)
	10,7639	фут ² (<i>ft</i> ²)
	1550	дюйм ² (<i>in</i> ²)
	$3,8610 \cdot 10^{-7}$	миль ² (<i>mi</i> ²)
	1,19598	ярд ² (<i>yd</i> ²)
	35,314	фут ³ (<i>ft</i> ³)
	61023	дюйм ³ (<i>in</i> ³)
	1,3079	ярд ³ (<i>yd</i> ³)
	264,73	галлон (<i>gal</i>)
	999,973	л (<i>l</i>)
Микрон	1056,7	кварта США, жидк. (<i>qt US fl</i>)
	$1 \cdot 10^4$	Ангстрем (\AA)
	$1 \cdot 10^{-4}$	см (<i>cm</i>)
Миля законная (США)	$3,937 \cdot 10^{-5}$	дюйм (<i>in</i>)
	8	фаргонг (<i>furlong</i>)
	63360	дюйм (<i>in</i>)
	1,60935	км (<i>km</i>)
	1609,35	м (<i>m</i>)
	0,8684	миля морская (<i>mi naut</i>)
	320	род (<i>rod</i>)
Миля морская	1760	ярд (<i>yd</i>)
	6080,2	фут (<i>ft</i>)
	1,85325	км (<i>km</i>)
	1,1516	миля законная (<i>mi statute</i>)
Миль/час	44,704	м/с (<i>m/sec</i>)
	88	фут/м (<i>ft/min</i>)
	0,8684	узлы (<i>knot</i>)
	26,82	м/мин (<i>m/min</i>)
	$3,5274 \cdot 10^{-5}$	унций, англ. (<i>oz, avoird.</i>)
Миллиграмм	$5,6438 \cdot 10^{-4}$	драм (<i>dram</i>)
	$2,2046 \cdot 10^{-6}$	фунт (<i>lb</i>)
	0,03937	дюйм (<i>in</i>)
	1000	мкм (μ)
Миллиметр рт. ст. при 0 °С	$1,316 \cdot 10^{-3}$	атм (<i>atm</i>)
	1333,22	дин/см ² (<i>dyne/cm</i> ²)
	1,3595	г/см ² (<i>g/cm</i> ²)
	13,595	кг/м ² (<i>kg/cm</i> ²)
	2,7845	фунт/дюйм ² (<i>lb/in</i> ²)
Миллимикрон	10	Ангстрем (\AA)
	$10 \cdot 10^{-7}$	см (<i>cm</i>)
Минута	$6,9444 \cdot 10^{-4}$	сутки (<i>day</i>)
	$9,9206 \cdot 10^{-5}$	недели (<i>wk</i>)
Месяц (средне-календарный)	30,4202	сутки (<i>day</i>)
	730,085	ч (<i>hr</i>)
	43,805	мин (<i>min</i>)
	$2,6283 \cdot 10^8$	с (<i>sec</i>)

Продолжение табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Унция, английская	16	драм (<i>dram</i>)
	437,5	г (<i>g</i>)
	0,91146	унция, тройская (<i>oz, troy</i>)
	$3,125 \cdot 10^{-5}$	тонны, короткие (<i>ton, short</i>)
	28,35	г (<i>g</i>)
Унция, жидкостная, США	29,5737	см ³ (<i>cm</i> ³)
	1,8047	дюйм ³ (<i>in</i> ³)
	8	драм (<i>dram</i>)
	0,25	гил (<i>gill</i>)
	0,029573	л (<i>l</i>)
	0,03125	кварта (<i>qt</i>)
Унция, жидкостная, Британская	28,417	см ³ (<i>cm</i> ³)
Шаг (<i>pace</i>)	2,5	фут (<i>ft</i>)
Частей на миллион	0,0584	см ³ (<i>cm</i> ³)
Пек	537,6	дюйм ³ (<i>in</i> ³)
	8,8096	фут (<i>ft</i>)
	16	гран/галлон (<i>grain/gal</i>)
Пинта, сухая	550,61	см ³ (<i>cm</i> ³)
	33,6003	дюйм ³ (<i>in</i> ³)
	0,5506	л (<i>l</i>)
Пинта, жидкостная	473,179	см ³ (<i>cm</i> ³)
	28,875	дюйм ³ (<i>in</i> ³)
	128	драм (<i>dram</i>)
	4	гил (<i>gill</i>)
	0,473168	л (<i>l</i>)
Фунт	256	драм (<i>dram</i>)
	7000	гран (<i>grain</i>)
	453,5924	г (<i>g</i>)
	0,45359	кг (<i>kg</i>)
	1,2153	фунт, тройский (<i>lb, troy</i>)
Фунт/фут	1,48816	кг/м (<i>kg/m</i>)
Фунт/фут ²	$4,7253 \cdot 10^{-4}$	атм (<i>atm</i>)
	$4,7880 \cdot 10^{-4}$	бар (<i>bar</i>)
	478,78	дин/см ² (<i>dyne/cm</i> ²)
	0,48824	г/см ³ (<i>g/cm</i> ³)
	4,8824	кг/м ³ (<i>kg/m</i> ³)
	0,35913	мм рт. ст. (<i>mm Hg</i>) при 0 °C
	$6,9445 \cdot 10^{-3}$	фунт/дюйм ² (<i>lb/in</i> ²)
	0,068046	атм (<i>atm</i>)
Фунт/дюйм ²	70,307	г/см ² (<i>g/cm</i> ²)
	703,07	кг/м ² (<i>kg/m</i> ²)
	51,715	мм рт. ст. (<i>mm Hg</i>) при 0 °C
	27,68	г/см ³ (<i>g/cm</i> ³)
Фунт/фут ³	0,016018	г/см ³ (<i>g/cm</i> ³)
	16,018	кг/м ³ (<i>kg/m</i> ³)
	$5,787 \cdot 10^{-4}$	фунт/дюйм ³ (<i>lb/in</i> ³)
	0,03125	бушель (<i>bushel</i>)

Окончание табл. пересчета различных мер

Величина	Умножить на:	Чтобы получить:
Кварта, жидкостная	1101,23	см ³ (<i>cm</i> ³)
	0,03889	фут ³ (<i>ft</i> ³)
	1,1012	л (<i>l</i>)
	946,358	см ³ (<i>cm</i> ³)
	57,749	дюйм ³ (<i>in</i> ³)
	0,03342	фут ³ (<i>ft</i> ³)
	256	драм (<i>dram</i>)
	8	гил (<i>gill</i>)
Десть (<i>quire</i>)	0,946333	л (<i>l</i>)
	24	листы (<i>sheets</i>)
Род	0,25	чейн (<i>chain</i>)
	16,5	фут (<i>ft</i>)
	0,025	фарлонг (<i>furlong</i>)
	198	дюйм (<i>in</i>)
	25	линия (<i>link</i>)
	5,029216	дюйм (<i>in</i>)
	3,125 · 10 ⁻³	миль (<i>mi</i>)
	0,25	акр (<i>acre</i>)
Руд (четверть акра)	0,01667	минута (<i>min</i>)
Секунда	2,7778 · 10 ⁻⁴	час (<i>hr</i>)
	1,1574 · 10 ⁻⁵	сутки (<i>day</i>)
Слаг (<i>Slug</i>)	32,174	фунт (<i>lb</i>)
	14,594	кг (<i>kg</i>)
	9	дюйм (<i>in</i>)
Спэн	1	м ³ (<i>m</i> ³)
	999,973	л (<i>l</i>)
Стоун	14	фунт (<i>lb</i>)
	6,3503	кг (<i>kg</i>)
	20	центнер короткий, США
Тонна		(<i>cwt</i>)
	907,1846	кг (<i>kg</i>)
	0,89286	тонна, длинная (<i>ton, long</i>)
	22,4	центнер короткий, США
		(<i>cwt</i>)
Тонна, длинная	1016,047	кг (<i>kg</i>)
	1,12	тонна, короткая (<i>ton, short</i>)
	1000	кг (<i>kg</i>)
	2204,82	фунт (<i>lb</i>)
	44,254	фут-фунт/мин (<i>ft-lb/min</i>)
Ватт	1,34 · 10 ⁻³	л.с. (<i>hp</i>)
	3,41304	БЕТ/ч (<i>BTU/hr</i>)
	168	ч (<i>hr</i>)
Неделя	10080	мин (<i>min</i>)
	604800	с (<i>sec</i>)
	91,4402	см (<i>cm</i>)
Ярд	5,68182 · 10 ⁻⁴	миль (<i>mi</i>)
	365,256	сутки (<i>day</i>)
Год	9766,144	ч (<i>hr</i>)

8. Таблицы пересчета величин, используемых в технологии полимеров

Свойство	Типичные единицы, принятые в США	Единицы системы СИ	Коэффициент пересчета
Удельный вес			1,000
Удельный объем	дюйм ³ /фунт (in^3/lb_m)	м ³ /кг	$3,613 \cdot 10^{-5}$
Удлинение	%	%	1,000
Предел прочности*	фунт/дюйм ² (lb_f/in^2)	МПа	$6,895 \cdot 10^{-3}$
Модуль*	фунт/дюйм ² (lb_f/in^2)	МПа	$6,895 \cdot 10^{-3}$
Ударная прочность			
а) по Изоду	фут·фунт/дюйм надреза ($ft \cdot lb/in \text{ notch}$)	Дж/м надреза кДж/м ²	5,423·10
б) по Шарпи	фут·фунт/дюйм ² ($ft \cdot lb/in^2$)	Дж	2,135
в) по <i>FDI, DDI</i>	фут·фунт ($ft \cdot lb$)	Дж	1,356
г) по Гарднеру	фут·фунт ($ft \cdot lb$)	кДж/м ²	$1,113 \cdot 10^{-1}$
д) при растяжении	фут·фунт ($ft \cdot lb$)	°C	2,135
Теплостойкость по Вика	°F		$5/9 (°F - 32)$
Верхний температурный предел работоспособности под нагрузкой (<i>HDTUL</i>)	°F @ 264 фунт/дюйм ² (°F @ 264 <i>psi</i>) °F @ 66 фунт/дюйм ² (°F @ 66 <i>psi</i>)	°C@1,82 МПа °C@0,455 МПа	$5/9 (°F - 32)$ $5/9 (°F - 32)$
Теплопроводность	БЕТ·дюйм/ ч·фут ² ·°F ($BTU \cdot in/h \cdot ft^2 \cdot °F$)	В/м·°C	$1,441 \cdot 10^{-1}$
Удельная теплоемкость	БЕТ/фунт·°F $BTU/lb_m \cdot °F$ дюйм/дюйм·°F $in/in \cdot °F$	Дж/кг·°C	$4,184 \cdot 10^{-1}$
Коэффициент термического расширения		мм/мм·°C	1,796
Вязкость	Пуаз (poise)	Па·с	$1,000 \cdot 10^{-1}$
Динамические механические свойства	дин/см ²	МПа	$1,000 \cdot 10^{-7}$

* Предел прочности и модуль измеряются при растяжении, изгибе, сдвиге или сжатии.

9. Таблицы обозначений, используемых в научных исследованиях

Свойство	Единицы	Обозначения	Полное обозначение единицы
Сила	Ньютон	Н	1 кг·м/с·с
Сида	Дина	Дин	1 г·см/с·с
Давление	Паскаль	Па	1 Н/м·м
Энергия	Джоуль	Дж	1 Н·м
Абсолютная вяз-	Паскаль-секунда	Па·с	1 Н·с/(м·м)
кость	Пуаз	Пуаз	1 г/(см·с)

Другие соотношения единиц

Абсолютная вязкость = Плотность · Кинематическая вязкость

1 текс = 1 г массы на 1000 м

1 денье = 11 грамм массы на 9000 м

1 радиан = 57,30 градусов

1 калория = 4,187 Джоуля

1 Джоуль – 10^7 эрг

1 Ньютон = 10^5 дин

Определения единиц

1. Английские меры определяются, согласно *ASTM*, как «Традиционные единицы, принятые в США».
2. Величина силы «фунт» (*lb*) определяется как сила, необходимая для уравнивания массы в 1 фунт («*pound*») против действия силы тяжести.
3. Килограмм силы кг (*kgf*) определяется как сила, необходимая для уравнивания массы в 1 килограмм против действия силы тяжести.
4. Килограмм массы – это масса международного прототипа килограмма.
5. Ньютон – это сила, которую необходимо приложить к телу массой в 1 килограмм для того, чтобы придать ему ускорение, равное 1 метр в секунду за секунду.
6. Сила = Масса · Ускорение.
7. Вес = Масса · Ускорение свободного падения.
8. $1 \text{ } krai = 10^3 \text{ } pai$; $1 \text{ } Mrai = 10^6 \text{ } pai$; $1 \text{ } pai = 1$ фунт силы/ дюйм² (lb_f / lb^2).
9. Стандартная величина ускорения свободного падения принята равной 9,807 м/с² или 32,17 фут/с².
10. Префиксы означают: Мега (М) – 10^6 ; кило (к) – 10^3 ; микро (μ) – 10^{-6} .

Примеры преобразования величин:

$$(5,04 \text{ дюйм}) = \frac{25,4 \text{ мм}}{1 \text{ дюйм}} = 128 \text{ мм} \quad (9,68 \text{ фут} \cdot \text{фунт}) \frac{0,1383 \text{ кг} \cdot \text{м}}{1 \text{ фут} \cdot \text{фунт}} = 1,34 \text{ кг} \cdot \text{м}$$

	Англ. ед.⇒ СИ	СИ ⇒ Англ. ед.	СИ ⇒Метрич. система
Сила	1фунт-силы = 4,448 Н	1 Н = 0,2248 фунт-силы	1 Н = 0,1020 кГ
Длина	1 дюйм = 25,40 мм	1 мм = 0,03937 дюйма	1 мм = 1 мм
Напряжение	1 фунт/дюйм ² = 6895 Па	1 Па = 1,450·10 ⁻⁴ фунт/дюйм ²	1 Па = 0,1020 кГ/м ²
Скорость	1 дюйм/мин = 25,40 мм/мин	1 мм/мин = 0,3937 дюйм/мин	1 мм/мин = 1 мм/мин
Энергия	1 фут-фунт = 1,356 Дж	1 Дж = 0,7376 фут-фунт	1 Дж = 1 кГ·м
Масса	1 фунт-массы = 0,4536 кг	1 кг = 2,205 фунт-массы	1 кг = 1 кг
Температура	F = K·1.8 – 459,7	K = (F + 459,7)/1,8	K = C + 273,15
Абсолютная вязкость	1 фунт-силы·с/фут ² = 47,87 Па·с	1 Па·с = 0,02089 фунт-силы·с/фут ²	1 Па·с = 10 пуаз
Модуль	1 фунт/дюйм ² = 6895 Па	1 Па = 1,450·10 ⁻⁴ фунт/дюйм ²	1 Па = 0,1020 кГ/м ²
Пластич-ность при-разрушении	1 кдюйм ² √дюйм= 1,099 МПа√м	1 МПа√м= 0,9100 1 кдюйм ² √дюйм	1 МПа√м= 3,226 кГ/мм ^{1,5}
Жесткость	1 фунт-силы/ дюйм = 0,1751 Н/мм	1 Н/мм = 5,710 фунт-силы/ дюйм	1 Н/мм = 0,1020 кГ/мм

	Метрич. система ⇒ СИ	Англ. ед. ⇒ Метрич. система	Метрич. система ⇒ Англ. ед.
Сила	1 кг = 9,807 Н	1 фунт-силы = 0,4536 кг	1 кг = 2,205 фунт-силы
Длина	1 мм = 1 мм	1 дюйм = 25,40 мм	1 мм = 0,03937 дюйма
Напряжение	1 кг/мм ² = 9,807 Па	1 фунт/дюйм ² = 703,2 кг/м ²	1 Па = 1,422·10 ⁻³ фунт/дюйм ²
Скорость	1 мм/мин = 1 мм/мин	1 дюйм/мин = 25,40 мм/мин	1 мм/мин = 0,03937 дюйм/мин
Энергия	1 кг·м = 9,807 Дж	1 фут-фунт = 0,1383 кг·м	1 кг·м = 7,234 фут-фунт
Масса	1 кг = 1 кг	1 фунт-массы = 0,4536 кг	1 кг = 2,205 фунт-массы
Температура	C = K – 273,15	F = C·1,8 +32	C = (F – 32)/1,8
Абсолютная вязкость	1 Пуаз = 0,1 Па·с	1 фунт-силы·с/м ² = 478,6 Пуаз	1 Пуаз = 2,089·10 ⁻³ фунт-силы·с/м ²
Модуль	1 кг/м ² = 9,807 Па	1 фунт/дюйм ² = 703,2 кг/м ²	1 Па = 1,422·10 ⁻³ фунт/дюйм ²
Пластич-ность при разрушении	1 кг/мм ^{1,5} = 0,310 МПа√м	1 кдюйм ² √дюйм= 3,547 кг/мм ^{1,5}	1 кг/мм ^{1,5} = 0,2819 кдюйм ² √дюйм
Жесткость	1 кг/мм = 9,897 Н/мм	1 фунт/дюйм = 0,01786 кг/мм	1 кг/мм = 56,01 фунт/дюйм

10. Сопоставление свойств различных материалов¹

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Кобальт и его сплавы	290 (1999)	26 (179)
Низколегированные, упрочненные, закаленные и отпущенные стали, ковкая	288 (1986)	76 (524)
Нержавеющие, мартенситные и закаленные стали Рений	275 (1896)	60 (414)
Высокопрочные стали, закаленные	270 (1862)	—
Нержавеющие стали, состаренные, ковкие	270 (1862)	170 (1172)
Никель и его сплавы	237 (1634)	105 (724)
Нержавеющая сталь, специальные марки, ковкие, хладостойкая	230 (1586)	10 (69)
Вольфрам	226 (1558)	102 (703)
Молибден и его сплавы	220 (1517)	—
Титан и его сплавы	210 (1448)	82 (565)
Углеродистые стали, ковкие, нормализованные, закаленные	191 (1317)	27 (186)
Сплавы железа, ковкие, закаленные	188 (1296)	58 (400)
Суперсплавы на основе никеля	178 (1227)	62 (427)
Стальные сплавы, литейные, закаленные	172 (1186)	40 (276)
Нержавеющие стали, литейные	170 (1172)	112 (772)
Тантал и его сплавы	165 (1138)	31 (214)
Стальные изделия, термообработанные	168 (1089)	48 (331)
Пластичные зернистые чугуны	154 (1062)	75 (617)
Литейные сплавы на основе меди ^b	150 (1034)	40 (276)
Нержавеющие стали, аустенитные, холоднокатаные, ковкие	140 (965)	9 (62)
Ниобий и сплавы на его основе	140 (965)	75 (517)
Суперсплавы на основе железа, литейные, ковкие	135 (935)	35 (241)
Суперсплавы на основе кобальта	134 (924)	40 (276)
Бронзы ковкие ^b	116 (800)	35 (241)
Конструкционные стали, горячекатаные	114 (786)	14 (97)
Сплавы с высоким содержанием меди, ковкие ^b	110 (758)	90 (621)
Нержавеющие стали, стандартные мартенситные, ковкие, отожженные	110 (758)	9 (92)
Суперсплавы на основе кобальта, литейные	105 (724)	25 (172)
Термообработанные углеродистые конструкционные сплавы, горячекатаные	100 (689)	75 (517)
Гафний	100 (690)	42 (290)
Латуни, ковкие ^b	96 (662)	32 (221)
Алюминиевые сплавы, серия 7000	92,5 (638)	10 (69)
Стальные сплавы, литейные, нормализованные и отожженные	91 (627)	14 (97)
Сплавы медь–никель–цинк, ковкие ^b	91 (627)	38 (262)
Медно-никелевые сплавы, ковкие ^b	90 (620)	18 (124)
Ковкие стали, перлитовые, литейные	85 (586)	13 (90)
	80 (552)	45 (310)

^a При деформации 0,2% для металлов, если иное не оговорено; предел прочности для пласт-масс — по *ASTM D 638*.

^b При деформации 0,5%.

¹ Номенклатура названий, в особенности относящихся к металлам, не совпадает с принятой в России. При переводе сохранены обозначения материалов, используемые автором. — *Примеч. науч. ред.*

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Высокопрочные, низколегированные стали, ковкие, после прокатки	80 (552)	42 (290)
Нержавеющие стали, специальные марки, ковкие, отожженные	80 (552)	27 (186)
Нержавеющие стали, ферритовые марки, ковкие, холоднокатанные	80 (552)	45 (310)
Углеродистые стали, ковкие, науглероженная закаленные и отожженные	77 (531)	46 (317)
Углеродистые стали, литые, закаленные и отожженные	75 (531)	–
Изделия из нержавеющей стали 410, термообработанные	75 (715)	–
Стальные изделия, сразу после литья	75 (517)	30 (207)
Медь, ковкая ^b	72 (496)	10 (69)
Алюминиевые сплавы, серия 2000	66 (455)	10 (69)
Ковкие зернистые аустенитные чугуны	65 (448)	28 (193)
Цинк, литейный сплав	64 (441)	30 (207)
Цинковые сплавы, ковкие	61 (421)	23 (159)
Нержавеющая сталь, ферритовая, ковкая, отожженная	60 (414)	35 (241)
Алюминиевые сплавы, серия 5000	59 (407)	6 (41)
Алюминиевые сплавы, серия 6000	59 (379)	7 (48)
Алюминиевые литые сплавы	55 (379)	8 (55)
Углеродистая сталь, литая, нормализованная и отожженная	55 (379)	48 (331)
Нержавеющая сталь, аустенитная, ковкая, отожженная	55 (379)	30 (207)
Изделия из нержавеющей стали, сразу после литья	54 (372)	40 (276)
Редкоземельные элементы	53 (365)	9,5 (66)
Цирконий и его сплавы	53 (365)	15 (103)
Обедненный уран	50 (343)	35 (241)
Алюминиевые сплавы, серия 4000	46 (317)	–
Торий	45 (310)	26 (179)
Магниеые сплавы, литые	44 (303)	13 (90)
Серебро	44 (303)	8 (55)
Углеродистая сталь, литая, нормализованная	42 (290)	38 (262)
Бериллий и его сплавы	40 (276)	5 (34)
Алюминиевые сплавы, серия 3000	36 (248)	6 (41)
Углеродистая сталь, литая, отожженная	35 (241)	–
Ковкое ферритовое литое железо	35 (241)	32 (221)
Палладий	30 (207)	5 (34)
Золото	30 (207)	–
Магниеые сплавы, литые	30 (207)	12 (83)
Полиимиды армированные	28 (193)	5 (34)
Платина	27 (186)	2 (14)
Изделия из стали, сразу после литья	26 (179)	11 (76)
Алюминиевые сплавы, серия 1000	24 (165)	4 (28)
Полифениленсульфид с 40% стекловолокна	21 (145)	–
Полисульфон с 30–40% стекловолокна	19 (131)	17 (117)
Полиацетали, сополимеры, с 25% стекловолокна	18,5 (128)	–
Сополимер стирола с акрилонитрилом с 30% стекловолокна	18 (124)	–
Смолы на основе фениленоксида с 20–30% стекловолокна	17 (117)	14,5 (100)
Полиамидимиды	17 (117)	13,3 (92)
Полистирол с 30% стекловолокна	14 (97)	–
Цинк, литые сплавы	14 (96)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полиимид, неармированный	13 (90)	7,5 (52)
Полиамиды общего назначения	12,6 (87)	7,1 (49)
Полиэфирсульфон	12,2 (84)	—
Полифениленсульфид, неармированный	11 (76)	—
Полисульфид, неармированный	10,2 (70)	—
Полиацетали, гомополимеры, неармированные	10 (69)	—
Полиамиды с минеральным наполнителем	10 (69)	9 (62)
Полипропилен, армированный стекловолокном	10 (69)	6 (41)
Полистирол общего назначения	10 (69)	5,0 (34)
Смолы на основе фениленоксида, неармированные	9,6 (66)	7,8 (54)
Полиацетали, сополимеры, неармированные	8,8 (61)	—
Смесь АБС-пластика и поликарбоната	8,0 (55)	—
Свинец и его сплавы	8 (55)	1,6 (11)
Полиарилсульфон	8 (55)	—
Смесь АБС-пластика с полисульфидом (полифрилэфиром)	7,5 (52)	—
Смесь полиакрилатов с поливинилхлоридом	7,0 (48)	6,5 (45)
Олово и его сплавы	6,6 (45)	1,3 (7)
Смесь АБС-пластика с жестким поливинилхлоридом	6,0 (41)	—
Полистирол, ударопрочный	6,0 (41)	2,8 (19)
Полипропилен общего назначения	5,2 (36)	4,8 (33)
Смесь АБС-пластика с полиуретаном	4,5 (31)	3,7 (24)
Полипропилен, ударопрочный	4,3 (30)	2,8 (19)

Удельная прочность^а, 10³ джоуля (10³ м)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Эпоксидная смола с 50–60 %об. графитовых волокон	3645 (92)	98 (2,5)
Эпоксидная смола с 55 %об. борных волокон	2828 (72)	177 (4,5)
Полиэфирная терморезистивная смола — пултрузия	1429 (36)	345 (8,8)
Титан и его сплавы	1043 (26,5)	171 (4,3)
Нержавеющая сталь, мартенситная, ковкая, термообработанная	982 (24,9)	214 (5,44)
Ультрарочная сталь, ковкая, термообработанная	954 (24,2)	601 (15,3)
Алюминиевые сплавы, серия 7000	892 (22,6)	144 (3,6)
Кобальт и его сплавы	878 (22,3)	89 (2,3)
Нержавеющая сталь, состаренная, ковкая	842 (21,4)	373 (9,47)
Никель и его сплавы	687 (18,5)	36 (0,9)
Марганец и сплавы на его основе, ковкие	667 (17,0)	268 (6,8)
Углеродистая сталь, ковкая, нормализованная, закаленная и отожженная	665 (16,9)	205 (5,21)
Алюминиевые сплавы, серия 2000	647 (16,4)	101 (2,6)
Сополимеры винилиденфторида, ориентированные	645 (16)	242 (6,1)
Алюминиевые сплавы, серия 5000	602 (15,3)	62 (1,6)
Сплавы на основе стали, литейные; закаленные и отожженные	600 (15,2)	396 (10,1)
Пластичное (зернистое) железо, литейное	592 (15,0)	158 (4,01)

^а Удельная прочность определяется как предел прочности для металлов или предельное напряжение при разрыве для неметаллов, поделенное на плотность.

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Алюминиевые сплавы, серия 6000	561 (14,2)	72 (1,8)
Алюминиевые литейные сплавы	539 (13,7)	86 (2,2)
Бериллий и его сплавы	533 (13,5)	75 (1,9)
Полиамиды, армированные 30% стекловолокна	521 (13,1)	396 (10)
Суперсплавы на основе никеля	518 (13)	143 (3,6)
Металлокерамика на основе карбида титана	515 (13)	–
Нержавеющая сталь, аустенитная, ковкая, холоднокатаная	495 (12,6)	265 (6,73)
Алюминиевые сплавы, серия 4000	474 (12,0)	–
Термопластичный полиэфир – полиэтилентерефталат с 30 и 45% стекловолокна	459 (11,7)	288 (7,3)
Суперсплав на основе железа, литейной, ковкий	457 (11,6)	137 (3,48)
Сплавы на основе марганца, литейные	456 (11,6)	185 (4,7)
Литейные сплавы на основе меди	433 (11,0)	33 (0,84)
Молибден и его сплавы	420 (10,7)	221 (5,6)
Поликарбонат, армированный 20 и 40% стекловолокна	418 (11)	327 (8,3)
Ниобий и его сплавы	394 (10,0)	115 (2,9)
Нержавеющая сталь, мартенситная, ковкая, отожженная	375 (9,53)	89 (2,26)
Сополимер стирола с акрилонитрилом с 30% стекловолокна	367 (9,3)	–
Алюминиевые сплавы, серия 3000	363 (9,22)	61 (1,5)
Бронзы, ковкие	355 (9,0)	54 (1,4)
Рений	355 (9,0)	–
Суперсплавы на основе кобальта	351 (8,9)	116 (2,9)
Пенопласты, жесткие, с интегральной оболочкой, армированные	351 (8,9)	105 (2,7)
Сплавы с высоким содержанием меди, ковкие	341 (8,7)	30 (0,76)
Термопластичный полиэфир – полибутилентерефталат с 15 и 40% стекловолокна	328 (8,3)	245 (6,2)
Стальные сплавы, нормализованные и отожженные	322 (8,18)	134 (3,40)
Полиацетали, сополимеры, армированные 25% стекловолокна	319 (8,1)	–
Пенопласты, жесткие, с интегральной оболочкой, неармированные	319 (8,1)	48 (1,2)
Вольфрам	314 (7,9)	–
Сополимер стирола с акрилонитрилом, неармированный	312 (7,9)	247 (6,3)
Полиамиды, неармированные	307 (7,8)	173 (4,4)
Латуни, ковкие	300 (7,6)	34 (0,86)
Ковкий перлитовый чугун	300 (7,6)	169 (4,29)
Полистирол с 30% стекловолокна	298 (7,6)	–
Нержавеющая сталь, ферритовая, ковкая, холоднокатаная	291 (7,39)	164 (4,17)
Сплав меди, никеля и цинка, ковкий	285 (7,2)	57 (1,4)
Углеродистая сталь, науглероженная, ковкая, закаленная и отожженная	272 (6,91)	163 (4,14)
Полиэфир термопластичный – смесь полиэтилентерефталата и полибутилентерефталата с 15 и 30% стекловолокна	267 (6,8)	231 (5,9)
Углеродистая сталь, литейная, закаленная и отожженная	265 (6,73)	–
Полиарилсульфон	267 (6,7)	–
Медно-никелевый сплав, ковкий	263 (6,7)	41 (1,0)
Полистирол общего назначения	263 (6,7)	132 (3,4)
Тантал и его сплавы	263 (6,7)	5 (0,13)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Отливки из полиакрилатов	253 (6,4)	133 (3,4)
Карбид бора	247 (6,3)	–
Смолы на основе полифениленоксида, неармированные	246 (6,2)	200 (5,1)
Алюминиевые сплавы, серия 1000	245 (6,2)	41 (1,04)
Пластичный зернистый аустенитный чугун	238 (6,05)	102 (2,59)
Металлокерамика на основе карбида вольфрама	236 (6)	–
Литьевые полиакрилаты	235 (6,0)	141 (3,6)
Полиакрилаты, ненаполненные	233 (5,9)	–
Кремнийорганические смолы	224 (5,7)	–
Медь, ковкая	223 (5,7)	31 (0,8)
Цирконий и сплавы на его основе	221 (5,6)	64 (1,62)
Поликарбонат, неармированный	218 (5,5)	193 (1,9)
Нержавеющая сталь, ферритовая, ковкая, отоженная	218 (5,54)	127 (3,23)
Металлокерамика на основе окиси алюминия	214 (5,4)	–
Полифениленсульфид, неармированный	208 (5,3)	–
Гафний	204 (5,2)	68 (1,72)
Пластмассы на основе полиуретана	198 (5,0)	106 (2,7)
Этилцеллюлоза	195 (5,0)	7,3 (1,9)
Углеродистая сталь, литьевая, нормализованная и отоженная	194 (4,2)	170 (4,32)
Нержавеющая сталь, аустенитная, ковкая, отоженная	194 (4,93)	106 (2,69)
Полиацеталь, гомополимер	192 (4,9)	–
Смесь АБС-пластика и поликарбоната	191 (4,9)	–
Термопластичный полиэфир – полибутилентерефталат с 35 и 45% стекла и минерального наполнителя	187 (4,75)	170 (4,3)
Полиарилэфир	183 (4,6)	–
Фторполимеры – сополимеры этилена с тетрафтор- и хлортрифторэтиленом, армированные стекловолокном	179 (4,5)	–
Ацетат целлюлозы	174 (4,4)	65 (1,7)
Полиацетали, сополимеры	173 (4,4)	–
Карбид кремния	172 (4,4)	–
Полипропилен общего назначения	169 (4,3)	148 (3,8)
Хлорированный поливинилхлорид	162 (4,1)	135 (3,4)
Термопластичный полиэфир – полибутилентерефталат с 10 и 30% минерального наполнителя	161 (4,1)	145 (3,6)
Нитрат целлюлозы	160 (4,1)	140 (3,6)
Поливинилхлорид, сополимер винилхлорида с винилацетатом, жесткие	160 (4,1)	110 (2,8)
Ацетат-бутират целлюлозы	160 (4,1)	70 (1,8)
Высокомолекулярные полиэтилены	159 (4,0)	–
Полистирол, ударопрочный	156 (4,0)	86 (2,2)
Полиацеталь, гомополимер, армированный 20% стекловолокна	152 (3,9)	–
Мулит	151 (3,8)	–
Ацетат пропионат целлюлозы	149 (3,8)	92 (2,3)
Редкие земли	149 (3,8)	88 (2,2)
Углеродистая сталь, литьевая, нормализованная	148 (3,8)	134 (3,40)
Нитрид кремния	148 (3,80)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Оксид магния	147 (3,7)	–
Смесь АБС-пластика с поливинилхлоридом	143 (3,6)	62 (1,6)
Оксид бериллия	139 (3,5)	–
Смесь полиакрилата с поливинилхлоридом	137 (3,5)	116 (2,9)
Натуральный каучук	136 (3,5)	–
Поливинилиденфторид	134 (3,4)	113 (2,9)
Ковкий чугун, ферритовый	134 (3,40)	123 (3,12)
Полиметилпентен	134 (3,4)	–
Полиизопрен, синтетический	132 (3,4)	–
Сополимер винилиденхлорида, неориентированный	129 (3,3)	65 (1,7)
Полиэтилен высокой плотности	128 (3,3)	84 (2,1)
Аллилдигликолькарбонат	125 (3,2)	104 (2,6)
Полиуретаны	125 (3,2)	–
Нитрильный каучук	124,7 (3,2)	–
Углеродистая сталь, литевая, отожженная	124 (3,15)	–
Металлокерамика на основе карбида хрома	124 (3,1)	–
Сополимер этилена с пропиленом	121 (3,1)	–
Иономер	118 (3,0)	–
Серебро	116 (3,0)	–
Термоэластопласты	112,5 (2,9)	–
Нитрид бора	112 (2,8)	–
Полипропилен, ударопрочный	108 (2,7)	92 (2,3)
Торий	107 (2,7)	–
Тройной сополимер этилена, пропилена и диена	107 (2,7)	–
Двуокись кремния	104 (2,7)	–
Сополимер этилена с бутеном	103 (2,6)	–
Бутадиен-стирольный каучук	102,9 (2,6)	–
Сополимер изобутилена с изопреном	100 (2,5)	–
Форстерит	95 (2,4)	–
Полисульфид	94 (2,4)	–
Хлоропеновый каучук	89 (2,3)	–
Полибутадиен	88 (2,2)	–
Кордиерит	87 (2,2)	–
Оксид циркония	86 (2,2)	–
Хлорированный полиэтилен	83 (2,1)	–
Сополимер этилена с винацетатом	82 (2,1)	41 (1,0)
Политетрафторэтилен	82 (2,1)	32 (0,8)
Полибутилен, гомополимер	75 (1,9)	67 (1,7)
Полиэтилен низкой плотности	75 (1,9)	27 (0,7)
Фторполимеры – сополимеры этилена с тетрафтор- и хлор-трифторэтиленом, неармированные	74 (1,9)	65 (1,7)
Полихлортрифторэтилен	74 (1,9)	60 (1,5)
Обедненный уран	73 (1,85)	51,2 (1,3)
Полиэтилен средней плотности	71 (1,8)	59 (1,5)
Сополимер этилена с этилакрилатом	71 (1,8)	47 (1,2)
Палладий	69,1 (1,75)	11,5 (0,292)
Полибутилены, сополимеры	68 (1,7)	–
Горшечный камень	68 (1,7)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полиакрилаты	62,5 (1,6)	—
Эпихлоргидрин	60 (1,5)	—
Хлорсульфированный полиэтилен	58 (1,5)	—
Оксид циркония	58 (1,5)	—
Полифтораклокси	55 (1,4)	—
Полипропиленоксид	54,1 (1,4)	—
Перфтор(этилен-пропилен)	45 (1,1)	32 (0,8)
Фторуглерод	43 (1,1)	—
Золото	42 (1,07)	—
Платина	34,8 (0,88)	2,58 (0,065)
Олово и его сплавы	23 (0,6)	5 (0,13)
Свинец и его сплавы	20 (0,51)	4 (0,1)

Модуль упругости при растяжении, 10^4 фунт/дюйм² (10^{-4} МПа)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Карбид кремния	95 (65,5)	13 (8,96)
Металлокерамика на основе карбида вольфрама	94,8 (65)	61,6 (42,5)
Карбид вольфрама	94 (64,8)	65 (44,8)
Осмий	80 (55,1)	—
Иридий	79 (54,5)	—
Бориды титана, циркония, гафния	73 (50,3)	71 (48,95)
Рутений	68 (46,9)	—
Рений	68 (46,9)	—
Карбид бора	65 (44,8)	42 (28,96)
Бор	64 (44,1)	—
Вольфрам	59,0 (40,6)	—
Оксид бериллия	58 (39,9)	39 (26,9)
Металлокерамика на основе карбида титана	57 (39,3)	42 (31,7)
Родий	55 (37,9)	—
Карбид титана	55 (37,9)	36 (24,8)
Молибден и его сплавы	53 (36,5)	46 (31,7)
Карбид тантала	53 (36,5)	—
Оксид магния	50 (34,5)	35 (24,1)
Металлокерамика на основе алюминия	50 (34,5)	30 (20,7)
Карбид ниобия	49 (33,8)	—
Карбид бериллия	46 (31,7)	30 (20,7)
Хром	42 (28,9)	—
Бериллий и его сплавы	42 (28,9)	27,0 (18,6)
Эпоксидные композиции армированные углеродными волокнами	40 (27,6)	20 (13,4)
Суперсплавы на основе кобальта	36 (24,8)	29,0 (19,9)
Оксид циркония	35 (24,1)	23 (15,8)
Никель и его сплавы	34 (23,4)	19,0 (13,1)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Кобальт и его сплавы	33,6 (23,1)	30,0 (20,7)
Суперсплавы на основе никеля	33,5 (23,1)	18,3 (12,6)
Суперсплавы на основе ковкого чугуна	31 (21,4)	28 (19,3)
Нитрид кремния	31 (21,4)	9 (6,2)
Литьевые стальные сплавы	30 (20,7)	29 (20)
Эпоксидные композиции, армированные волокнами бора	30 (20,7)	–
Углеродистые стали, литьевые	30 (20,7)	–
Углеродистые стали, науглероженные, ковкие	30 (20,7)	29 (20)
Углеродистые стали, упрочненные, ковкие	30 (20,7)	29 (20)
Обедненный уран	30 (20,7)	20 (13,8)
Нержавеющие стали, упрочненные, состаренные, ковкие	30 (20,7)	28 (19,3)
Нержавеющие стали, специальные марки, ковкие	30 (20,7)	27 (18,6)
Сверхвысокопрочные стали, ковкие	30 (20,7)	27 (18,6)
Нержавеющие стали, литьевые	29 (20)	24 (16,5)
Нержавеющие стали, аустенитные, ковкие	29 (20)	28 (19,3)
Нержавеющие стали, ферритовые, ковкие	29 (20)	–
Нержавеющие стали, мартенситные, ковкие	29 (20)	–
Композиции на основе бора и алюминия	28 (19,3)	–
Литьевые чугуны, перлитовые	28 (19,3)	26 (17,9)
Тантал и его сплавы	27 (18,6)	21,0 (14,4)
Пластичный (зернистый) чугун	25 (17,2)	22 (15,2)
Литьевые чугуны, ферритовые	25 (17,2)	–
Платина	25 (17,2)	–
Серый чугун, литейной	24 (16,5)	9,6 (6,62)
Медно-никелевые сплавы, ковкие	22 (15,1)	18,0 (12,4)
Миллит	21 (14,5)	–
Циркон	21 (14,5)	–
Литьевые чугуны, аустенитные	20 (13,8)	13 (8,96)
Гафний	20 (13,8)	–
Медные литьевые сплавы	19,3 (13,3)	11,0 (7,6)
Ванадий	19 (13,1)	18 (12,4)
Сплавы с высоким содержанием меди, ковкие	19 (13,1)	17,0 (11,7)
Меди, ковкие	18,7 (12,9)	17,0 (11,7)
Титан и его сплавы	18,5 (12,7)	11,0 (7,6)
Сплавы меди, никеля и цинка, ковкие	18,0 (12,4)	18,0 (12,4)
Палладий	18,0 (12,4)	–
Латунь, ковкие	18,0 (12,4)	15,0 (10,3)
Бронзы, ковкие	17,5 (12,0)	16,0 (11,0)
Поликристаллические стекла	17,3 (11,9)	12,5 (8,6)
Ниобий и его сплавы	16,0 (11,0)	11,5 (7,9)
Кремний	15,5 (10,7)	–
Цирконий и его сплавы	14,0 (9,6)	13,8 (9,5)
Сплавы на основе цинка, ковкие	14,0 (9,6)	6,2 (4,3)
Редкие земли	12,2 (8,4)	2,2 (1,5)
Золото	12,0 (8,2)	–
Алюминиевые сплавы, серия 4000	11,4 (7,9)	–
Серебро	11,0 (7,6)	–
Нитрид бора	11 (7,6)	7 (4,8)
Алюминиевые сплавы, серия 2000	10,8 (7,4)	10,2 (7,0)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Оксид кремния	10,5 (7,24)	–
Алюминиевые сплавы, серия 7000	10,4 (7,2)	10,3 (7,1)
Алюминиевые сплавы, серия 5000	10,3 (7,1)	10,0 (6,9)
Торий	10,3 (7,1)	–
Алюминиевые сплавы, серия 1000	10,0 (6,9)	10,0 (6,9)
Алюминиевые сплавы, серия 3000	10,0 (6,9)	10,0 (6,9)
Алюминиевые сплавы, серия 6000	10,0 (6,9)	10,0 (6,9)
Торий	10,0 (6,9)	–
Олово и его сплавы	7,7 (5,3)	6,0 (4,1)
Кордиерит	7 (4,8)	–
Сплавы магния, ковкие	6,5 (4,5)	6,0 (4,1)
Сплавы магния, литевые	6,5 (4,5)	6,5 (4,5)
Полиэфир, термореактивный, общего назначения, пултрузия	6,0 (4,14)	2,3 (1,59)
Стеклоламинаты с эпоксидным связующим	5,8 (4,0)	3,3 (2,28)
Эпоксидные композиты, армированные стекловолокном	5 (3,44)	–
Висмут	4,6 (3,17)	–
Полиимиды, армированные стекловолокном	4,5 (3,1)	–
Графитизированный углерод	4,0 (2,75)	0,6 (0,41)
Пиролитический графит	4,0 (2,75)	–
Фенольные смолы	3,3 (2,8)	0,35 (0,24)
Алкидные смолы	2,9 (2,0)	1,9 (1,35)
Перекристаллизованный графит	2,7–1,5 (1,86 – 1,03)	0,85–0,8 (0,59 – 0,55)
Кожура ореха	2,2 (1,51)	–
Акация	2,1 (1,44)	–
Литевые чугуны, ферритовые	2,1 (1,45)	1,3 (0,90)
Береза	2,0 (1,37)	–
Пихта	2,0 (1,37)	–
Свинец и его сплавы	2,0 (1,37)	–
Сосна	2,0 (1,37)	1,3 (0,89)
Полиэфир, термореактивный, отливки армированные	2,0 (1,37)	1,1 (0,83)
Зола (белая)	1,8 (1,24)	–
Графит	1,8 (1,24)	0,5 (0,34)
Клен	1,8 (1,24)	–
Дуб	1,8 (1,24)	–
Сополимер стирола с акрилонитрилом, армированный 30% стекловолокна	1,8 (1,24)	–
Бук	1,7 (1,17)	–
Углерод, армированный волокнистым графитом	1,8 (1,24)	0,3 (0,2)
Графит, премиум	1,7 (1,17)	0,7 (0,48)
Ореховое дерево	1,7 (1,17)	–
Поликарбонат с 40% стекла	1,7 (1,17)	0,86 (0,59)
Ель	1,6 (1,10)	–
Тополь (желтый)	1,6 (1,10)	–
Углерод из нефтяного кокса	1,6 (1,10)	2,3 (1,58)
Индий	1,57 (1,08)	–
Липа (американская)	1,5 (1,03)	–
Вяз	1,5 (1,03)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полисульфон, армированный 30–40% стекла	1,5 (1,03)	1,1 (0,76)
Кипарис	1,4 (0,96)	–
Полиамиды с 30% стекла	1,4 (0,96)	1,0 (0,69)
Полиэфир термопластичный, полибутилентерефталат с 15 и 40% стекла	1,4 (0,96)	0,8 (0,55)
Кедр (из Порт Орфорд)	1,3 (0,89)	–
Хлопок	1,3 (0,89)	–
Смола на основе фениленоксида, армированная 20–30% стекла	1,3 (0,89)	0,93 (0,64)
Красное дерево	1,3 (0,89)	–
Полиацеталь, сополимер, армированный 25% стекла	1,25 (0,86)	–
Углерод из антрацита	1,2 (0,82)	0,6 (0,41)
Диаллилфталат, армированный	1,2 (0,82)	0,6 (0,41)
Пихта бальзамическая	1,2 (0,82)	–
Тсуга (американская ель)	1,2 (0,82)	1,5 (1,03)
Сосна (восточная, белая)	1,2 (0,82)	–
Полибутадиены	1,2 (0,82)	0,4 (0,28)
Полистирол с 30% стекла	1,2 (0,82)	–
Полифениленсульфид, армированный 40% стекла	1,12 (0,77)	–
Сополимеры этилен с тетрафторэтиленом и этилена с хлортрифторэтиленом, армированные стеклом	1,1 (0,76)	–
Меламиновые смолы с целлюлозным наполнителем для электротехники	1,1 (0,76)	1,0 (0,69)
Кедр (восточный, красный)	0,9 (0,62)	–
Полиимиды, неармированные	0,70 (0,48)	0,45 (0,31)
Полиэфиры, термореактивные, литые, жесткие	0,65 (0,45)	0,15 (0,10)
Полиацеталь, гомополимер, неармированный	0,52 (0,36)	–
Полиакрилаты, литые, общего назначения	0,50 (0,34)	0,35 (0,24)
Полиакрилат, отливки	0,50 (0,34)	0,23 (0,16)
Полиамиды с минеральным наполнителем	0,50 (0,34)	–
Полистирол общего назначения	0,50 (0,34)	0,46 (0,32)
Сополимер стирола с акрилонитрилом, неармированный	0,50 (0,34)	0,40 (0,28)
Полиамиды общего назначения	0,48 (0,33)	0,28 (0,19)
Полифениленсульфид, неармированный	0,48 (0,33)	–
Полистирол, ударопрочный	0,47 (0,32)	0,15 (0,10)
Эпоксидные смолы, литые	0,45 (0,31)	0,05 (0,03)
Поликарбонат, неармированный	0,45 (0,31)	0,34 (0,23)
АБС-пластик	0,42 (0,29)	0,29 (0,26)
Полиацетали, сополимеры, неармированные	0,41 (0,28)	–
Смолы на основе фениленоксида, неармированные	0,38 (0,26)	0,36 (0,25)
Смесь АБС-пластика с поликарбонатом	0,37 (0,26)	–
Смеси полиакрилатов с поливинилхлоридом	0,37 (0,26)	0,34 (0,23)
Полиарилсульфон	0,37 (0,26)	–
Полисульфон неармированный	0,36 (0,25)	–
Полиэфирсульфон	0,35 (0,24)	–
Смесь АБС-пластика с жестким поливинилхлоридом	0,33 (0,23)	–
Смесь АБС-пластика с полиарилсульфоном	0,32 (0,22)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Аллилдигликолькарбонат	0,30 (0,21)	—
Полихлортрифторэтилен	0,30 (0,21)	0,19 (0,13)
Сополимеры этилен с тетрафторэтиленом и этилена с хлортрифторэтиленом, неармированные	0,24 (0,17)	—
Смесь АБС-пластика с полиуретаном	0,22 (0,15)	0,16 (0,11)
Полипропилен общего назначения	0,22 (0,15)	0,16 (0,11)
Полиметилпентен	0,21 (0,14)	—
Поливинилиденфторид	0,2 (0,14)	0,17 (0,12)
Сополимеры винилиденфторида, ориентированные	0,10 (0,138)	—
Полипропилен, ударопрочный	0,13 (0,09)	—
Высокомолекулярный полиэтилен	0,1 (0,069)	—
Сополимер перфторэтилена и пропилена	0,07 (0,05)	0,05 (0,03)
Политетрафторэтилен	0,07 (0,05)	0,04 (0,03)
Сополимеры винилиденфторида, неориентированные	0,07 (0,05)	—
Полибутилен, гомополимер	0,036 (0,025)	0,034 (0,023)
Полибутилен, сополимеры	0,034 (0,023)	0,012 (0,008)
Полиакрилат, ненаполненный	0,029 (0,020)	—
Полиэтилен низкой плотности	0,027 (0,019)	0,020 (0,014)
Поливинилхлорид, сополимеры винилхлорида с винилацетатом — нежесткие	0,003 (0,0021)	0,0004 (0,00027)

Удельная жесткость 10⁴ дюйм (10⁵ м)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Карбид кремний	819 (208)	—
Бор	792 (201)	—
Карбид бора	714 (181)	—
Эпоксидные композиции армированные углеродными волокнами	701 (178)	351 (89)
Бериллий и сплавы на его основе	560 (142)	403 (102)
Оксид бериллия	537 (136)	—
Ниобий и сплавы на его основе	466,4 (118,4)	377,0 (95,7)
Эпоксидная композиции, армированная волокнами бора	410 (104)	—
Оксид магния	388 (99)	—
Карбид бериллия	357 (91)	—
Металлокерамика на основе окиси алюминия	357 (91)	—
Бороалюминиевые композиты	280 (71)	—
Нитрид кремния	270 (69)	—
Металлокерамика на основе карбида титана	219 (56)	—
Кремний	184 (47)	—
Стекло, поликристаллическое	184 (57)	—
Муллит	176 (45)	—

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Карбид ниобия	173 (44)	—
Золото	171,9 (43,6)	—
Металлокерамика на основе карбида вольфрама	171 (43)	—
Хром	162 (41,1)	—
Бориды титана, циркония и гафния	159 (40)	—
Рутений	154,2 (39,2)	—
Карбид вольфрама	152 (39)	—
Оксид циркония	150 (38)	—
Нитрид бора	138 (35)	—
Молибден и его сплавы	124,3 (31,5)	106 (26,9)
Сплавы марганца, ковкие	123,7 (31,5)	985 (25,1)
Родий	123 (31,2)	—
Алюминиевые сплавы, серия 4000	117,5 (29,8)	—
Суперсплавы на основе кобальта	109,1 (27,7)	96,6 (24,5)
Оксид кремния	109 (28)	—
Нержавеющая сталь, упрочненная старением, ковкая	107 (27,2)	99 (25,1)
Алюминиевые сплавы, серия 7000	106,2 (27,0)	101,9 (25,8)
Стальные сплавы, литые	106 (26,9)	102 (25,9)
Углеродистые стали, науглероженные, ковкие	106 (26,9)	102 (25,9)
Углеродистые стали, литые	106 (26,9)	—
Углеродистые стали, упрочненные, ковкие	106 (26,9)	103 (26,2)
Суперсплавы на основе ковкого чугуна	106 (26,9)	96 (24,4)
Сверхвысокопрочные стали, ковкие	106 (26,9)	95 (24,1)
Алюминиевые сплавы, серия 2000	105,8 (26,8)	103 (26,2)
Алюминиевые сплавы, серия 5000	105,2 (26,7)	105,1 (26,6)
Литые чугуны, перлитные	105 (26,7)	98 (24,9)
Нержавеющие стали, ферритовые, ковкие	105 (26,7)	—
Суперсплавы на основе никеля	104 (26,4)	65,3 (16,6)
Нержавеющие стали, мартенситные, ковкие	104 (26,4)	—
Алюминиевые сплавы, серия 6000	103,1 (26,2)	102,0 (25,9)
Кобальт и его сплавы	103,1 (26,2)	101,8 (25,8)
Алюминиевые сплавы, серия 1000	102,0 (25,9)	—
Алюминиевые сплавы, серия 3000	102,0 (25,9)	101,0 (25,6)
Никель и его сплавы	101,8 (25,8)	67,4 (17,1)
Титан и его сплавы	101,1 (25,7)	69,6 (17,7)
Сплавы на основе марганца, литые	100 (25,4)	98,5 (25,1)
Пластичный (зернистый) чугун	198 (24,9)	87 (22,1)
Карбид тантала	98 (24,9)	—
Осмий	97,6 (24,8)	—
Иридий	97,1 (24,7)	—
Оксид циркония	97 (24,7)	—
Литые чугуны, ферритовые	96 (24,4)	—
Серый чугун, литой	92 (23,4)	37 (9,4)
Рений	89,4 (31,6)	—
Ванадий	85,9 (21,8)	81,4 (20,6)
Вольфрам	84,3 (21,4)	—
Кордиерит	78 (20)	—
Литые чугуны, аустенитные	73 (18,5)	48 (12,2)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Эпоксидные композиции, армированные стекловолокнами	67 (17)	–
Бронзы, ковкие	61,5 (15,6)	54,5 (13,8)
Сплавы на основе меди, литые	69,7 (15,1)	40,8 (10,3)
Сплавы с высоким содержанием меди, ковкие	58,8 (14,9)	57,0 (14,4)
Цирконий и его сплавы	58,7 (14,9)	58,3 (14,8)
Латуни, ковкие	58,4 (14,8)	50,6 (12,8)
Медь, ковкая	57,8 (14,7)	52,9 (13,4)
Сплав меди, никеля и цинка, ковкий	57,3 (14,5)	56,9 (14,4)
Медно-никелевый сплав, ковкий	56,0 (14,2)	55,7 (14,1)
Свинец и его сплавы	48,7 (12,3)	–
Тантал и его сплавы	45,0 (11,4)	34,7 (8,8)
Обедненный уран	43,9 (11,1)	29,3 (7,44)
Гафний	42,5 (10,8)	–
Палладий	41,4 (10,5)	–
Сополимер стирола с акрилонитрилом, армированный 30% стекловолокна	37 (9,4)	–
Полиэфир термопластичный, полиэтилентерефталат с 30 и 45% стекла	34,4 (8,7)	23,2 (5,9)
Редкие земли	34,4 (8,7)	20,3 (5,15)
Полиэфир термореактивный, армированный, литые марки	34 (8,6)	20 (5,1)
Платина	32,2 (8,17)	–
Поликарбонат, армированный 20 и 40% стекла	31,0 (7,9)	17,6 (4,5)
Полиамиды, армированные 30% стекла	29 (7,4)	21 (5,3)
Серебро	29,0 (7,3)	–
Смолы на основе фениленоксида с 20–30% стекловолокна	28 (7,1)	21 (5,3)
Полисulfон, армированный 30–40% стекла	28 (7,1)	21 (5,3)
Олово и его сплавы	26,6 (6,7)	22,9 (5,8)
Полистирол, армированный 30% стекла	26 (6,6)	–
Полиэфир термопластичный, полибутилентерефталат с 15 и 40% стекла	34,1 (6,1)	15,7 (4,0)
Торий	24,4 (6,2)	–
Полиацетали, сополимеры, армированные 25% стекла	22 (5,6)	–
Полифениленсульфид с 40% стекла	19 (4,8)	–
Фторполимеры — сополимеры этилена с тетрафтор- и хлортрифторэтиленом, армированные стекловолокном	16,4 (4,2)	–
Полиимиды, неармированные	13,5 (3,4)	8,7 (2,2)
Полистирол общего назначения	13 (3,3)	12 (3,0)
Сополимер стирола с акрилонитрилом	13 (3,3)	10,4 (2,6)
Висмут	12,9 (3,27)	–
Полистирол, ударопрочный	12,2 (3,1)	3,9 (0,99)
Полиакрилаты, литые марки	12,0 (3,1)	5,5 (1,4)
Полиакрилаты литые, общего назначения	11,8 (3,0)	8,2 (2,1)
Поликарбонат, неармированный	10,2 (2,6)	7,7 (1,95)
АБС-пластик	10,1 (2,6)	7,0 (1,8)
Полиацеталь, гомополимер, неармированный	10 (2,5)	–
Полифениленсульфид, неармированный	10 (2,5)	–
Смолы на основе фениленоксида неармированные	9,7 (2,5)	9,2 (2,3)
Полиамиды с минеральным наполнителем	9,4 (2,4)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Смесь АБС-пластика с поликарбонатом	8,6 (2,2)	–
Полиацетали, сополимеры, неармированные	8,0 (2,0)	–
Полисульфон, неармированный	8,0 (2,0)	–
Смесь АБС-пластика с жестким поливинилхлоридом	7,8 (2,0)	–
Смесь полиакрилата с поливинилхлоридом	7,8 (2,0)	7,2 (1,8)
Полиарилсульфон	7,6 (1,9)	–
Полиэфирсульфон	7,1 (1,8)	–
Полипропилен общего назначения	6,8 (1,7)	4,9 (1,2)
Полиакрилаты, неармированные	6,74 (1,7)	–
Аллилдигликолькарбонат	6,3 (1,6)	–
Индий	5,94 (1,5)	–
Смесь АБС-пластика с полиуретаном	5,7 (1,5)	4,2 (1,1)
Полипропилен, ударопрочный	4 (1,0)	–
Сополимеры этилен с тетрафторэтиленом и этилена с хлортрифторэтиленом, неармированные	3,9 (0,99)	–
Полихлортрифторэтилен	3,9 (0,99)	2,5 (0,64)
Поливинилфторид	3,1 (0,79)	2,7 (0,69)
Высокомолекулярный полиэтилен	2,9 (0,74)	–
Сополимеры винилиденхлорида, неориентированные	1,13 (0,29)	–
Полибутилен, гомополимер	1,09 (0,28)	1,03 (0,26)
Полибутен, сополимеры	1,05 (0,27)	0,37 (0,09)
Сополимер перфторэтилена и пропилена	0,90 (0,23)	0,65 (0,17)
Политетрафторэтилен	0,88 (0,22)	0,5 (0,13)
Полиэтилен низкой плотности	0,82 (0,21)	0,61 (0,15)

Твердость металлов по Бринелю

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Белый литевой чугун и сплавы	700	130
Осмий	670	300
Низколегированные стали, ковкие, нормализованные, упрочненные и отожженные	627	202
Нержавеющие стали, ковкие, мартенситные, упрочненные, отожженные	580	180
Рений	555	331
Молибден и его сплавы	555	179
Никель и его сплавы	534	75
Нержавеющие стали, литевые	470	130
Вольфрам	443	330
Низколегированные стали, ковкие, науглероженные, упрочненные и отожженные	429	212
Медные литевые сплавы	415	35
Стальные сплавы, литевые, закаленные и отожженные	401	262
Родий	401	100
Иридий	351	200
Серый чугун, литевой	350	140
Рутений	350	200

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Суперсплавы на основе никеля	341	302
Титан и его сплавы	331	–
Пластичные зернистые чугуны	300	140
Гафний	285	277
Ковкие перлитовые чугуны	269	163
Нержавеющая сталь, мартенситная, ковкая, отожженная	260	150
Пластичный зернистый аустенитный чугун	240	130
Тантал и его сплавы	237	–
Литьевые стальные сплавы, нормализованные и отожженные	217	137
Высокопрочные стальные сплавы (с пределом текучести 42 000–65 000 фунт/дюйм ² , ковкие, после прокатки)	190	149
Обедненный уран	187	–
Цирконий и его сплавы	179	112
Нержавеющая сталь, аустенитная, ковкая, отожженная	170	143
Алюминиевые сплавы, серии 7000	160	60
Ковкие ферритовые чугуны	156	110
Алюминиевые литьевые сплавы	145	40
Алюминиевые сплавы, серии 2000	135	45
Цинковые литейные сплавы	125	85
Алюминиевые сплавы, серии 4000	120	–
Алюминиевые сплавы, серии 6000	120	25
Палладий	118	40
Ниобий и его сплавы	114	–
Платина	106	40
Алюминиевые сплавы, серии 5000	105	28
Цинковые заливочные сплавы	91	82
Серебро	90	26
Сплавы на основе марганца, ковкие	82	46
Сплавы на основе марганца, литьевые	80	50
Алюминиевые сплавы, серии 3000	77	28
Редкие земли	77	17
Золото	66	25
Алюминиевые сплавы, серии 100	44	19
Олово и его сплавы	29	5
Свинец и его сплавы	17	4,7
Индий	0,9	–

Твердость пластмасс по Роквеллу, шкала R

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Меламиновые смолы с целлюлозным наполнителем, для электротехники	125	115
Полифениленсульфид, неармированный	124	–
Полифениленсульфид с 40% стекла	123	–
Хлорированный поливинилхлорид	122	117
Полиамиды с минеральным наполнителем	121	119
Полиэфир термопластичный	120	117

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полибутилентерефталат, неармированный	120	–
Полиэфир термопластичный, смесь полиэтилентерефталата с полибутилентерефталатом с 15 и 30% стекла	120	119
Ацетат целлюлозы	120	49
Полиамиды общего назначения	120	111
Повинилхлорид, сополимер винилхлорида с винилацетатом, жесткий	120	110
Полисульфон, неармированный	120	–
Смолы на основе фениленоксида, неармированные	119	115
Полиэфир термопластичный, полибутилентерефталат с 30 и 45% смеси стекла с минеральным наполнителем	119	114
Полиэфир термопластичный, полибутилентерефталат с 30% стекла	119	118
Полиэфир термопластичный, полибутилентерефталат с 10% и 30% минерального наполнителя	118	112
Смесь АБС-пластика с поликарбонатом	117	–
Смесь АБС-пластика с полиарилсульфоном	117	–
АБС-пластик	115	75
Полихлортрифторэтилен	115	100
Полипропилен, армированный стеклом	115	90
Ацетат-бутират целлюлозы	114	23
Повинилхлорид	110	–
Ацетат-пропионат целлюлозы	109	57
Смесь АБС-пластика с повинилхлоридом	102	–
Полипропилен общего назначения	100	80
Сополимеры этилен с тетрафторэтиленом и этилена с хлортрифторэтиленом, неармированные	95	–
Смесь АБС-пластика с полиуретаном	82	70
Политетрафторэтилен	55	35

Твердость резин и эластомеров по Шору, шкала А

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Термопластичные эластомеры	100	35
Полиуретаны на основе простых и сложных эфиров	100	80
Бутадиен-стирольный каучук	100	40
Натуральный каучук	100	30
Хлорированный полиэтилен	96	40
Хлоропрен	96	40
Хлорсульфированный полиэтилен	95	50
Силиконовый каучук	90	25
Полиакриловый каучук	90	40
Нитрильный каучук	90	20
Фторуглеродный каучук	90	65
Этилен-пропиленовый и тройной (этилен-пропилен-диеновый) эластомер	90	30
Эпихлоргидриновый каучук	80	40

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Сополимер изопрена с изобутиленом	80	40
Полибутадиен	80	45
Полисульфидный каучук	80	20
Полипропилен оксид	80	40
Синтетический полиизопреновый каучук	80	40

Твердость керамик по Моосу

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Муллит	18	14
Карбид ниобия	10	9
Карбид бериллия	9+	—
Карбид тантала	9+	—
Окись бериллия	9	—
Окись алюминия	9	—
Карбид титана	9	8
Карбид циркония	9	8
Окись циркония	8	7
Циркон	8	—
Стеатит (мыльный камень)	7,5	—
Окись тория	7	—
Окись магния	6	—
Фарфор глазурованный	6,0	3,5
Окись кальция	2	3,3
Нитриды бора и алюминия		—

Максимально допустимые температуры эксплуатации неметаллических материалов^a, °F (K)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Окись тория	4890 ^a (2972)	—
Окись бериллия	4350 ^a (2672)	—
Окись кальция	4350 (2672)	—
Окись магния	4350 ^a (2672)	—
Окись циркония	4350 ^a (2672)	—
Карбид кремния	4200 (2589)	—
Карбид бора	4100 (2533)	—
Керамика на основе окиси алюминия	4350 ^a (2222)	—
Муллит	3200 (2033)	—
Форстерит	1832 (1273)	—
Стеатит	1832 (1273)	—
Слюда (магниева)	1800 (1255)	1400 (1033)
Слюда (керамическая)	1500 (1116)	700 (644)
Фарфор глазурованный	1500 (1088)	700 (644)

^a При нулевом напряжении.

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Слюда (природная, мусковит)	1110 (873)	—
Кремниевые покрытия	1000 (811)	—
Карбид вольфрама после газопламенной обработки	1000 (811)	—
Слюда, связанная со стеклом	700 (644)	—
Полиимиды	600 (589)	—
Кремнийорганические эластомеры	600 (589)	—
Кремнийорганические пластики, армированные	600 (589)	—
Эпоксидные смолы, циклоалифатические, неармированные	550 (561)	480 (522)
Политетрафторэтилен	550 (561)	—
Фенольные смолы, армированные	550 (561)	220 (378)
Покрытия из фторуглеродов	550 (561)	—
Стекла, натриевые, отоженные	550 (561)	—
Эпоксидные смолы	500 (533)	250 (398)
Эпоксидные новолачные смолы, неармированные	500 (533)	450 (505)
Фторуглеродные эластомеры	500 (533)	—
Стекла боросиликатные, отоженные	500 (533)	—
Полиарилсульфон	500 (533)	—
Полифениленсульфид	500 (533)	—
Алкидные смолы, армированные	450 (505)	300 (422)
Войлок из политетрафторэтилена	450 (505)	—
Меламиновые смолы, армированные	430 (494)	170 (350)
Диаллилфталаты	400 (478)	300 (422)
Эпоксидные покрытия	400 (478)	—
Перфтор(этиленпропиленовые) сополимеры	400 (478)	—
Полихлортрифторэтилен	390 (472)	350 (450)
Полиакрилатные эластомеры	375 (464)	—
Войлок из полиамидного волокна	350 (450)	—
Войлок из полиэфирного волокна	350 (450)	—
Покрытия их фенольных смол	350 (450)	—
Полиэфиры термопластичные — полибутилен- и тетраметиленерефталат	350 (450)	—
Полиэфиры термореактивные, армированные	350 (450)	300 (422)
Полисульфоны	350 (450)	340 (444)
Этиленпропиленовый и тройной (этиленпропилендиеновый) эластомер	325 (436)	—
Эластомер из хлорсульфированного полиэтилена	325 (436)	—
Эластомер из хлорированного полиэтилена	300 (422)	—
Эластомер на основе эпосихлоргидрина	300 (422)	—
Сополимеры этилен с тетрафторэтиленом и этилена с хлортрифторэтиленом	300 (422)	—
Поливинилиденфторид	300 (422)	—
Сополимер изобутилена и изопрена	300 (422)	—
Нитрильный каучук	300 (422)	—
Полиамиды	300 (422)	175 (353)
Полипропилен общего назначения	300 (422)	225 (380)
Полиуретановые покрытия	300 (422)	—
Эластомеры на основе полипропиленоксида	300 (422)	—

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Термопластичные эластомеры	300 (422)	—
Хлорированные полиэферы	290 (416)	—
Полиметилпентен	275 (408)	—
Войлок из полипропиленовых волокон	250 (394)	—
Полиарилловый эфир	250 (394)	—
Поликарбонат	250 (394)	—
Полиэтилен высокой плотности	250 (394)	175 (353)
Полипропилен, ударопрочный	250 (394)	200 (366)
Эластомеры на основе полисульфона	250 (394)	—
Пластмассы на основе полиуретана, неармированные	250 (394)	190 (361)
Полиуретаны на основе простых и сложных эфиров	250 (394)	—
Хлоропеновый каучук	240 (389)	—
Сополимеры этилена с пропиленом	240 (389)	190 (361)
Полиакрилаты	230 (383)	125 (325)
АБС-пластик	230 (383)	130 (328)
Хлорированный поливинилхлорид	230 (383)	—
Войлок из вискозного волокна	225 (380)	—
Полибутилен	225 (380)	—
Ацетат целлюлозы	220 (378)	140 (333)
Бутират целлюлозы	220 (378)	140 (333)
Пропионат целлюлозы	220 (378)	155 (341)
Смолы на основе феноленоксида	220 (378)	175 (353)
Смеси АБС-пластика с поликарбонатом	220 (378)	—
Полиацетали, сополимеры	212 (373)	—
Аллилдигликолькарбонат	212 (373)	—
Полибутилен низкой плотности	212 (373)	180 (366)
Покрытия из алкидных смол	200 (366)	—
Покрытия из полихлоропрена	200 (366)	—
Эластомеры из полиуретанов	200 (366)	—
Полиэфирные покрытия	200 (366)	—
Сополимер стирола с акрилонитрилом	200 (366)	140 (333)
Полиацетали, гомополимеры	195 (364)	—
Соплимер этилена с этилацетатом	191 (361)	—
Пластмассы на основе полиуретанов	190 (361)	—
Этилцеллюлоза	185 (358)	115 (319)
Покрытия из полиакрилатов	180 (355)	—
Иономеры	180 (355)	160 (344)
Натуральный каучук	180 (355)	—
Покрытия из нитроцеллюлозы	180 (355)	—
Бутадиен-стирольные каучуки	180 (355)	—
Полиизопрен, синтетический	180 (355)	—
Полистирол	175 (353)	140 (333)
Поливинилхлорид	175 (353)	140 (333)
Мочевинные смолы, армированные целлюлозными волокнами	170 (350)	—
Покрытия из поливинилхлорида	150 (339)	—
Нитрат целлюлозы	140 (333)	—

Температура деформационной теплостойкости ^a °F (K)		
Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Кремнийорганические полимеры	> 900 (> 755)	–
Полиимиды	680 (633)	582 (588)
Полиамидимиды	545 (558)	520 (544)
Эпоксидные смолы, циклоалифатические	525 (547)	300 (422)
диэпоксиды, литевые, жесткие		
Полиарилсульфоны	525 (547)	–
Полибутадиены	500 (533)	–
Полиамиды с 30% стекла	495 (530)	420 (498)
Полиэфир термопластичный,		
полиэтилентерефталат с 30 и 45% стекла	442 (601)	428 (493)
Эпоксидные новолачные смолы	425 (491)	422 (300)
Политериленсульфиды с 40% стекла	425 (491)	–
Полиэфир термопластичный,		
полибутилентерефталат с 40 и 15% стекла	405 (480)	375 (464)
Алкидные смолы	> 400 (> 478)	350 (450)
Эпоксидные смолы с минеральным наполнителем	400 (478)	340 (444)
Меламиновые смолы	400 (478)	265 (403)
Полиэфир, термореактивный, литевой, жесткий	400 (478)	120 (422)
Полиэфир термореактивный для получения		
армированных отливок	400 (478)	375 (464)
Полиэфир, термореактивный, для пултрузии	400 (478)	–
Полиэфирсульфон	400 (478)	–
Пенопласты с интегральной оболочкой,		
жесткие, армированные стеклом	390 (472)	162 (345)
Полиэфир термопластичный, полибутилентерефталат с 35 и		
45% смеси стекла и минерального наполнителя	390 (472)	340 (444)
Полиэфир термопластичный,		
полибутилентерефталат с 10 и 30% минерального наполнителя	385 (469)	150 (339)
Полиэфир термопластичный, смесь		
политерефталатов с 15 и 30% стекла	380 (466)	320 (433)
Полисульфоны	365 (558)	345 (447)
Сополимер винилиденхлорида	339 (150)	328 (130)
Полиакрилаты, ненаполненные	320 (433)	–
Полиацетали	325 (436)	212 (373)
Смолы на основе фениленоксида с 20-30% стекла	310 (428)	282 (412)
Смесь АБС-пластика с полисульфоном	300 (422)	–
Полиамиды с минеральным наполнителем	300 (422)	–
Полипропилен, стеклонеполненный	300 (422)	250 (394)
Поликарбонаты	295 (419)	260 (400)
Сополимеры этилен с тетрафторэтиленом и этилена с хлор-		
трифторэтиленом армированные стеклом	285 (414)	–
Полифениленсульфид, ненаполненный	278 (410)	–
Пенопласты с интегральной оболочкой,	> 270	94 (307)
жесткие, неармированные	(> 405)	
Смолы на основе фениленоксида, неармированные	265 (403)	212 (373)

^a При нагрузке 264 фунт/дюйм² (1,82 МПа).

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
АБС-пластик	245 (391)	180 (355)
Хлорированный поливинилхлорид	234 (385)	202 (368)
Поливинилиденфторид	232 (384)	—
Эпоксидные смолы, литые, жесткие	230 (383)	—
Смеси АБС-пластика с поликарбонатом	220 (378)	—
Политетрафторэтилен с керамическим наполнителем	220 (378)	170 (350)
Полиамиды общего назначения	220 (378)	155 (341)
Полистирол	220 (378)	210 (372)
Сополимер стирола с акрилонитрилом	220 (378)	210 (372)
Смесь АБС-пластика с полиуретаном	207 (370)	210 (367)
Ацетат-бутират целлюлозы	196 (364)	118 (321)
Ацетат целлюлозы	188 (360)	117 (320)
Смесь полиакрилата с поливинилхлоридом	185 (358)	160 (344)
Полихлортрифторэтилен	178 (354)	151 (339)
Ацетат-пропионат целлюлозы	173 (351)	129 (327)
Сополимеры этилена с тетрафторэтиленом и этилена с хлортрифторэтиленом ненаполненные	170 (350)	160 (344)
Эпоксидные смолы, литые, нежесткие	155 (341)	90 (305)
Полибутилен, гомополимер	140 (333)	120 (322)
Полипропилен общего назначения	140 (333)	135 (330)
Полипропилен ударопрочный	140 (333)	120 (322)
Полиэфир термопластичный, полибутилентерефталат, неармированный	130 (328)	123 (324)

Удельная теплоемкость, БЕТ/фунт · °F (Дж/кг · К)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полиэфир, термореактивный, литой, жесткий	0,55 (2301)	0,30 (1255)
Полиэтилен высокой плотности	0,55 (2301)	0,46 (1925)
Полиэтилен низкой и средней плотности	0,55 (2301)	0,53 (2218)
Полиамиды	0,5 (2092)	0,3 (1255)
Эпоксидные смолы, литые, жесткие	0,5 (2092)	0,4 (1673)
Полипропилен, ударопрочный	0,48 (2008)	0,45 (1883)
Бериллий и его сплавы	0,45 (1883)	—
Полипропилен общего назначения	0,45 (1883)	—
Ацетат целлюлозы	0,42 (1757)	0,3 (1255)
Ацетат-бутират целлюлозы	0,4 (1694)	0,3 (1255)
Фенольные смолы, наполненные	0,4 (1694)	0,28 (1172)
Ацетат-пропионат целлюлозы	0,4 (1694)	0,3 (1255)
Смесь АБС-пластика и полиарилсульфона	0,35 (1464)	—
Полиацетали	0,35 (1464)	—
Полиакрилаты	0,35 (1464)	0,33 (1381)
Полиэфир термореактивный для получения армированных отливок	0,35 (1464)	0,20 (837)
Полистирол общего назначения	0,35 (1464)	0,30 (1255)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полистирол, ударопрочный	0,35 (1464)	0,30 (1255)
Магниеые сплавы, ковкие	0,346 (1448)	0,245 (1025)
Карбид кремния (0–2550 °F; 255–16782 K)	0,34 (1432)	0,285 (1192)
Карбид бериллия (85–210 °F; 303–372 K)	0,334 (1397)	–
Поливинилиденфторид	0,33 (1381)	–
Сополимер стирола с акрилонитрилом	0,33 (1381)	–
Сополимеры винилиденхлорида	0,32 (1339)	–
Полиимиды, ненаполненные	0,31 (1297)	0,27 (1130)
Бор	0,307 (1284)	–
Смесь АБС-пластика и поликарбоната	0,3 (1255)	–
Аллилдигликолькарбонат	0,3 (1255)	–
Поликарбонат, ненаполненный	0,3 (1255)	–
Смесь полиакрилата с поливинилхлоридом	0,29 (1213)	–
Сополимер перфтор(этиленпропилена)	0,28 (1172)	–
Полиэфирная термореактивная смола, — пултрузия	0,28 (1172)	0,24 (1004)
Полиимид, стеклонаполненный	0,27 (1130)	–
Оксид магния (400 °F; 477 K)	0,26 (1088)	–
Полипропиленсульфид	0,26 (1088)	–
Полистирол с 30% стекла	0,26 (1046)	–
Оксид бериллия (200 °F; 366 K)	0,25 (1046)	–
Политетрафторэтилен	0,25 (1046)	–
Сплавы на основе магния, литьевые	0,245 (1045)	0,245 (1045)
Полисульфон	0,24 (1004)	–
Алюминиевые сплавы, серия 6000	0,23 (962)	0,23 (962)
Алюминиевые сплавы, серия 7000	0,23 (962)	0,23 (962)
Алюминиевые сплавы, серия 6000	0,23 (962)	0,22 (920)
Алюминиевые сплавы, серия 2000	0,23 (962)	0,22 (920)
Алюминиевые сплавы, серия 3000	0,22 (920)	0,22 (920)
Карбид бора	0,22 (920)	–
Алюминиевые сплавы, серия 1000	0,22 (920)	–
Полихлортрифторэтилен	0,22 (920)	–
Оксид кальция	0,21 (879)	0,075 (314)
Суперсплавы на основе никеля	0,20 (837)	0,106 (443)
Форстерит	0,2 (837)	–
Керамика на основе окиси алюминия	0,19 (725)	–
Поликристаллическое стекло	0,190 (725)	0,18 (753)
Нитриды бора и алюминия	0,17 (711)	–
Оксид циркония	0,16 (669)	–
Кремнезем, кварц	0,16 (669)	–
Оксид кремния	0,1597 (668,2)	–
Титан и его сплавы	0,155 (648)	0,110 (460)
Нитрид кремния	0,15 (627)	–
Бориды титана, циркония и гафния	0,15 (627)	0,05 (209)
Кобальт и его сплавы	0,14 (586)	–
Никель и его сплавы	0,14 (586)	0,091 (381)
Нержавеющая сталь, литьевая	0,14 (586)	0,11 (460)
Пластичный (зернистый) чугун	0,13 (644)	–
Серый чугун, литьевой	0,13 (644)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Карбид титана	0,13 (644)	—
Литьевые сплавы на основе цинка	0,125 (523)	0,104 (410)
Суперсплавы на основе кобальта	0,12 (502)	0,09 (376)
Суперсплавы на основе литьевого чугуна, ковкие	0,12 (502)	0,10 (418)
Специальные нержавеющие стали, ковкие	0,12 (502)	0,10 (418)
Нержавеющие стали, аустенитные, ковкие	0,12 (502) 0,12 (502)	—
Ванадий	(502)	—
Циркон	0,12 (502)	—
Индий	0,117 (489)	—
Марганец	0,114 (476,9)	—
Стальные сплавы, литьевые	0,11 (460)	0,10 (418)
Углеродистая сталь, литевая	0,11 (460)	0,10 (418)
Углеродистая сталь, упрочненная, ковкая	0,11 (460)	0,10 (418)
Нержавеющая сталь, стандартная, ферритовая, мартенситная, ковкая	0,11 (460)	—
Хром	0,1068 (446,8)	—
Сплавы с высоким содержанием меди, ковкие	0,10 (418)	0,09 (376)
Бронзы, ковкие	0,10 (418)	0,09 (376)
Медь, литьевые сплавы	0,10 (418)	0,09 (376)
Сплавы на основе цинка, для заливки	0,10 (418)	0,10 (418)
Сплавы на основе цинка, ковкие	0,096 (402)	0,094 (393)
Медь, ковкая	0,092 (405)	0,092 (385)
Латуни, ковкие	0,9 (376)	0,09 (376)
Сплавы меди, никеля и цинка, ковкие	0,9 (376)	0,09 (376)
Медно-никелевые сплавы, ковкие	0,9 (376)	0,09 (376)
Карбид циркония (400 °F; 477 K)	0,08 (334)	—
Карбид ниобия (400 °F; 477 K)	0,08 (334)	—
Цирконий и его сплавы	0,0659 (276)	—
Молибден и его сплавы	0,065 (272)	—
Ниобий и его сплавы	0,065 (272)	0,060 (251)
Родий	0,059 (247)	—
Палладий	0,058 (243)	—
Рутений	0,057 (238)	—
Серебро	0,056 (234)	—
Карбид вольфрама + 15% покрытие из кобальта, нанесенного газопламенным методом	0,056 (234)	—
Олово и его сплавы	0,054 (226)	—
Карбид вольфрама + 9% покрытие из кобальта, нанесенного газопламенным методом	0,048 (201)	—
Карбид вольфрама (400 °F; 477 K)	0,04 (167)	—
Карбид тантала	0,04 (167)	—
Тантал и его сплавы	0,036 (151)	—
Рений	0,035 (146)	—
Гафний	0,035 (146)	—
Свинец и его сплавы	0,032 (134)	0,031 (130)
Золото	0,031 (130)	—
Вольфрам	0,034 (142)	—
Иридий	0,031 (130)	—

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Платина	0,031 (130)	–
Осмий	0,031 (130)	–
Торий	0,03 (126)	–
Обедненный уран	0,03 (126)	–
Висмут	0,0294 (123,0)	–
Торий	0,0282 (117,9)	–

Коэффициент теплопроводности. БЕТ · фут/час · фут² · °F (Вт/м · К)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Серебряные покрытия	244 (422)	–
Серебро (212 °F, 373 К)	242 (419)	–
Медь, литьевые сплавы	226 (391)	16(28)
Медь, ковкая	226 (391)	112 (194)
Медные покрытия	222 (384)	–
Сплавы с высоким содержанием меди, ковкие	218 (377)	62 (107)
Графит, пиролитический	215 (271,1)	108 (186,9)
Золото (212 °F, 373 К)	172 (298)	–
Золотые покрытия	169 (292)	–
Графит, перекристаллизованный	140–90 (242,3–155,8)	80–39 (138,5–67,5)
Алюминиевые сплавы, серия 1000	135 (224)	128 (222)
Латуни, ковкие	135 (224)	15 (26)
Алюминиевые сплавы, серия 6000	125 (216)	99 (171)
Бериллий и его сплавы (212 °F, 373 К)	123 (213)	87 (151)
Бронзы, ковкие	120 (208)	20 (35)
Алюминиевые сплавы, серия 5000	116 (201)	67,4 (117)
Алюминиевые сплавы, серия 2000	111(192)	82,5 (143)
Алюминиевые сплавы, серия 3000	111 (292)	93,8 (162)
Нитрид бора	105 (182)	–
Вольфрам (212 °F, 373 К)	96,6 (167)	–
Окись бериллия (2190 °F, 1472 К)	95,2 (162)	–
Графит, премиум	95 (164,4)	65 (112,5)
Графит, чистый	94 (162,7)	65 9112,5)
Алюминиевые литьевые сплавы	92,5 (160)	51 (88)
Молибден и его сплавы (212 °F, 373 К)	84,5 (146)	–
Сплавы магния, ковкие	79 (137)	29 (50)66,3
Цинковые литьевые сплавы	62,6 9125)	(115,1)
Алюминиевые сплавы, серия 7000	70 (121)	70 (121)
Углеграфит	66 (114,2)	18 (31,2)
Цинковые заливочные сплавы (158–284 °F, 343–413 К)	65,5 (113)	62,9 (109)
Цинковые покрытия	64,2 (111,1)	–
Цинковые сплавы, ковкие	62,2 (108)	60,5 (105)
Магниеые сплавы, ковкие	58 (100)	24 (42)
Карбид вольфрама	50,8 (88)	16,5 (28,5)
Металлокерамика на основе карбида вольфрама	50,1 (86,7)	25,7 (44)
Родий (212 °F, 373 К)	50 (87)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Углерод и графит, армированные волокнами	50 (86,5)	2 (3,5)
Никель и его сплавы	49,6 (86)	5,67 (10)
Кремний	48,4 (83,7)	—
Рений (212 °F, 373 K)	43,7 (76)	—
Платина (212 °F, 373 K)	42 (73)	—
Индий	41,1 (71,1)	—
Палладий (212 °F, 373 K)	41 (71)	—
Олово и его сплавы	37 (64)	—
Никелевые покрытия	34,4 (59,5)	—
Иридий (212 °F, 373 K)	34 (59)	—
Ниобий и его сплавы (212 °F, 373 K)	31,5 (55)	—
Тантал и его сплавы (212 °F, 373 K)	31,5 (55)	—
Медно-никелевые сплавы, ковкие	31 (54)	17 (29)
Серый чугун, литейной (212 °F, 373 K)	30 (51,9)	25 (43,3)
Ковкий чугун	39,5 (51,1)	—
Сверхпрочная сталь	29 (50,2)	17 (29,4)
Углеродистые и легированные стали, литейные (212 °F, 373 K)	27 (46,7)	—
Углеродистая сталь, науглероженная, упрочненная, ковкая (212 °F, 373 K)	27 (46,7)	—
Суперсплавы на основе никеля (1600 °F, 1144 K)	27 (47)	5,25 (9)
Сплав меди, никеля, цинка, ковкий	26 (45)	17 (29)
Карбид кремния (2200 °F, 1478 K)	25 (43)	9 (15)
Торий (392 °F, 473 K)	21,8 (37,7)	—
Нержавеющая сталь, мартенситная, ковкая (212 °F, 373 K)	21,2 (36,7)	11,7 (20,2)
Редкие земли (82 °F, 101 K)	21,0 (36)	0,023 (0,040)
Свинцовое покрытие	20,1 (34,8)	—
Оксид алюминия, газопламенное нанесение	20 (34,6)	19 (32,9)
Пластичный зернистый чугун (212 °F, 373 K)	20 (34,6)	18 (31)
Свинец и его сплавы (212 °F, 373 K)	19,6 (34)	16 (28)
Нитрид кремния	19 (33)	8 (14)
Cr ₂ O ₃ , газопламенное нанесение	18 (31,1)	—
Ванадий (212 °F, 373 K)	17,9 (31,0)	—
Обедненный уран (212 °F, 373 K)	17,2 (30)	—
Кобальт и его сплавы (1300 °F, 978 K)	16,6 (29)	5,2 (9)
Карбид бора (2200 °F, 1478 K)	16 (27,7)	—
Суперсплавы на основе кобальта, ковкие (1300 °F, 978 K)	15,8 (27)	11,9 (20,6)
Нержавеющая сталь, ферритовая, ковкая (212 °F, 373 K)	15,6 (27)	13,8 (23,9)
Нержавеющие стали, литейные (212 °F, 373 K)	15,2 (26,3)	7,5 (13)
Суперсплавы на основе железа, ковкие и литейные (1100–1200 °F, 866–922 K)	15 (26)	10,5 (18,2)
Специальные нержавеющие стали, ковкие (212 °F, 373 K)	14,4 (24,9)	6,5 (11,2)
Суперсплавы на основе кобальта, ковкие (1300 °F, 978 K)	13,1 (22,6)	10,0 (19,0)
Карбид титана	12,8 (22)	—
Карбид бериллия (69–795 °F, 243–697 K)	12,1 (20,9)	—
Нержавеющая сталь, упрочненная старением, ковкая (212 °F, 373 K)	12,1 (20,9)	8,7 (15,1)
Карбид циркония	11,9 (20,5)	—
Карбид титана	11,9 (20,5)	9,9 (17)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Титан и его сплавы	11,5 (20)	3,9 (7)
Цирконий и его сплавы (212 °F, 373 K)	9,6 (17)	8,1 (14)
Нержавеющая сталь, аустенитная, ковкая (212 °F, 373 K)	9,4 (16,3)	8,2 (14,2)
Фарфор глазурованный	9,0 (15,5)	6,0 (3,46)
Карбид ниобия	8,23 (14,2)	—
Оксид циркония, газопламенное нанесение	8 (13,8)	7 (12,1)
Кадмиевое покрытие	5,3 (9,17)	—
Карбид вольфрама + 9% кобальта, газопламенное нанесение	5,3 (9,2)	—
Карбид вольфрама + 15% кобальта, газопламенное нанесение	5,3 (9,2)	—
Углерод из коксового остатка	5 (8,7)	3 (5,8)
Висмут	4,83 (8,37)	—
Оксид кальция, пористость 9% (1830 °F, 1272 K)	4,12 (7,13)	—
Циркон	3,61 (6,2)	2,88 (4,9)
Форстерит	2,40 (4,1)	1,94 (3,3)
Кордиерит	2,40 (4,1)	0,97 (1,7)
Поликристаллическое стекло	1,95 (3,4)	1,13 (1,9)
Стеатит	1,94 (3,3)	1,45 (2,5)
Дерево тяжелых пород, доски, выдержанное	1,50 (2,6)	1,10 (1,65)
Оксид магния, пористость 22% (2190 °F, 1472 K)	1,47 (2,5)	—
Мулит	1,47 (2,5)	1,48 (1,4)
Дерево средней плотности, из разных пород, доски	1,0 (0,40)	—
Литьевые эпоксидные смолы	0,87 (0,5)	0,1 (0,17)
Оксид кремния, пористость 0,9%	0,80 (1,4)	—
Дерево средней плотности, доски	0,60 (1,04)	0,50 (0,87)
Полиимиды, неармированные	0,57 (0,99)	0,21 (0,36)
Полиэфир термопластичный, полибутилентерефталат, с 30% углерода	0,542 (0,938)	—
Оксид циркония, пористость 28% (1190 °F, 1472 K)	0,53 (0,9)	—
Кремнийорганические полимеры	0,50 (0,87)	0,075 (0,13)
Деревянные доски, структурная изоляция	0,45 (0,78)	0,27 (0,47)
Полиэфирная терморезистивная смола, — пултрузия	0,42 (0,73)	0,33 (0,57)
Слюда (магниева)	0,4 (0,69)	0,3 (0,51)
Слюда (природный мусковит)	0,36 (0,62)	0,25 (0,43)
Тонкий войлок из фторопласта	0,35 (0,605)	—
Фенольные смолы, литьевые марки	0,309 (0,535)	0,116 (0,201)
Эпоксидные смолы, заливочные, жесткие	0,3 (0,52)	0,1 (0,17)
Полиимиды, армированные стеклом	0,299 (0,517)	—
Слюда (керамическая)	0,29 (0,50)	—
Полиамид с 309% стекла	0,29 (0,50)	0,1 (0,17)
Меламиновые смолы, армированные стекловолокном	0,28 (0,48)	—
Слюда, связанная со стеклом	0,24 (0,42)	—
Войлок из полиэфирных волокон	0,24 (0,42)	0,175 (0,302)
Войлок из вискозных волокон средней плотности	0,23 (0,40)	0,19 (0,33)
АБС-пластик	0,20 (0,350)	0,08 (0,14)
Меламиновые смолы, армированные целлюлозными волокнами (электротехнического назначения)	0,20 (0,35)	0,17 (0,29)
Ацетат целлюлозы	0,19 (0,33)	0,10 (0,17)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Ацетат-бутират целлюлозы	0,19 (0,33)	0,10 (0,17)
Ацетат-пропионат целлюлозы	0,19 (0,33)	0,10 (0,17)
Полиэтилены высокой плотности и высокого молекулярного веса	0,19 (0,33)	—
Тонкий войлок из полиамидных волокон	0,183 (0,31)	—
Полиэфир, термопластичный — полиэтилентерефталат с 30 и 45% стекловолокна	0,183 (0,31)	—
Смесь АБС-пластика с полисульфоном	0,173 (0,299)	—
Полифениленоксид, неармированный	0,167 (0,289)	—
Полиацетали, сополимеры	0,16 (0,28)	—
Полисульфон, неармированный	0,15 (0,26)	—
Полихлортрифторэтилен	0,145 (0,251)	—
Нитрильный каучук	0,143 (0,247)	—
Полипропилен, ударопрочный	0,143 (0,247)	—
Бутадиен-стирольный каучук	0,143 (0,247)	—
Политетрафторэтилен	0,14 (0,24)	—
Поливинилиденфторид	0,14 (0,24)	—
Полиамиды общего назначения	0,14 (0,24)	0,01 (0,17)
Полиэфир, термореактивный, армированный, ударопрочный, для литья	0,14 (0,24)	0,11 (0,19)
Полиацеталь, гомополимер, неармированный	0,13 (0,22)	—
Полиакрилаты	0,13 (0,22)	0,12 (0,21)
Фторполимеры	0,13 (0,22)	—
Кремнийорганические смолы	0,13 (0,22)	—
Поликарбонат с 40% стекла	0,128 (0,222)	—
Термопластичный полиэфир — полибутилентерефталат с 35 и 45% смеси стекла и минерального наполнителя	0,128 (0,222)	0,10 (0,17)
Смолы на основе фениленоксида, ненаполненные	0,125 (0,216)	0,092 (0,159)
Полибутилен, гомополимер	0,125 (0,216)	—
Аллилдигликолькарбонат	0,12 (0,21)	—
Перфтор(этилен-пропиленовые) сополимеры	0,12 (0,21)	—
Поликарбонат, неармированный	0,118 (0,204)	0,113 (0,196)
Полистирол с 30% стекла	0,117 (0,202)	—
Полипропилен общего назначения	0,113 (0,196)	0,10 (0,17)
Хлоропеновый каучук	0,112 (0,19)	—
Термопластичный полиэфир — полибутилентерефталат, неармированный и содержащий 30% стекла	0,108 (0,187)	0,092 (0,159)
Поливинилхлорид и сополимер винилхлорида с винилацетатом	0,10 (0,17)	0,07 (0,12)
Смолы на основе полифениленоксида с 20 и 30% стекловолокна	0,96 (0,166)	0,092 (0,159)
Полиарилсульфон	0,092 (0,159)	—
Полистирол общего назначения	0,090 (0,156)	0,058 (0,10)
Полистирол, ударопрочный	0,090 (0,156)	0,024 (0,042)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Термопластичные эластомеры	0,087 (0,15)	—
Смесь полиакрилата с поливинилхлоридом	0,084 (0,145)	—
Натуральный каучук	0,082 (0,14)	—
Полиизопрен, синтетический	0,082 (0,14)	—
Смесь АБС-пластика с поликарбонатом	0,079 (0,137)	—
Пенопласты, жесткие, без наружного слоя	0,077 (0,133)	0,009 (0,016)
Хлорсульфированный полиэтилен	0,065 (0,112)	—
Сополимеры изопрена с изобутиленом	0,053 (0,09)	—
Сополимеры винилиденхлорида	0,053 (0,092)	—
Войлок, на основе древесных волокон	0,03 (0,052)	—
Войлок тонкий из полипропиленовых волокон	0,0216 (0,0375)	—
Окись тория с пористостью 17% (1190 °F, 1472 K)	0 (0)	—

**Коэффициент термического расширения^a, 10^{-4} дюйм/дюйм · °F
(10^{-4} мм/мм/К)**

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полиэтилен средней и высокой плотности	167 (301)	83 (149)
Смесь АБС-пластика с полиуретаном	121 (218)	116 (209)
Полифторалкокиси	111 (200)	67 (121)
Полиэтилен низкой плотности	110 (198)	89 (160)
Перфтор(этиленпропиленовые) сополимеры	105 (189)	83 (149)
Ацетат целлюлозы	90 (162)	44 (79)
Ацетат-бутират целлюлозы	90 (162)	60 (108)
Ацетат-пропионат целлюлозы	90 (162)	60 (108)
Сополимеры винилиденхлорида	88 (158)	—
Поливинилиденфторид	85 (153)	—
АБС-пластик	72 (130)	16 (29)
Полибутилен, гомополимер	71 (128)	—
Смолы на основе фениленоксида, ненаполненные	68 (123)	59 (33)
Пенопласты, жесткие с интегральной оболочкой, неармированные ^b	67 (121)	50 (90)
Полиакрилаты	60 (108)	30 (54)
Аллилдигликолькарбонат	60 (108)	—
Полипропилен ударопрочный	59 (106)	40 (72)
Полипропилен общего назначения	58 (104)	38 (68)
Полиэфир, термореактивный, заливочный	56 (101)	39 (70)
Полистирол ударопрочный	56 (101)	22 (40)
Политетрафторэтилен	55 (99)	—
Диаалилфталаты	50 (90)	22 (40)

^a Для полимерных материалов в диапазоне от –22 до 86 °F (243–303 K); для других материалов — как указано в таблице.

^b Для полимеров типа полиэтилена, полипропилена и полистирола.

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Эпоксидные смолы, литые, нежесткие	50 (90)	30 (54)
Полиамиды общего назначения	50 (90)	45 (81)
Полиамиды с минеральным наполнителем	50 (90)	27 (49)
Полиэфир термопластичные, смесь полибутилен- и полиэтилен-терепфталатов с 15 и 30% стекла	50 (90)	25 (45)
Кремнийорганические смолы	50 (90)	25 (45)
Термопластичный полиэфир – полибутилентерепфталат, с 15 и 30% минерального наполнителя	48 (86)	42 (76)
Полистирол общего назначения	48 (86)	33 (59)
Полиацетали, сополимеры, ненаполненные	47 (85)	–
Полиацетали с 20–25% стекла	47 (85)	20 (36)
Смесь АБС-пластика с жестким поливинилхлоридом	46 (83)	–
Полиацеталь, гомополимер, ненаполненный	45 (81)	–
Смесь полиакрилата с поливинилхлоридом	44 (79)	35 (63)
Полиакрилаты, ненаполненные	40 (72)	35 (63)
Термопластичный полиэфир – полибутилентерепфталат, ненаполненный	40 (72)	–
Полихлортрифторэтилен	39 (70)	–
Хлорированный поливинилхлорид	38 (68)	–
Поликарбонат, ненаполненный	38 (68)	18 (32)
Термопластичный полиэфир – полибутилентерепфталат с 35 и 45% смеси стекла и минерального наполнителя	38 (68)	28 (50)
Смесь АБС-пластика с поликарбонатом	37 (67)	–
Сополимер стирола с акрилонитрилом, неармированный	37 (67)	36 (65)
Термопластичный полиэфир – полибутилентерепфталат с 15 и 40% стекла	35 (63)	28 (50)
Эпоксидные смолы, заливочные, жесткие	33 (59)	–
Полисульфон, ненаполненный	31 (56)	–
Алкидные смолы	30 (54)	10 (18)
Полифениленсульфид, ненаполненный	30 (54)	–
Меламиновые смолы, армированные целлюлозными волокнами (электротехнического назначения)	28 (50)	11 (20)
Полиимиды, ненаполненные	28 (50)	25 (45)
Полиарилсульфон	26 (47)	–
Полиамиды с 30% стекла	25 (45)	12 (22)
Полиамидимиды, ударопрочные	24 (43)	–
Фенольные смолы общего назначения, литые марки	23 (41)	12 (22)
Полиимиды, наполненные 15% графита	23 (41)	–
Полифениленсульфид	22 (40)	–
Сплавы магния, ковкие (68–750 °F, 293–672 K)	21,8 (39,2)	14,0 (25,2)
Эпоксидные смолы с минеральным и стеклянным наполнителем	20 (36)	10 (8)
Политетрафторэтилен с керамическим наполнителем	20 (36)	17 (31)
Смолы на основе фениленоксида с 20–30% стекла	20 (36)	14 (25)
Термопластичный полиэфир – полиэтилентерепфталат с 30 и 40% стекла	20 (36)	13 (25,4)
Цинковые сплавы, ковкие (68–212 °F, 293–373 K)	19,3 (34,7)	6,0 (10,8)
Полиамидимиды, высокомолекулярные	19 (34)	–

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полиэфир, терморезистивный, армированный стеклом, высокопрочный, литые марки	19 (34)	13 (23)
Фенольные смолы, ударопрочные, литые марки	18 (32)	6,7 (12)
Полистирол с 30% стекла	18 (32)	–
Сополимеры этилен с тетрафторэтиленом и этилена с хлортрифторэтиленом, наполненные стеклом	17 (31)	–
Свинец и его сплавы (68–212 °F, 293–373 K)	16,3 (29,3)	16,0 (28,8)
Полисульфид с 30–40% стекла	16 (29)	12 (22)
Сополимер стирола с акрилонитрилом, наполненный 30% стекла	16 (29)	–
Цинковые литые сплавы	15,5 (26,9)	12,9 (23,2)
Цинковые заливочные сплавы (68–212 °F, 293–373 K)	15,2 (27,4)	–
Фенольные термостойкие смолы, литые марки	15 (27)	7,8 (14)
Фторполимеры — сополимеры этилена с тетрафтор- и хлортрифторэтиленом, неармированные	14 (25)	–
Сплавы магния, литые	14 (25)	–
Алюминиевые литые сплавы (68–212 °F, 293–373 K)	13,7 (24,7)	9,0 (16,2)
Алюминиевые сплавы, серия 5000 (68–212 °F, 293–373 K)	13,4 (24,1)	13,1 (23,6)
Алюминиевые сплавы, серия 3000 (68–212 °F, 293–373 K)	13,3 (23,9)	12,9 (23,2)
Алюминиевые сплавы, серия 2000 (68–212 °F, 293–373 K)	13,2 (23,8)	12,4 (22,3)
Алюминиевые сплавы, серия 1000 (68–212 °F, 293–373 K)	13,2 (23,8)	13,1 (23,6)
Алюминиевые сплавы, серия 6000 (68–212 °F, 293–373 K)	13,1 (23,6)	12,9 (23,2)
Алюминиевые сплавы, серия 7000 (68–212 °F, 293–373 K)	13,1 (23,6)	13,0 (23,4)
Олово и его сплавы (32–212 °F, 273–373 K)	13,0 (23,4)	–
Марганец	12,2 (22,0)	–
Медные сплавы, литые (68–572 °F, 293–5373 K)	12,0 (21,6)	9,0 (16,2)
Латуни ковкие (68–572 °F, 293–5373 K)	11,8 (21,2)	10,0 (18,0)
Бронзы ковкие (68–572 °F, 293–5373 K)	11,8 (21,2)	8,3 (14,9)
Серебро (32–212 °F, 273–373 K)	10,9 (19,6)	–
Алюминиевые сплавы, серия 4000 (68–212 °F, 293–373 K)	10,8 (19,4)	–
Суперсплавы на основе железа, ковкие и литые (70–1500 °F, 294–1089 K)	10,7 (19,3)	9,4 (16,9)
Белый чугун и литые сплавы на его основе (10 °F, 294 K)	10,7 (19,3)	4,5 (8,1)
Специальные нержавеющие стали, ковкие (70–212 °F, 294–373 K)	10,5 (18,0)	4,8 (8,6)
Пластичный (зернистый) аустенитный чугун (70–400 °F, 294–478 K)	10,4 (19,7)	7,0 (12,6)
Нержавеющие литые стали (70–1000 °F, 294–811 K)	10,4 (19,7)	6,4 (11,5)
Нержавеющие стали, аустенитные, ковкие (32–212 °F, 273–373 K)	10,4 (19,7)	8,3 (14,9)
Кобальт и его сплавы (70–1800 °F, 294–1255 K)	9,9 (17,8)	6,8 (12,2)
Суперсплавы на основе никеля (70–200 °F, 294–366 K)	9,89 (17,8)	5,92 (10,6)
Суперсплавы на основе кобальта, литые (70–1800 °F, 294–1255 K)	9,8 (17,6)	8,7 (15,7)
Сплавы с высоким содержанием меди, ковкие (68–572 °F, 293–573 K)	9,8 (17,6)	9,0 (16,2)
Медь, ковкая (68–572 °F, 293–573 K)	9,8 (17,6)	9,3 (16,7)
Никель и его сплавы	9,6 (17,2)	6,2 (11,2)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Медно-никелевые сплавы, ковкие (68–572 °F, 293–573 K)	9,5 (17,1)	9,0 (16,2)
Углеграфит	9,4 (16,9)	1,0 (1,8)
Суперсплавы на основе кобальта, ковкие (70–1800 °F, 294–1255 K)	9,4 (16,9)	9,0 (16,2)
Тройной сплав медь, никель, цинк, ковкие (68–572 °F, 293–573 K)	9,3 (16,7)	9,0 (16,2)
Поликарбонат с 40% стекла	9,3 (16,7)	–
Бериллий и его сплавы (70 °F, 294 K)	9,0 (16,2)	6,4 (11,5)
Углеродистая сталь, науглероженная, ковкая (70–1200 °F, 294–922 K)	8,4 (15,1)	–
Стальные литейные сплавы (70–1200 °F, 294–922 K)	8,3 (14,9)	8,0 (14,4)
Углеродистая сталь, литейная (70–1200 °F, 294–922 K)	8,3 (14,9)	–
Углеродистая сталь, упрочненная, ковкая (70–1200 °F, 294–922 K)	8,3 (14,9)	7,5 (13,5)
Меламиновые смолы, армированные стеклом	8,2 (14,8)	–
Нержавеющая сталь, упрочненная старением, ковкая (70–212 °F, 294–373 K)	8,2 (14,8)	5,3 (9,5)
Золото (68 °F, 293 K)	7,9 (14,2)	–
Оксид магния (68–2550 °F, 293–1672 K)	7,78 (14)	–
Обедненный уран (70 °F, 294 K)	7,7 (13,9)	–
Пластичный чугун, перлитовый (68–212 °F, 293–373 K)	7,5 (13,5)	–
Металлокерамика на основе карбида титана (68–1200 °F, 293–922 K)	7,5 (13,5)	4,3 (7,7)
Висмут	7,39 (13,3)	–
Оксид кальция (70–1000 °F, 294–811 K)	7,0 (12,6)	–
Торий (70 °F, 294 K)	6,94 (12,5)	–
Серый чугун (32–212 °F, 273–373 K)	6,8 (12,2)	6,0 (10,8)
Углерод и графит, армированные волокнами	6,7 (12,2)	1,8 (3,2)
Пластичный (зернистый) чугун (70–400 °F, 294–478 K)	6,6 (11,9)	–
Нержавеющая сталь, ферритовая, ковкая (32–212 °F, 273–373 K)	6,6 (11,9)	5,2 (9,4)
Палладий (68 °F, 293 K)	6,5 (11,7)	–
Нержавеющая сталь, мартенситная, ковкая (32–212 °F, 273–373 K)	6,2 (11,2)	5,5 (9,9)
Титан и его сплавы (68–1000 °F, 293–811 K)	6,0 (10,8)	–
Металлокерамика на основе карбида хрома (68–576 °F, 293–575 K)	6,0 (10,8)	–
Ковкий чугун, ферритовый (68–212 °F, 293–393 K)	5,9 (10,6)	–
Карбид бериллия (77–1472 °F, 298–1073 K)	5,8 (10,4)	–
Оксид бериллия (68–2550 °F, 293–1672 K)	5,28 (9,5)	–
Оксид тория (68–2550 °F, 293–1672 K)	5,28 (9,5)	–
Рутений (68 °F, 293 K)	5,1 (9,2)	–
Полиэфир, термопластичный — полибутилентерефталат с 30% углеродных волокон	5 (9)	–
Полиэфир термореактивный, пултрюзия	5(9)	3 (5,4)
Ванадий (70 °F, 294 K)	4,96 (8,94)	–
Платина (68 °F, 293 K)	4,9 (8,8)	–
Бориды титана, циркония и гафния (70–4000 °F, 294–2478 K)	4,8 (8,6)	4,2 (7,5)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Форстерит (68–212 °F, 293–373 K)	4,72 (8,5)	–
Родий (68 °F, 293 K)	4,7 (8,49)	–
Стекло, натриевое	4,7 (8,49)	–
Бор (68–1380 °F, 293–1022 K)	4,61 (8,3)	–
Карбид тантала (77–1472 °F, 298–10733 K)	4,6 (8,3)	–
Графит, перекристаллизованный (70 °F, 294 K)	4,5 (8,1)	0,4 (0,09)
Металлокерамика на основе окиси алюминия (77–1830 °F, 298–1272 K)	4,3 (7,74)	–
Нитрид бора (77–1800 °F, 298–1255 K)	4,17 (7,5)	–
Карбид титана (77–1472 °F, 298–1073 K)	4,1 (7,4)	3,7 (6,6)
Карбид вольфрама	4,1 (7,4)	2,5 (4,5)
Стеатит (68–212 °F, 293–373 K)	3,99 (7,2)	3,33 (5,9)
Металлокерамика на основе карбида вольфрама (68–1200 °F, 293–922 K)	3,9 (7)	2,5 (4,5)
Ниобий и его сплавы (70 °F, 294 K)	3,82 (6,9)	3,80 (6,8)
Иридий	3,8 (6,8)	–
Карбид циркония (77–1800 °F, 298–1255 K)	3,7 (6,6)	–
Рений (70 °F, 294 K)	3,7 (6,6)	–
Осмий	3,6 (6,5)	–
Цирконий и его сплавы (212 °F, 373 K)	3,6 (6,5)	3,1 (5,6)
Хром (68 °F, 293 K)	3,4 (6,2)	–
Гафний (70 °F, 294 K)	3,4 (6,2)	–
Поликристаллическое стекло (77–570 °F, 298–572 K)	3,2 (5,7)	0,2 (0,36)
Окись циркония ^c (77–1472 °F, 298–1073 K)	3,1 (5,6)	–
Муллит (68–212 °F, 293–373 K)	3,0 (5,4)	2,7 (4,8)
Молибден и его сплавы (70 °F, 294 K)	2,7 (4,9)	–
Кремний	2,6 (4,67)	–
Вольфрам (70 °F, 294 K)	2,5 (4,5)	–
Карбид кремния (0–2550 °F, 255–1672 K)	2,4 (4,3)	2,17 (3,9)
Графит, пиролитический (70 °F, 294 K)	2,2 (4,0)	1,1 (2,0)
Кордиерит (68–212 °F, 293–373 K)	2,08 (3,7)	–
Циркон (68–212 °F, 293–373 K)	1,84 (3,3)	1,31 (2,3)
Стекло, боросиликатное	1,83 (3,2)	–
Карбид бора (0–2550 °F, 255–1672 K)	1,73 (3,1)	–
Уголь, из антрацена (70 °F, 294 K)	1,5 (2,7)	1,3 (2,3)
Уголь из нефтяного кокса (70 °F, 294 K)	1,5 (2,7)	1,3 (2,3)
Нитрид кремния (70–1800 °F, 294–1255 K)	1,37 (2,4)	–
Графит, премиум (70 °F, 294 K)	0,5 (0,09)	0,963 (0,113)
Стекло, 96% силикатное	0,44 (0,79)	–
Стекло, плавяная окись кремния — кварц	0,31 (0,56)	–
Окись кремния (68–2280 °F, 293–1522 K)	0,28 (0,5)	–
Слюда (магневая)	0,27 (0,49)	0,144 (0,260)
Слюда (природная, мусковит)	0,18 (0,32)	–
Слюда (керамопластичная)	0,067 (0,12)	0,062 (0,11)
Слюда, связанная со стеклом	0,057 (0,10)	–
Графит общего назначения	0,064 (0,115)	0,055 (0,099)

^c Зависит от степени стабилизации.

Диэлектрическая прочность неметаллов ^а , Вольт/мил (10^3 В/м)		
Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Полифторалкокси	2000 (78,7)	—
Слюда слоистая (0,125 дюйма)	2000 (78,7)	1000 (39,37)
Хлорированный поливинилхлорид	1500 (59,1)	1220 (48,0)
Поливинилхлорид, сополимер винилхлорида с винилацетатом, жесткий	1400 (55,1)	725 (28,5)
Иономер	1000 (39,4)	—
Полиэфир, термопластичные, полибутillen- и тетраметилентерефталаты, ненаполненные	750 (29,5)	540 (21,2)
Полиэфир, термопластичный, полибутилентерефталат с 30% стекла	750 (29,5)	—
Полиметилпентен	700 (27,6)	—
Смесь полиакрилата с поливинилхлоридом	670 (26,37)	430 (16,9)
Полиалломер	650 (25,6)	500 (19,7)
Полипропилен общего назначения	650 (25,6)	—
Полипропилен ударопрочный	650 (25,6)	450 (15,7)
Полистирол ударопрочный	650 (25,6)	300 (11,8)
Смесь АБС-пластика с жестким поливинилхлоридом	600 (23,6)	—
Ацетат целлюлозы	600 (23,6)	250 (9,8)
Полихлортрифторэтилен	600 (23,6)	530 (20,9)
Перфтор(этиленпропиленовые) сополимеры	600 (23,6)	500 (19,7)
Полибутдиены	600 (23,6)	400 (15,7)
Полифениленсульфид, ненаполненный	595 (23,4)	—
Полиацетали с 20–25% стекла	580 (22,8)	500 (19,7)
Полиимиды, ненаполненные	560 (22,0)	310 (12,2)
Сополимер этилена с этилакрилатом	550 (21,7)	—
Полиакрилаты	530 (20,9)	400 (15,7)
Сополимер этилена с этилацетатом	525 (20,7)	—
Сополимер стирола с акрилонитрилом, наполненный 30% стекла	515 (20,3)	—
Полистирол общего назначения	>500 (>19,7)	—
Полиацетали, ненаполненные	500 (19,7)	—
Политетрафторэтилен	500 (19,7)	400 (15,7)
Слюда, связанная со стеклом	500 (19,7)	—
Смолы на основе феноленоксида, ненаполненные	500 (19,7)	400 (15,7)
Фарфор глазурованный	500 (19,7)	400 (15,7)
Сополимер стирола с акрилонитрилом, ненаполненный	500 (19,7)	400 (15,7)
Фторполимеры — сополимеры этилена с тетрафтор- и хлор-трифторэтиленом, ненаполненные	490 (19,3)	—
Полифениленсульфид	490 (19,3)	—
Полиэтилены, высокой и низкой плотности, а также высокомолекулярные	480 (18,9)	—
Полисульфон с 30 и 40% стекла	480 (18,9)	—
Полипропилен, стеклонеполненный	475 (18,7)	317 (12,5)
Полиамиды общего назначения	470 (18,5)	385 (15,2)
Ацетат-пропионат целлюлозы	450 (17,7)	300 911,8)
Диаллилфталат, наполненный	450 (17,7)	350 913,8)
Полиамиды с 39% стекла	450 (17,7)	400 915,7)

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Поликарбонат, ненаполненный	450 (17,7)	380 915,0)
Поликарбонат с 40% стекла	450 (17,7)	–
Полиамидимид	440 (17,3)	430 (16,9)
Смесь АБС-пластика с полиарилсульфоном	430 (16,9)	–
Фенольные смолы	425 (16,7)	200 (7,8)
Полисульфон, ненаполненный	425 (16,7)	–
АБС-пластик	415 (16,3)	300 (11,8)
Ацетат-бутират целлюлозы	400 (15,7)	250 (9,8)
Керамопластики	400 (15,7)	270 (10,6)
Меламиновые смолы с целлюлозным наполнителем электротехнического назначения	400 (15,7)	350 (13,8)
Фенольные смолы, теплостойкие, литьевые марки	400 (15,7)	210 (8,3)
Фенольные смолы, ударопрочные, литьевые марки	400 (15,7)	300 (11,8)
Полистирол с 30% стекла	396 (15,6)	–
Алкидные смолы	350 (13,8)	290 (11,4)
Полиарилсульфон	350 (13,8)	–
Поликристаллическое стекло	350 (13,8)	250 (9,84)
Фенольные смолы общего назначения, литьевые марки	340 (13,4)	234 (9,2)
Керамика – окись алюминия	300 (11,81)	200 (7,87)
Мулит	300 (11,81)	–
Алкилдигликолькарбонат	290 (11,4)	–
Стеатит	280 (11,02)	145 (5,71)
Поливинилиденфторид	260 (11,2)	–
Циркон	250 (9,84)	–
Форстерит	250 (9,84)	–
Кордиерит	230 (9,06)	140 (5,51)

Диэлектрические постоянные неметаллов^a

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Керамика – окись алюминия	10,0	8,0
Циркон	10,0	8,0
Нитрид кремния	9,4	–
Слюда	18,7-5,4	–
Меламиновые смолы	7,9	5,2
Поливинилиденфторид	7,5	–
Поликристаллическое стекло	7,13	5,62
(при 10 ³ Гц)		
Ацетат целлюлозы	7,0	3,2
Мулит	7,0	6,5
Фенольные смолы	7,0	4,0
Керамопластик	6,9	6,8
Алкидные смолы	6,8	4,5
Слюда, связанная со стеклом	6,7	–
Форстерит	6,5	6,2

^a При частоте 10⁶ циклов/с (10⁶ Гц), если иное не указано в таблице.

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Стеарит	6,3 (при 60 Гц)	5,9
Кордиерит	6,23	4,02
Ацетат-бутират целлюлозы	6,2	3,2
Полиэфир, термореактивный, литьевой, нежесткий	6,1	3,7
Полиамиды с 30% стекла	5,4	3,5
Эпоксидные смолы	5,2	2,78
Эпоксидные смолы, автоклавного отверждения	5,1	4,3
Нитрид бора	4,8	4,1
Полиэфиры, термореактивные, общего назначения, для литья под давлением	4,75	4,55
Стекло боросиликатное	4,6	—
Полиэфир, термореактивный, литьевой, жесткий	4,4	2,8
Кремнийорганические смолы	4,3	3,4
Полиацеталь, гомополимер, с 20% стекла	4,0	—
Полистирол общего назначения	4,0	2,4
Полиацетали, сополимеры, с 25% стекла	3,9	—
Полиамидимиды	3,9	3,8
Полиимиды, ненаполненные	3,9	3,5
Полифениленсульфиды с 40% стекла	3,9	—
Алкилдигликолькарбонаты	3,8	3,5
Стекло, 96% силикатное	3,8	—
Стекло, плавляная окись кремния — кварц	3,8	—
Полиамды общего назначения	3,8	3,5
Полиацетали, ненаполненные	3,7	—
Ацетат-пропионат целлюлозы	3,7	3,4
Полиарилсульфон	3,7	—
Полиэфир, термопластичный, полибутилентерефталат с 30% стекла	3,7	—
Смесь АБС-пластика с поликарбонатом	3,6	3,2
Полиэфирсульфон	3,5	—
Поликарбонат с 40% стекла	3,48	—
Смесь полиакрилата с поливинилхлоридом	3,44	3,06
Полисульфон с 30 и 40% стекла	3,4	—
Сополимер стирола с акрилонитрилом, наполненный 30% стекла	3,4	—
Полибутадиены	3,3	—
АБС-пластик	3,2	2,4
Полиэфиры, термопластичные, полибутилен- и тетраметилтерефталаты, ненаполненные	3,2	3,1
Полифениленсульфид, ненаполненный	3,2	—
Полипропилен	3,2	2,0
Смесь АБС-пластика с полиарилсульфоном	3,10	—
Поликарбонат, ненаполненный	3,1	3,0
Полисульфон, ненаполненный	3,0	—
Сополимер стирола с акрилонитрилом	3,0	2,6
Полистирол с 30% стекла	3,0	—

Материал	Наибольшее значение	Наименьшее значение
Смолы на основе фениленоксида с 20 и 30% стекла	2,9	–
Полиакрилаты	2,9	2,5
Смолы на основе фениленоксида, ненаполненные	2,7	2,6
Полистирол общего назначения	2,7	2,5
Сополимеры этилен с тетрафторэтиленом и этилена с хлортрифторэтиленом	2,5	–
Полыхлортрифторэтилен	2,4	2,3
Полибутилен, сополимеры	2,25	2,18
Полибутилен, гомополимер	2,25	–
Фторполимеры — сополимеры этилена с тетрафтор- и хлортрифторэтиленом, ненаполненные	2,1	–
Перфтор(этиленпропиленовые) сополимеры	2,1	–
Полыхлортрифторэтилен	2,1	–
Полиметилпентен	2,1	–
Пенопласт на основе полиэтилена	1,84	1,05
Пенопласты, жесткие, без поверхностного слоя	1,1	2,0

11. Выбор пластмасс в зависимости от назначения

Назначение	Наилучший	Хороший	Удовлетворительный	Рискованный
Теплостойкость	Полиэфиримид Полифениленсульфид Полиэфир (стекло-наполненный) Жидко-кристаллические полимеры Композиции, армированные стеклом	Полиамиды Поликарбонат Смесь полифениленоксида с полистиролом Смесь полифениленоксида с полиамидом Полистирол	Полиакрилаты Полиацетат Смесь поликарбоната с полиэфиром АБС-пластик Полипропилен Сополимер акрилонитрила со стиролом Смесь сополимера акрилонитрила со стиролом и поливинилхлорида	Поливинилхлорид Смесь поливинилхлорида с АБС-пластиком
Химическая стойкость	Жидко-кристаллические полимеры Полиамиды Полиацетали Полиэфир Полиэфиримид Полифениленсульфид	Смеси поликарбоната с полиэфиром Поливинилхлорид	Полиакрилаты Поликарбонат Смесь полифениленоксида с полистиролом АБС-пластик Полистирол Сополимер акрилонитрила со стиролом	Нет

Назначение	Наилучший	Хороший	Удовлетворительный	Рискованный
	Смеси полифенилен-оксида с полиамидами Полиэтилен Полипропилен		Смесь сополимера акрилонитрила со стиролом и поливинилхлорида	
Размерная стабильность	Жидкокристаллические полимеры Поликарбонат Полиэфиримид Композиции, армированные стеклом Поливинилхлорид	Полиакрилаты Поликарбонат Смесь полифениленоксида с полистиролом Смесь поликарбоната с полиэфиром АБС-пластик Сополимер акрилонитрила со стиролом Смесь сополимера акрилонитрила со стиролом и поливинилхлорида Полифениленсульфид Смесь АБС-пластика с поливинилхлоридом Полистирол	Полиэтилен Полипропилен	Полиэтилен Полипропилен
Прочность	Жидкокристаллические полимеры Полиэфиримид Смеси полифенилен-оксида с полиамидами Полиэфир (стеклонаполненный) Композиции, армированные стеклом Полифениленсульфид	Полиацетали Полиакрилаты Полиамиды Смесь полифениленоксида с полистиролом АБС-пластик Смесь АБС-пластика с поливинилхлоридом Полистирол	Смесь поликарбоната с полиэфиром Смесь сополимера акрилонитрила со стиролом и поливинилхлоридом Сополимер акрилонитрила со стиролом Полвинилхлорид	Полиэтилен Полипропилен
Жесткость	Жидкокристаллические полимеры Полиэфир (стеклонаполненный) Композиции, армированные стеклом	Полиацетали Полиакрилаты Полиамиды Полиэфиримид Полвинилхлорид Поликарбонат	Смеси полифениленоксида с полиамидами Смесь поликарбоната с полиэфиром	Полиэтилен Полипропилен

Назначение	Наилучший	Хороший	Удовлетворительный	Рискованный
Стойкость к удару	Полифениленсульфид	Смесь полифениленоксида с полистиролом АБС-пластик Смесь АБС-пластика с поливинилхлоридом Полистирол	Смесь сополимера акрилонитрила со стиролом поливинилхлорида Сополимера акрилонитрила со стиролом	
	Поликарбонат Смесь поликарбоната с полиэфиром	Смесь полифениленоксида с полистиролом АБС-пластик Сополимер акрилонитрила со стиролом Смесь сополимера акрилонитрила со стиролом и поливинилхлорида Поливинилхлорид	Полиамиды Полиацетали Смеси полифениленоксида с полиамидами Полиэфиримид АБС-пластик, армированный волокнами Полистирол, ударопрочный Полипропилен	Полиакрилаты Композиции, армированные стеклом Смесь АБС-пластика с поливинилхлоридом Полифениленсульфид Полиэтилен Полистирол, наполненный стеклом

12. Организации, подтверждающие возможность использования пластмасс

В этой таблице перечислены различные полимерные материалы и агентства или организации, ответственные за выдачу разрешений на использование этих материалов.

Наименование материала	Цвет	FDA	USDA	NSF	3A Dairy	AG Canada	USP Class IV
АБС-пластик	Натур.	✓	✓	✗	✓	✗	✗
Полиацетали, сополимеры	Натур.	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Celazole PBI, полибензимидазол	Черный	✗	✗	✗	✗	✗	✗
CPVC	Серый	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Duratron, полиимид	Разный	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Delrin, полиацеталь, сополимер	Натур.	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Derlin AF, смесь полиацетата с политерфторэтиленом	Коричн.	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Ertalyte PET-P	Натур.	✓	✓	✗	✓	✓	✗
Ertalyte PET-P	Черный	✓	✓	✗	✗	✗	✗

Наименование материала	Цвет	FDA	USDA	NSF	3A Dairy	AG Canada	USP Class IV
<i>Fluorosint</i> 207, политетрафторэтилен, наполненный слюдой	Натур.	✓	✓	✗	✗	✗	✗
<i>Fluorosint</i> 500, политетрафторэтилен, наполненный слюдой	Натур.	✗	✗	✗	✗	✗	✗
<i>Halar ECTFE</i> , полихлор-трифторэтилен	Натур.	✓	✗	✗	✗	✗	✗
<i>Hydrex</i> 4101, полибутилентерефталат	Натур.	✓	✓	✓	✓	✗	✗
<i>Hydrex</i> 4101, полибутилентерефталат	Черный	✓	✓	✗	✗	✗	✗
<i>Hydrex</i> 4101L, полибутилентерефталат со смазкой	Натур.	✓	✓	✗	✓	✗	✗
<i>Hydlar ZF Kevlar</i> , армированный полиамид	Натур.	✓	✓	✗	✓	✗	✗
<i>Kynar PVDF</i> , поливинилиденфторид	Натур.	✓	✓	✓	✓	✗	✓
<i>MC901</i> , термостабилизированный литевой полиамид 6	Синий	✗	✗	✗	✗	✗	✗
<i>MC907</i> , литевой полиамид 6	Натур.	✓	✓	✗	✗	✗	✗
<i>Noryl</i> , модифицированный полифениленоксид	Черный	✓	✓	✗	✗	✗	✗
<i>Nylon</i> , экструзионная марка полиамида 66	Натур.	✓	✓	✓	✓	✗	✗
<i>Nylatron</i> , все марки полиамидов 6 и 66 со смазкой	Серый, синий	✗	✗	✗	✗	✗	✗
<i>Nyloil-FG</i> , допущенные к контакту с пищевыми продуктами маслonaполненный литевой полиамид 6	Натур.	✓	✓	✗	✓	✗	✗
<i>PEEK</i> , полиэфирэфиркетон	Натур.	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Стандартные марки поликарбоната	Натур.	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Поликарбонат, допущенный к контакту с пищевыми продуктами	Натур.	✓	✗	✓	✗	✓	✓
Полиэтилен низкой плотности	Натур.	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Полиэтилен высокой плотности	Натур.	✓	✓	✗	✗	✗	✗

Наименование материала	Цвет	FDA	USDA	NSF	3A Dairy	AG Canada	USP Class IV
Полиэтилен высокой плотности — трубные марки	Черный	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Полиэтилен <i>UHMW</i> , сверхвысокомолекулярный	Натур.	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Полипропилен, гомополимер	Натур.	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Полисульфон, стандартные марки	Натур.	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Полисульфон, пищевые марки	Натур.	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Поливинилхлорид, тип I	Серый	✗	✗	✗	✗	✗	✗
<i>Rade</i> ® A, полиэфирсульфон	Натур.	✓	✗	✓	✗	✗	✗
<i>Rade</i> ® R, полиарилэфирсульфон	Натур.	✗	✗	✗	✗	✗	✓
<i>Rulon</i> ® 641, наполненный политетрафторэтилен	Белый	✓	✗	✗	✗	✗	✗
<i>Techtron PPS</i> , полифениленсульфид	Натур.	✗	✗	✗	✗	✗	✗
<i>PTFE</i> , политетрафторэтилен	Белый	✓	✗	✗	✗	✗	✗
<i>FEP</i> , политетрафторэтилен-перфторпропилен)	Белый	✓	✗	✗	✗	✗	✗
<i>PFA</i> , перфторалкокси	Белый	✓	✗	✗	✗	✗	✗
<i>Torlon PAI</i> , полиамидимиды (все марки)	Разный		✗	✗	✗	✗	✗
<i>Utem</i> ® 1000, полиэфиримид	Натур., черный	✓	✗	✗	✗	✗	✗
<i>VespeI PI</i> , полиимид (все марки)	Разный	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Любые все марки пластмасс, армированных стеклянными, угольными волокнами и т. д.	—	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Примечание. Вся информация, включенная в эту таблицу, предоставлена ответственными производителями и поставщиками полимерных материалов, и может быть изменена без дополнительных уведомлений. Потребители должны проверить, какой организацией в настоящее время подтверждено качество продукции, прежде чем указывать это в спецификации на материал.

полипропилен. Система *MatWeb* находится в свободном доступе, и для ее использования не требуется регистрации.

Система *MatWeb* была организована группой инженеров, которые были заинтересованы в наличии у них доступной базы данных о свойствах полимерных материалов, которая бы позволила избежать поисков необходимых сведений в технических статьях и книгах. Эта небольшая группа инженеров выросла в ныне существующую компанию *Automation Creation, Inc.*

<http://www.matweb.com/>

Plastics TechnologyTM: База данных по свойствам материалов

Эта компания предлагает осуществить поиск материала с интересующими потребителя свойствами по имеющейся у них базе данных в три этапа:

Первый этап: использование специальных «фильтров» для того, чтобы отобрать материал, удовлетворяющим требованиям заказчика.

Второй этап: определить какие именно свойства должны быть представлены в информационном листке.

Третий этап: сформировать этот листок.

<http://www.plastictechnology.com/>

<http://www.Plaspec.com/>

CAMPUS

CAMPUS (Computer-Aided material Preselection by Uniform Standards). Эта поисковая система оказалась наиболее успешной и широко используемой программой для поиска полимерных материалов. В настоящее время более 50 производителей пластмасс по всему миру предоставляют технические данные, касающиеся производимых материалов, используя систему *CAMPUS*.

Более 200 000 экземпляров копий распространено по всему миру.

Этот замечательный успех основан на уникальной концепции, которая использует единый протокол для сбора и представления данных и удобную для использования компьютерную программу поиска. *CAMPUS* — это первая и единственная в настоящая время база данных, которая позволяет осуществлять реальное сопоставление свойств материалов, получаемых от различных производителей. Поиск данных, предоставляемых компаниями-участниками, осуществляется с использованием программного обеспечения *Windows*, бесплатно. Данные, включенные в систему *CAMPUS*, можно найти на сайте:

www.campusplastics.com

M-Base Engineering + Software

M-Base является ведущей международной организацией, которая предоставляет следующую информацию:

- базы данных по свойствам материалов;
- информационные системы по материалам;
- информационные системы по производимым изделиям;
- программы моделирования материалов.

<http://www.m-base.de>

Приложение J

Образовательные программы принятые в США и Канаде, по специальностям пластмассы/полимеры¹

Университет штата Массачусетс, Лоуэлл (*University of Massachusetts*)

B.S. —Plastics Engineering (оборудование для пластмасс).

M.S. —Plastics Engineering (оборудование для пластмасс).

D. Eng. — Докторантура по специальности «оборудование для пластмасс».

Отдел (кафедра) оборудования для пластмасс был создан в 1954 г. по рекомендации совета, состоящего как из преподавателей, так и представителей промышленности.

Программа для получения степени *B.S.* была составлена в 1958 г. и с 1977 г. ежегодно проходила аккредитацию в *A.B.E.T.* Соответствующие последующие программы были предложены в 1968 г. для получения степени *M.S.* в 1968 г. и степени *Ph. D.* по химии в 1980 г. с возможностью получения степени по науке о полимерах. Оборудованию для пластмасс, *D. Eng.* по производству пластмасс, включая переработку. Создание материалов и конструирование изделий. Кафедра состоит из 15 специалистов, имеющих различное образование и, в своем большинстве, опыт работы в промышленности.

Основной задачей кафедры оборудования для пластмасс Массачусетского университета (в г. Лоуэлл) является разработка образовательных и исследовательских программ для студентов, которые позволили бы им осуществить успешную карьеру, а также способствовать развитию и поддержке исследовательских работ в промышленном секторе.

Создаваемые программы должны обеспечивать хорошо сбалансированный уровень базового образования, который бы позволил инженеру успешно работать по выбранной специальности. Программа нацелена на подготовку студента к профессиональной работе в промышленности полимерных материалов, в первую очередь, пластмасс, а кроме этого, в производстве искусственных волокон, эластомеров, покрытий и адгезивов. Программа также обеспечивает серьезную подготовку в

¹ При переводе сохранены сокращенные обозначения специальностей и программ, принятых в США и Канаде, а именно:

A.A.S. — Associate of Applied Science — Ассоциация прикладной науки.

A.B.E.T. — Accreditation Board for Engineering and Technology — Совет по аккредитации в области инженерных специальностей и технологий.

B.S. — Bachelor of Science — Бакалавр в области научных исследований.

B.S.E.T. — Bachelor in Science and Technology — Бакалавр в области научных исследований и технологий.

D.E.C — Digital Equipment Corporation — Корпорация оборудования в области вычислительной техники.

D. Eng — Doctor of Engineering — Доктор наук в области инженерных дисциплин (аналог российской степени кандидата наук).

M.S.- Master of Science — Магистр в области научных исследований.

Ph. D — Doctor of Philosophy — Доктор философии (аналог российской степени кандидата наук) — *Примеч. пер.*

фундаментальной науке и инженерных дисциплинах, и дополнительно к этому, подробное ознакомление с полимерными материалами, их свойствами, переработкой и конструированием изделий. Выпускники кафедры достаточно хорошо подготовлены, чтобы вести более глубокие поисковые работы, способствующие их карьере в области исследований, развития, производства материалов и преподавания.

Благодаря уникальности программ подготовки инженеров в области оборудования для пластмасс в массачусетском университете, в других американских университетах не существует сопоставимых групп.

Кафедра оборудования для пластмасс, как об этом свидетельствуют различные международные оценки, занимает ведущее положение в мире. Уровень преподавателей кафедры хорошо известен во всем мире. Сотрудники кафедры очень активно участвуют в работе профессиональных сообществ как на локальном, так и на общенациональном уровне. Трое сотрудников кафедры входят в число членов редколлегий ведущих научных журналов. Трое сотрудников являются членами профессионального общества *SPE*. Обычно сотрудники кафедры публикуют от 30 до 50 статей в год. Некоторые из этих статей отмечены премиями как лучшие публикации года. Кафедра проводит наиболее успешные в стране семинары для промышленности. Для улучшения качества программ была организована группа советников в составе 70 человек, представляющих промышленность, которая собирается раз в полгода.

В состав кафедры входят пять лабораторий с малогабаритным промышленным оборудованием по переработке пластмасс. Это литьевое и компрессионное формование, экструзия, выдувное оборудование, термоформование и оборудование для изготовления композиционных материалов. Кроме того, на кафедре имеются четыре испытательных лаборатории — реологии, механических свойств, термических и электрических свойств, проницаемости и ускоренного старения. Дополнительно кафедра взаимодействует с исследовательской группой, занимающейся полимерами на кафедре химии, которая располагает превосходным набором методов для характеристики полимеров.

Институт инноваций в области полимеров создал высококачественную лабораторию по переработке полимеров, включающую мощности по литью под давлением и экструзии, а также испытательную лабораторию, компьютерный класс и другие небольшие лаборатории, а также помещения для конференций, проведения рабочих совещаний, офисы для преподавателей и студентов.

Программа занятий для студентов, специализирующихся в области оборудования для пластмасс, включает в себя следующие курсы: основы конструирования оборудования, теоретическая механика, проектирование изделий из пластмасс, научное машиностроение, полимерные материалы, конструирование литьевых форм, методы контроля производства, основы создания конструкций, структура и свойства полимеров, физические методы.

Студенты также имеют возможность поработать в лабораториях, в которых занимаются компьютерным программированием, изучением структуры, переработкой и производством полимерных материалов, разработкой биоразлагаемых полимеров и инновациями в области пластмасс.

Со дня своего основания кафедра выпустила более 4000 специалистов, которые были востребованы и хорошо приняты и промышленностью пластмасс по всему миру.

Государственный университет Феррис (*Ferris State University*)

A.A.S. Технология пластмасс.

B.S. Технология оборудования для пластмасс.

Программа по полимерам в университете Феррис начала функционировать с 1969 г., когда руководство университета решило включить исследование технологии пластмасс в его расширяющиеся программы *A.A.S.*

Постоянная востребованность этой программы и ее успех повлекли за собой создание программы более высокого уровня, ориентированной на получение степени *B.S.* по технологии оборудования для пластмасс, которая действует с 1982 г. Эта программа сосредоточена в большей мере на производстве, нежели исследованиях и развитии, позволяя студентам, претендующим на эту степень, собственном опыте ознакомиться с технологией производства изделий из полимеров.

Студенты, занимающиеся по этой программе, изучают, как произвести запуск, осуществлять процесс и преодолевать трудности при работе оборудования для переработки пластмасс. Они также анализируют результаты лабораторных испытаний полимерных материалов с целью понять их свойства и эксплуатационные характеристики. В программу обучения входят изучение того, как происходит перемещение материалов, определение стоимости, контроль качества, выбор расположения производственного оборудования. Использование компьютеров для решения производственных задач.

Между младшими и старшими курсами студенты обязательно проходят летнюю производственную практику, что позволяет студентам получить реальный опыт и применить свои знания в промышленности пластмасс.

Новое здание технологического отдела оборудования для пластмасс размещено в кампусе университета. В нем располагаются лаборатории испытаний материалов, контроля качества, производства материалов, крашения и декорирования, изготовления композитов и переработки пластмасс. В лабораториях, занимающихся переработкой пластмасс, имеется оборудование для литья под давлением, экструзии, выдувного формования, термоформования, и мастерская по ремонту литьевых форм.

Государственный университет Шоуни (*Shawnee State University*)

A.A.S. Технология пластмасс.

B.S. Технология оборудования для пластмасс.

Задачей программы обучения по технологии оборудования для пластмасс является подготовка студентов к тому, чтобы они стали ценными и необходимыми сотрудниками при работе в промышленности пластмасс. Программа *A.A.S.* включает изучение базовых курсов по свойствам полимерных материалов, технологии литья под давлением, экструзии, литья термореактивных материалов, и производства пластмасс в целом. Студенты, получившие образование по программе *A.A.S.*, имеют дополнительную возможность непосредственно перейти на двухгодичную программу подготовки к получению степени *B.S.*

Программа получения степени *B.S.* сосредоточивает усилия на изучении технологии переработки полимеров и включает в себя изучение таких вопросов, как проектирование литьевых форм и методы производства. В рамках этой программы происходит изучение таких курсов, как передовые методы переработки, организация производства на заводе в целом, испытания пластмасс, формование композитов, проектирование деталей из пластмасс, проектирование форм, анализ полимеров.

Восточный Мичиганский университет (*Eastern Michigan University*)

B.S. Технология полимеров.

Программа по изучению технологии пластмасс в этом университете составлена таким образом, чтобы выпускники получили широкие представления о промышленности пластмасс, полимерных материалов, переработки пластмасс, конструирования изделий из пластмасс, технологии отделки и декорирования. В программу входит изучение основ фундаментальных дисциплин, которые призваны дать студентам фундаментальные и прикладные знания.

К числу обязательных курсов относятся: полимерные материалы, переработка пластмасс, проектирование и конструирование форм, конструирование изделий, производство и декорирование. Студенты, обучающиеся по этой программе, также имеют возможность пройти практику в компаниях, с которыми университет осуществляет кооперацию в соответствующих областях.

Западный Вашингтонский университет (*Western Washington University*)

B.S. Технология переработки полимеров.

Обучение студентов этого университета, занимающихся по программе технологии переработки полимеров, включает такие курсы, как структура и состав полимеров, методы их производства, основы проектирования изделий, современные методы получения композитов и полимерных материалов. Задачей этой программы обучения является подготовка технологов, которые понимают и могут применить свои знания при обслуживании оборудования для переработки полимерных материалов.

Программа подготовки технологов по переработке пластмасс в меньшей степени теоретическая, нежели направленная на решение типовых инженерных задач при их практическом применении.

В лабораториях, связанных с выполнением этой программы, имеется литьевая машина с микропроцессорной системой контроля, экструдер с профилирующими головками, оборудование для производства пленок и листов, оборудование для выдувного формования, термоформования, намоточные устройства и пресс.

Лаборатория для испытаний пластмасс оснащена всеми типами стандартного испытательного оборудования, включая реометр и везерометр. Компьютерные возможности включают моделирование поведения твердых материалов, программное обеспечение для расчета заполнения форм, а также 20-позиционная система автоматического проектирования.

Для того чтобы студенты могли лучше понять, как изготавливаются литьевые формы и формующие головки, имеется специализированная мастерская.

Питтсбургский университет (*Pittsburg State University*)

B.S.E.T. Технология переработки полимеров.

При обучении студентов технологии переработки полимеров по программе *B.S.E.T.* основное внимание обращается на технические знания и их приложение в промышленности. Предметы, которые изучаются в университете, включают как общую технологию и переработку, так и конкретные вопросы проектирования изделий и изготовления форм. В программу также входят такие дисциплины, как технология решения проблем как в процессах производства, так и управления.

Студенты могут выбирать между вопросами производства, куда входят статистический контроль производства и технология переработки или же проектирование форм, где основное внимание обращается на задачи конструирования изделий. Студентам также предоставляется возможность приобретения личного опыта работы на местных предприятиях, с которыми университет осуществляет взаимодействие.

В лаборатории, где происходит подготовка студентов по специальности «технология переработки полимеров», есть 42 установки, на которых осуществляется производство и испытания полимеров.

Некоторые другие учебные организации, которые предлагают студентам программы, связанные с полимерами, перечислены ниже в таблице. ►

Приложение К

Новая форма опросного листа, используемого при подборе требуемого материала (с разрешения *Bayer Corporation*)

Новая форма опросного листа частично была приведена на рис. 15.5. Ниже дается полная форма.

Организация	2 года	4 года	Степень	Степень
Колледж Ахунтик, Монреаль, <i>QUE</i> , Канада				<i>D.E.C.</i> — Технология полимерных материалов
Колледж округа Беркшир, <i>Pittsburg, MA</i> 01201	✓			<i>A.A.S.</i> — Изготовление форм
Университет штата Калифорния в Лонг Бич, <i>Long Beach, CA</i> 90840		✓	✓	<i>B.A., M.A.</i> — Переработка полимеров, конструирование, преподавание
Университет штата Калифорния в Помоне, <i>Pomona, CA</i> 91768				Сертифицированная программа по оборудованию для переработке пластмасс
Университет штата Калифорния в Чико, <i>Chico, CA</i> 95929		✓		<i>B.S.</i> — Промышленная технология (производство пластмасс — дополнительно)
Университет штата Калифорния во Фресно, <i>Fresno, CA</i> 93740				<i>B.S.</i> — Промышленная технология (пластмассы — дополнительно)
Университет Карнеги-Меллон, <i>Pittsburg, PA</i> 5213			✓	<i>M.S., Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры)
Резервный Западный Университет Кейз,				<i>B.S.</i> — Оборудование (в основном наука о полимерах)
Университет Кливленда, <i>Cleveland, OH</i> 44106	✓	✓		<i>M.S., Ph.D.</i> — Наука о полимерах
Центральный технический колледж Каролины, <i>Sanford, NC</i> 27330	✓	✓		Дипломы по инструментам и конструированию головок
Колледж Серитос, <i>Norwalk, CA</i> 90610	✓			<i>A.A.S.</i> — Технология изготовление изделий из пластмасс
Технический колледж штата Цинцинати, <i>Cincinnati, OH</i> 45223	✓			<i>A.A.S.</i> — Технология изготовления оборудования для переработки пластмасс
Колледж региона Квебек, <i>Quebec G6G 1N1</i> , Канада	✓			<i>A.A.S.</i> — Технология переработки пластмасс
Колледж ДюПейдж, <i>Glen Ellyn, IL</i> 60137	✓			<i>A.A.S.</i> — Технология полимеров
Общественный колледж штата Род Айленд, <i>Warwick, RA</i> 02886	✓			<i>A.A.S.</i> — Технология получения полимеров
Региональный колледж Кумберленда, <i>Vineland, NJ</i> 08360-0517	✓			<i>A.A.S.</i> — Технология полимеров
Общественный колледж округа ДеэМойнс, <i>Ankeny, IA</i> 50021				<i>A.A.S.</i> — Прикладная наука (конструирование инструмента и головок)
Университет Дрексела, <i>Philadelphia, PA</i> 19104		✓	✓	<i>B.S.</i> — Оборудование для производства материалов (специализация — полимеры)
Восточный Мичиганский университет, <i>Ypsilanti, MI</i> 48176		✓	✓	<i>B.S.</i> — Технология полимеров

Организация	2 года	4 года	Степень	Степень
Колледж округа Элджин, <i>Elgin, IL 60123</i>	✓			Сертификат по литью под давлением термопластов
Колледж округа Эль Пасо, <i>El Paso, TX 79998</i>				Сертифицированная 480-часовая программа
Университет Феррис, <i>Big Rapids, MI 49307</i>	✓	✓		A.A.S., B.S. — Оборудование и технология переработки пластмасс
Колледж округа Фичбург, <i>Fitchburg, MA 01429</i>	✓	✓		Сертификат по технологии полимеров (Институт <i>Nyrpro</i>)
Атлантический университет штата Флорида, <i>Boca Raton, FL 33431</i>	✓			B.S. — Промышленная технология
Институт технологии штата Джорджия, <i>Atlanta, GA 30332</i>			✓	Химия полимеров
Колледж в Гранд Рэпидс, <i>Grand Rapids, MI 49503</i>	✓			M.S., Ph.D. — Оборудование для химической и текстильной промышленности (в основном — полимеры)
Технический колледж Хеннепин, <i>Brooklyn Park, MN 55445</i>	✓			A.A.S. — Технология полимеров
Технологический институт штата Иллинойс, <i>Chicago, IL 60616</i>		✓	✓	A.A.S. — Технология полимеров
Каникулярный технический колледж штата Индиана, <i>Indianapolis, IN 46206</i>	✓			B.S., M.S., Ph.D. — Оборудование химической промышленности (дополнительно — полимеры)
Каникулярный технический колледж штата Индиана, <i>South Bent, IN 46619</i>	✓			A.A.S. — Сертификат по технике производства изделий из пластмасс
Колледж общины Долины Каламазу, <i>Kalamazoo, MI 49009</i>	✓			A.A.S. — Производство изделий из пластмасс
Технический колледж в Лейкшор, <i>Cleveland, WI 53015</i>	✓			A.A.S. — Технология полимеров
Колледж Лэней, <i>Oakland, CA 94607</i>	✓			A.A.S. — Прикладная наука (в основном — полимеры)
Университет Лехай, <i>Bethlehem, PA 18015</i>		✓	✓	Сертификат по технологии пластмасс
Колледж округа Лорейн, <i>Elyria, OH 44035-1691</i>				M.S., Ph.D. — Наука о полимерах и оборудование
Технический и торговый колледж Лос Анжелеса, <i>Los Angeles, CA 90015</i>	✓			A.A.S. — Оборудование и технология промышленного производства (дополнительно — полимеры)
Университет МакМастер, <i>Hamilton, Ontario, L9N 4M6</i> , Канада			✓	A.A.S. — Технология полимеров
				M. Eng., Ph.D. — Оборудование химической промышленности (в основном — полимеры)

Мичиганский технологический университет, <i>Houghton, MI 49931</i>	✓	✓	<i>B.S., M.S., Ph.D.</i> — Химия и оборудование химической промышленности (дополнительно — полимеры)
Технический колледж округа Милуоки, <i>Milwaukee, WI 53233</i>	✓		Технология полимеров. Диплом по промышленности полимеров (1 год обучения)
Университет в Морхеде, <i>Morehead, KI 40351</i>	✓		<i>B.S.</i> — Промышленная технология (дополнительно — полимеры)
Колледж в Моррисвиле, <i>Morrisville, NY 13508</i>	✓		<i>A.A.S.</i> — Технология полимеров
Университет штата Северная Каролина, <i>Raleigh, NC 27695-7907</i>	✓		<i>B.S.</i> — Материаловедение и оборудование (дополнительно специализация по полимерам)
Университет Северной Дакоты, <i>Fargo, ND 58105</i>	✓	✓	<i>M.S., Ph.D.</i> — Химия (специализация по полимерам — дополнительно)
Северо-восточный Висконсинский технологический институт, <i>Green Bay, WI 54393</i>	✓		<i>A.A.S.</i> — Механическое моделирование (изготовление форм)
Институт технологии штата Северная Альберта, <i>Edmonton, Alberta, T5G 2R1</i> , Канада	✓		<i>A.A.S.</i> — Оборудование для переработки пластмасс
Северо-Иллинойский Университет, <i>Dekalb, IL 60115-2854</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Преимущественно по пластмассам
Колледж Беренд штата Пенсильвания, <i>Erie, PA 16563-0203</i>	✓	✓	<i>A.A.S.</i> — Технология полимеров
Университет штата Пенсильвания, <i>University Park, PA 16803</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Технология работы оборудования для переработки пластмасс
Государственный университет в Питтсбурге, <i>Pittsburg KS 66762</i>	✓	✓	<i>B.S.E.T.</i> — Технология переработки полимеров
Политехнический университет Бруклина, <i>NY 11201</i>	✓	✓	<i>M.S., Ph.D.</i> — Полимеры — наука и технология
Университет Руттера в Нью Брунсвике, <i>NJ 08903</i>		✓	<i>M.S., Ph.D.</i> — Материаловедение (полимеры)
Государственный университет в Сан-Диего, <i>CA 92182-0269</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Промышленная технология
Государственный университет в Сан-Франциско, <i>CA 94132</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Проектирование и производство изделий из пластмасс
Государственный университет Шоуни в Портсмуте, <i>OH 45662</i>	✓	✓	<i>A.S. B.S.</i> — Технология переработки полимеров

Организация	2 года	4 года	Степень	Степень
Стивенсовский технологический институт в Хобокене, <i>NJ 0703</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.S. Ph.D.</i> — Химия (полимеры)
Школа Стурджен Крик				Трехлетняя каникулярная программа (высшая школа)
Виннипег Маннитоба, Канада <i>R3J 1A5</i>				Сертификат обучения (по технологии полимеров)
Университет в Сиракузах, <i>NY 13200</i>	✓	✓	✓	<i>B.S.</i> — Химия (возможно — полимеры), <i>M.S. Ph.D.</i> — Защита окружающей среды (полимеры)
Государственный колледж Трентон, Хиллвуд Лейкс Трентон, <i>NJ 08630</i>	✓	✓	✓	Предлагаются избранные курсы по полимерам
Университет г. Акрон, Акрон, <i>OH 44325-0301</i>	✓	✓	✓	<i>M.S. Ph.D.</i> — Оборудование для переработки пластмасс
Университет штата Коннектикут, Сторрз, <i>CT 06288</i>	✓	✓	✓	<i>M.S. Ph.D.</i> — Материаловедение (полимеры)
Университет г. Дейтройт, <i>MI</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.Eng. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности и для переработки полимеров
Университет штата Флорида, <i>Gainesville, FL</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.S. Ph.D.</i> — Наука о полимерах и оборудование
Университет штата Иллинойс, <i>Urbana IL 61801</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.S. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры)
Университет г. Луисвилль, <i>Louisville, KY 40292</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.Eng. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности и защита окружающей среды (полимеры)
Университет г. Лоувелл, <i>Lowell, MA 01854</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.S.</i> — Оборудование переработки пластмасс; <i>B.S.</i> — Технологическое промышленного оборудования; <i>Ph.D.</i> — Оборудование для переработки пластмасс (дополнительно)
Университет в г. Ороно, <i>Orono, ME 04469</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.S. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры — дополнительно)
Университет штата Массачусетс в г. Амхерст, <i>MA 01003</i>	✓	✓	✓	<i>M.S. Ph.D.</i> — Наука о полимерах, оборудование для переработки пластмасс
Университет штата Мичиган, <i>Ann Arbor, MI 48106</i>	✓	✓	✓	<i>M.S. Ph.D.</i> — Наука о полимерах, оборудование для переработки пластмасс
Университет штата Миннесота, Миннеаполис, <i>MN 55414</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.S. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности и материаловедение (полимеры)
Университет Южной Калифорнии, <i>Los Angeles, CA 90089-1211</i>	✓	✓	✓	<i>B.S., M.S. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры)

Университет Южной Миссисипи, <i>Hattiesburg, MS 39406</i>	✓	✓	<i>B.S., M.S. Ph.D.</i> — Наука о полимерах
Университет штата Теннесси, <i>Knoxville, TN 37996-2200</i>	✓	✓	<i>M.S. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности; <i>B.S.</i> — Специализация по оборудованию для переработки пластмасс
Университет г. Толедо, <i>Toledo, OH 43606</i>	✓	✓	<i>A.A.S.</i> — Технология пластмасс; <i>B.S., M.S.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры — дополнительно)
Университет штата Юта, <i>Salt Lake City, UT 84112</i>	✓	✓	<i>B.S., M.S. M. Eng., Ph.D.</i> — Материаловедение и оборудование, специализация в области полимеров
Университет штата Висконсин, <i>Madison WI 53715</i>	✓	✓	<i>M.S. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры)
Университет штата Висконсин, Платтевилль, <i>Platteville, WI 53818</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Исследования в области промышленности с небольшой долей технологии переработки пластмасс; <i>M.S.</i>
Политехнический институт штата Вирджиния, <i>Blacksburg, VA 24061</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры)
Университет штата Вашингтон, <i>Pallman WA 99164-2920</i>	✓	✓	<i>M.S. Ph.D.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры)
Вашингтонский Университет, <i>St Louis, MO 63130</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры)
Технический колледж штата в Уотербери, <i>Waterbury, CT 06708</i>	✓	✓	Сертификат обучения (по технологии полимеров)
Уэйнский университет штата, <i>Detroit, MI 48202</i>	✓	✓	Программа дополнительного образования по программе оборудования для переработки полимеров
Западный университет штата Мичиган, <i>Kalamazoo, MI 49001</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Дизайн (пластик)
Западный университет штата Вашингтон, <i>Bell-inham, WA 98225</i>	✓	✓	<i>B.S.</i> — Оборудование химической промышленности (полимеры)

Опросный лист для выбора материала при проектировании нового изделия

Этот лист содержит перечень вопросов, которые имеют определяющее значение для выбора материала при проектировании нового изделия. Ответы на поставленные вопросы помогут для быстрого и обоснованного выбора материала

Имя _____

Потребитель _____

Дата _____

Деталь _____

Расчет времени для выполнения заказа _____

Заказчик _____

Материал, используемый в настоящее время _____

Его характеристики _____

Комментарии _____

Функции изделия — для каких целей оно предназначено? _____

Внешний вид

Прозрачное изделие

☐ Прозрачное как вода

☐ Очень прозрачное

☐ Просто прозрачное

☐ Цвет в проходящем свете

Максимальный уровень мутности _____

Максимальный уровень мутности _____

Комментарии _____

Непрозрачное изделие

☐ Блестящая поверхность

☐ Не очень блестящая поверхность

☐ Не отражающая поверхность

☐ От самого полимера

☐ После покраски

☐ От изделия, извлеченного из формы

Комментарии _____

Желательный цвет _____

☐ Цвет полимера

☐ Цвет краски

☐ Цвет покрашенного изделия

Критичность сохранения цвета _____ %

☐ При дневном свете

☐ При свете лампы накаливания

☐ При свете флуоресцентной лампы

☐ При любом свете (вариации цвета недопустимы)

Комментарии _____

Вид поверхности изделия, имеющей принципиальное значение – Пожалуйста, приложите рисунок

	Нет	Должны быть незаметны	Минимально допустимы	Непринципиально
Следы от литников	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Раковины	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Линии смятия	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Комментарии _____

Вид мест изделия, которые критичны при сборке конструкций с участием этого изделия, пожалуйста, приложите рисунок

Комментарии _____

Требуемые физические характеристики (пожалуйста, приложите чертеж)

	Не очень важно	Требуется от мате- риала	Требуется от изделия	Требуется как от материала, так и от изделия
Жесткость	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Прочность (допустимая нагрузка)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Теплостойкость	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Склонность к ползучести	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Стойкость к ударным нагрузкам	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Химическая стойкость	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Электрические характеристики	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Особенности:

Приложенная нагрузка/напряжения	<input type="checkbox"/> статическая нагрузка	<input type="checkbox"/> периодическая нагрузка	<input type="checkbox"/> циклическая нагрузка
Уровень	Нормально_____	Мин._____	Макс._____
Продолжительность действия	Нормально_____	Мин._____	Макс._____
Частота (если нагрузка циклическая)	Нормально_____	Мин._____	Макс._____
Температура	Нормально_____	Мин._____	Макс._____
Требуемая длительность эксплуатации	Нормально_____	Мин._____	Макс._____

Примечания _____

Стойкость к ударным нагрузкам

При комнатной температуре	Приемлемый уровень _____	Мин. _____
При пониженных температурах, _____ °C/°A	Приемлемый уровень _____	Мин. _____

Примечания _____

Изменения размеров

Прогиб под нагрузкой	Приемлемый уровень _____	Мин. _____
Термическое расширение	Приемлемый уровень _____	Мин. _____
Усадка после литья	Приемлемый уровень _____	Мин. _____
Ползучесть	Приемлемый уровень _____	Мин. _____

Примечания _____

Электрические свойства

Диэлектрическая постоянная	Приемлемый уровень _____	Мин. _____
Фактор потерь	Приемлемый уровень _____	Мин. _____
Объемное сопротивление	Приемлемый уровень _____	Мин. _____
Диэлектрическая прочность	Приемлемый уровень _____	Мин. _____

Примечания _____

Химическая стойкость

(перечислите химические агенты, частоту и продолжительность контактов, находится ли при этом изделие под нагрузкой — уровень напряжений/деформаций, какой должна быть химическая стойкость)

Внешний вид

	Не очень важно	Требуется от материала	Требуется от краски и т. д.
Стабильность окраски в помещении	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Стабильность окраски вне помещения	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Потеря показателей свойств вне помещения	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Примечания _____

Требуемые физические свойства – продолжение

Иные свойства

Твердость по Роквеллу Требуемый уровень _____ Минимально _____ Максимально _____

Иные характеристики свойств _____

Требуется ли утверждение материала?

☐ Гарантийной лабораторией

☐ по *UL 90* Рейтинг (классификация) _____ Толщина _____

☐ без изменения Характеристики электрических свойств _____ Механические _____ После удара _____ °C

☐ Национальная санитарная организация Тип _____

☐ Соответствие федеральным стандартам (или требованиям армейской приемки) Тип _____

☐ Канадские стандарты/Требования администрации Тип _____

☐ Ассоциация по контролю за продовольствием и лекарственными средствами Тип _____

☐ Фармакопея США Тип _____

☐ Требования автомобильной промышленности Тип _____

☐ Иные Тип _____

Технологический процесс переработки

☐ Экструзия

☐ Формование профиля

☐ Формование листа – монослой

☐ Формование листа – соэкструзия

☐ Термоформование

☐ Экструзия с раздувом

Примечания _____

☐ Литье под давлением

Примечания _____

☐ Вторичные операции

☐ Декорирование

☐ Окраска

☐ Платинирование

☐ Горячая штамповка

☐ Ламинирование

☐ Сборка

☐ Склеивание

☐ Ультразвуковая сварка

☐ Вибрационная сварка

☐ Механическая сборка

Примечания: какие детали соединяются с какими, различие в типах соединяемых пластмасс и т. д.

Дополнительные требования потребителя к выполнению тех или иных испытаний

Заключительные комментарии

Вишу Шах

СПРАВОЧНОЕ РУКОВОДСТВО ПО ИСПЫТАНИЯМ ПЛАСТМАСС И АНАЛИЗУ ПРИЧИН ИХ РАЗРУШЕНИЯ

ISBN 978-5-91703-005-0



Редактор *А.Н. Аввакумов*

Верстка и обработка иллюстраций *С.О. Киселев*

Дизайн обложки *Р.В. Бабкиной*

Корректор *О.Д. Камнева*

Издательство «Научные основы и технологии»

197342, Санкт-Петербург, а/я 20

Тел./факс: (812) 655-0837, URL: ft-publishing.ru,

e-mail: mail@ft-publishing.ru

Подписано в печать 23.01.09. Формат 70×100¹/16. Усл. п. л. 59,34

Тираж 2000 экз. (1 завод — 500 экз.) Заказ №

Отпечатано с готовых диапозитивов в ГУП «Типография «Наука»»

199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12