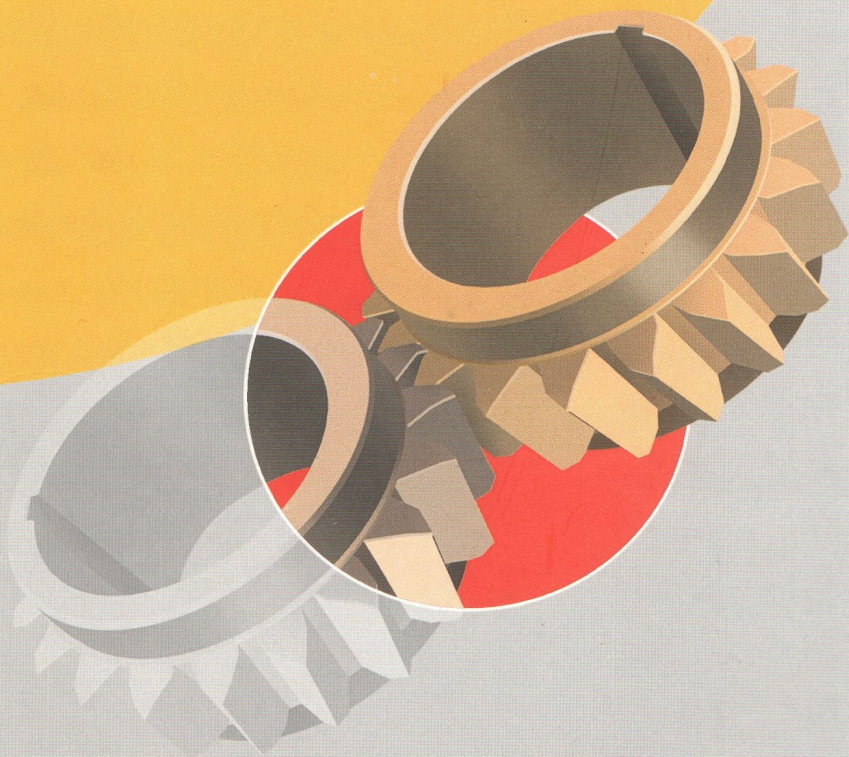


Крыжановский В.К.

ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЫБОР И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЛАСТМАСС



Крыжановский В.К.

ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЫБОР И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЛАСТМАСС

ИЗДАТЕЛЬСТВО



НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ и **ТЕХНОЛОГИИ**

Санкт-Петербург, 2009

УДК 678.01:53
ББК 22.251
К85

К85 Крыжановский В.К. **Инженерный выбор и идентификация пластмасс.** —
СПб.: Научные основы и технологии, 2009. — 204 с.

ISBN 978-5-91703-012-8

В книге впервые рассмотрены вопросы выбора пластмасс с учетом кинематики механических передач (зубчатые, ременные, червячные, винтовые, цепные), особенностей контактного взаимодействия и деформационного поведения резьбовых соединений и уплотнительных элементов. Показана необходимость полного учета доминантных характеристик пластмасс (вязко-упругих, релаксационных, термдеформационных). Приведены сведения по приближенной и уточненной идентификации полимерных материалов.

В качестве приложений в книгу включен справочный материал большого объема (свойства промышленных полимеров, углепластиков, стеклопластиков, характеристические полосы поглощения функциональных групп, ИК-Фурье спектры полимеров и перечень ГОСТов по методам испытаний и определениям свойств пластмасс).

Книга предназначена, прежде всего, специалистам по проектированию и производству изделий из полимерных материалов. Практическая направленность книги поможет им успешно выбирать и эффективно использовать полимерные материалы. Она будет также полезна студентам машиностроительных, судостроительных, инженерно-строительных и инженерно-технологических специальностей высших учебных заведений.

УДК 678.01:53
ББК 22.251

Издание осуществлено при поддержке
ООО «Пластинфо.ру»



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 978-5-91703-012-8

© Крыжановский В.К., 2009

© Изд-во «Научные основы и технологии», 2009

Содержание

Основные аббревиатуры и условные обозначения.....	7
Предисловие	9
1. Доминантные особенности пластмасс	13
1.1. Вязкоупругость	14
1.2. Релаксация.....	21
1.3. Термомеханические особенности.....	29
1.4. Температура и прочность	32
Заключение	40
2. Инженерные критерии	41
2.1. Разновидности механических напряжений	41
2.2. Кинематика подвижных сопряжений.....	50
Заключение	56
3. Инженерно-конструкторские критерии	57
3.1. Групповая классификация изделий из ПМ	57
3.2. Резьбовые детали.....	62
3.2.1. Общие понятия, определения и обозначения	62
3.2.2. Трение в резьбовой паре.....	65
3.2.3. Крепежные резьбы	70
3.2.3.1. Концентраторы напряжений	70
3.2.3.2. Прочностной анализ	72
Заключение по 3.2.3	73
3.2.4. Резьбы для механизмов передачи движения.....	76
3.3. Резьбовые соединения.....	80
3.4. Уплотнители.....	88
3.5. Зубчатые передачи	90

3.5.1. Элементы кинематики зацепления	91
3.5.2. Силовой анализ	93
3.5.3. Червячные передачи	97
3.5.4. Конструкция зубчатых и червячных колес	100
3.6. Ременные передачи	101
3.6.1. Передачи трением	102
3.6.2. Зубчато-ременные передачи	107
3.7. Цепные передачи	109
3.8. Опоры качения	113
3.9. Опоры скольжения	116
4. Практическая идентификация пластмасс	130
4.1. Упрощенная оценка	131
4.2. Уточненная идентификация	136
4.2.1. Фурье–инфракрасная спектроскопия	136
4.2.2. Дериватография (термогравиметрия)	138
4.2.3. Термосканирование	140
4.2.4. Термомеханика	141
4.2.4.1. Кристаллические термопласты	144
4.2.4.2. Аморфные термопласты	147
4.2.4.3. Аморфные густосетчатые полимеры	149
4.2.4.4. Дисперсно-наполненные реактопласты	153
4.2.5. Капиллярная вискозиметрия	154
Послесловие	158
Литература	160
Приложения	164

Основные аббревиатуры и условные обозначения

Полимерный блог, <http://polymeric.ru>:

ПЭ (PE) — полиэтилен

ПЭНП (LDPE) — ПЭ низкой плотности (высокого давления ПЭВД)

ПЭСП (MDPE) — ПЭ средней плотности (среднего давления ПЭСД)

ПЭВП (HDPE) — ПЭ высокой плотности (низкого давления ПЭВД)

ЛПЭНП (LLDPE) — линейный полиэтилен низкой плотности

СЭВА (EVA) — сополимер этилена с винилацетатом

ХПЭ (CPE) — хлорированный ПЭ

СПЭ (PEX) — сшитый ПЭ

СВМПЭ (UHMWPE) — сверхвысокомолекулярный ПЭ

ПП (PP) — полипропилен

ППО (PROX) — полипропиленоксид

СЭП (SEP) — сополимер этилена с пропиленом

ПС (PS) — полистирол

УПС (PS-HI) — ударопрочный полистирол

АБС (ABS) — тройной сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола (АБС-пластик)

САН (SAN) — сополимер стирола с акрилонитрилом

ПММА (PMMA) — полиметилметакрилат

ПВХ (PVC) — поливинилхлорид

ХПВХ (PVCC) — хлорированный ПВХ

ПВХН (PVH-U) — непластифицированный ПВХ (винипласт)

ВМПВХ (HMWPVC) — высокомолекулярный ПВХ

ПВХД (PVDC) — поливинилиденхлорид

ПУ (PU) — полиуретан

ПА (PA) — полиамид

ПА-11 (PA11) — полиамид 11. Аналогично ПА-12, ПА-46, ПА-6/10 (ПА-610) и т. д.

ПА-ВС — стеклонаполненный ПА

ПФА (PFO) — полиформальдегид (полифениленоксид)

СФД — сополимер формальдегида с диоксаном

СТД — сополимер формальдегида с триоксоланом и диоксаном

ПК (РС) — поликарбонат
ПК-ВС — стеклонаполненный ПК
ПЭТФ (РЕТ) — полиэтилентерефталат (лавсан, *polyester*)
ПБТФ (РВТ) — полибутилентерефталат
НПЭФ — ненасыщенная полиэфирная смола
ЭС — эпоксидная смола
ПВФ — поливинилформаль
ПВБ — поливинилбутираль
ПВС — поливиниловый спирт
АЦЭ(СА) — ацетат целлюлозы
АБЦЭ(СAB) — ацетобутират целлюлозы
ПТ — политиофан

Конструкционные термопласты с улучшенными свойствами:

ПСФ (PSU) — полисульфон
ПЭС (PESU) — полиэфирсульфон
ПФС (PPSU) — полифениленсульфон
ПФСД (PFS) — полифениленсульфид
ПЭЭК (РЕЕК) — полиэфирэфиркетон
ПЭКК (РЕКК) — полиэфиркетонкетон
ПАРА (РАРА) — полиариламид
ПФАМ (PFAM) — полифталамид
ПЭИ (РЕИ) — полиэфиримид
СПС — полистирол синдиотактический
ЖКП (LPC) — жидкокристаллический полимер

Физические единицы:

ρ — плотность, г/см³, т/м³
 N — усилие, кН
 P — давление, МПа
 S — площадь, м²
 T — температура, °C; К — Кельвин
 $\sigma_{пч}$ — предел прочности, МПа
 $\sigma'_p, \sigma'_n, \sigma'_{сж}$ — предел прочности при растяжении, изгибе, сжатии
 E — модуль упругости нормальный (модуль Юнга), МПа
 ε — относительное удлинение, %
 β — коэффициент линейного расширения, К⁻¹
 I — интенсивность износа

Предисловие

***Закон Флагга.** Когда у вас появляется необходимость постучать по дереву, вы обнаруживаете, что все вокруг вас сделано либо из алюминия, либо из пластика.*

*А. Блох**

Выбор полимерного материала для производства тех или иных изделий является сложным многофакторным процессом, включающим не только инженерную, но и экономическую, организационно-производственную, материаловедческую, технологическую, дизайнерскую, эксплуатационную и другие оценки, определяющие, в конечном счете, конкурентную эффективность продукции.

Среди перечисленных позиций ключевой является оценка инженерная, определяющая саму возможность применения конкретного пластика в конкретном изделии.

Поскольку хронологически сложилось так, что пластмассы в качестве конструкционных материалов начали применяться значительно позднее традиционных керамики, металлов и их сплавов, то уже существовавшие к этому моменту принципы инженерных расчетов и приемы конструирования оказались базовыми и для аналогичных действий в отношении пластмассовых деталей, изделий и конструкций. Применяемые подходы к конструированию базируются на основной материаловедческой особенности изделий из металлов, заключающейся в практической неизменности их основных свойств в функции времени и принятых условий нагружения в диапазоне наиболее распространенных температур, то есть от -50 до $+200$ °С. Такими основными свойствами являются прочность, деформативность и твердость. Именно эти критериальные характеристики металлов закладываются в инженерные расчеты в виде значений пределов прочности ($\sigma_{\text{пч}}$), относительной деформации при растяжении (ϵ), модуля упругости (E)

* Здесь и далее: Блох А. Закон Мерфи; пер. с англ. Я.М. Вовшин. — Мн.: ООО «Попшури», 2003. — 224 с.

и коррелированной им твердости (H). Особенности эксплуатации металлического изделия приближенно учитываются в виде эмпирических коэффициентов: запаса прочности (n), коэффициента влияния цикличности нагрузки и ее возможной неравномерности (r), поправок, компенсирующих воздействие теплового поля, агрессивности окружающей среды и тому подобное. Так или иначе, но при выборе марки традиционного машиностроительного материала его лаконичные доминантные характеристики принимаются за квазипостоянные величины. Принимаются, потому что они и являются таковыми. В самом деле — табличных характеристик любой машиноподелочной конструкционной стали достаточно для главных инженерных действий, а именно для выполнения проектного или проверочного расчета, составления или уточнения конфигурации изделия, выбора способа его механической или пластической обработки, для оценки вида и особенностей его сопряжения с другими элементами технического устройства и пр.

Сохранение металлом своих свойств в процессе эксплуатации (без учета термохимических процессов) приводит, в частности, к тому, что упомянутые инженерные действия в отношении изделия заканчиваются на этапе его проектирования и изготовления, а возможное изменение реакции материала в период эксплуатации, зависящее от конструкции соединения, геометрии и кинематики сопряжения, особенностей воздействия нагружающих усилий во внимание практически не принимается.

Пластмассы, как материалы на основе органических длинноцепных полимеров, по своему поведению сложнее традиционных металлов и тем более керамики. Их работоспособность с течением времени может существенно изменяться в результате комплекса причин, среди которых присутствуют не только перечисленные выше, но и специфические причины, определяемые чисто «полимерными» физико-химическими особенностями. Тем не менее полимерные материалы в настоящее время продолжают оцениваться преимущественно традиционными конструкционными параметрами «прочность, жесткость, теплостойкость», а особенности физико-химической организации пластмасс — введением разнообразных эмпирических коэффициентов, корректирующих величину коэффициента запаса прочности. Это находит отражение в широко известных рекомендациях по расчету и конструированию деталей из пластмасс [1–3]. Отметим, что, как правило, конструкторские рекомендации разрабатываются специалистами в области машино-

строения, традиционно ориентированными на металлические машино-поделочные материалы.

Рекомендации по выбору пластмасс, выполненные специалистами в области полимерной технологии, подробно и обстоятельно учитывают физико-химические особенности пластмасс, их релаксационное поведение, реакцию на тепловое воздействие, изменение свойств, вызванное старением и усталостью, учитывают влияние технологии переработки [4]. Вместе с тем инженерно-конструкторские особенности эксплуатации изделий в конкретных технических устройствах (передачи зацеплением и трением, подшипники скольжения и качения, резьбовые соединения и винтовые передачи, уплотнители и др.) остаются практически вне поля зрения этих высококомпетентных трудов.

Проще говоря, рекомендации по конструированию изделий из пластмасс грешат недостаточной полнотой учета свойств выбираемых полимерных материалов, а рекомендации полимерщиков по выбору пластиков — могли бы в большей мере учитывать инженерно-конструкторские особенности технических устройств, выполненных с применением синтетических органических материалов.

Предлагаемая читателю книга опирается на более чем сорокалетний опыт автора как в области технологии, свойств и применения пластмасс, так и в конструировании изделий для разнообразных по использованию и кинематике соединений и узлов, машин, механизмов, аппаратов и трубопроводных систем.

*Под термином **инженерный выбор** понимается обеспечение работоспособности материала в изделии с учетом воздействия механических нагрузок в условиях, определяемых именно конструкцией соединения или кинематикой подвижного сопряжения. Термин **работоспособность**, в свою очередь, определяет реакцию пластмассы на характер внешнего силового и теплового воздействия.* Такие специальные качества полимерных материалов, как огнестойкость, электро- и теплофизические свойства, сопротивление агрессивным средам, акустические характеристики, декоративность и другие качества, проявление которых не вызвано механическим воздействием, являются содержанием специальной справочной литературы и в настоящей книге не рассматриваются.

Раздел «Идентификация» включен в содержание книги в связи с тем, что в проектировании и производстве изделий из пластмасс все шире используется метод аналогии в выборе материала по имеющемуся образцу. В этом случае исходной является практическая задача

приближенного, но уверенного определения вида пластмассы, из которой изготовлено базовое изделие. Решение такой задачи многократно сокращает время и затраты на выпуск новой конкурентно способной продукции.

Книга предназначена, прежде всего, специалистам по проектированию и производству изделий из полимерных материалов. Она будет также полезна студентам машиностроительных, судостроительных, инженерно-строительных и инженерно-технологических специальностей высших учебных заведений, особенно тех, которые не успели погрузиться в болотце Болонской конвенции и ступенчатого обучения.

1. Доминантные особенности пластмасс

***Теорема Стокмайера.** Если дело кажется простым, в действительности оно сложное.*

***Закон Гарварда.** При максимально жестком контроле давления, температуры, объема, влажности и других условий организм всегда поступает так, как ему заблагорассудится.*

А. Блох

Прежде всего отметим, что данная книга не содержит традиционных, но бесполезных в силу своей лаконичности описаний основных разновидностей пластмасс (ПМ), исчерпывающие данные по составу, свойствам и традиционному применению которых можно найти в многочисленных монографиях, например [7–9]. Конкретные технические параметры промышленных термо- и реактопластов, в том числе армированных, можно найти в уникальном по информативности, но, к сожалению, редком справочнике В. У. Новикова [10]. Числовые данные по физико-химическим и механическим свойствам основных ПМ, сгруппированные по принципу применимости на материалы общетехнического, инженерно-технического, конструкционного и специального назначения, приведены в приложениях [1–5].

Любопытно, что среди множества табличных официальных параметров ПМ отсутствуют данные по ключевым особенностям этих материалов, а именно по вязкоупругости ПМ, их релаксационному поведению и по зависимости всех стандартизованных механических свойств от температуры, характера и длительности нагружения.

В определенном смысле стандартные данные могут ввести в заблуждение специалиста-практика, не знакомого в достаточной мере с «хитростями» пластмасс и привыкшего к работе с традиционными, стабильными по поведению металлами.

Приведем лишь несколько примеров. Неучет развивающейся во времени пластичности, то есть необратимой деформативности ПМ, приводит к изменениям во времени профилей кинематических элементов

зубчатых и кулачковых механизмов, к их износу, снижению точности и ускоренному выходу из строя. Пластичность ПМ существенно ограничивает их применение в устройствах поддержания вращательного движения (подшипники качения и скольжения). Избыток упругой, восстанавливаемой, деформации вызывает возрастание гистерезисных потерь при относительном скольжении элементов механических передач и, как следствие, их износ, усталость и разрушение.

Неучет процессов релаксации напряжений при фиксированной деформации деталей сопряжений служит причиной нарушений неразъемности прессовых и заклепочных соединений. Он же может привести к выходу из строя и напряженных резьбовых соединений, что встречается, например, при монтаже металлопластиковых трубопроводных систем. Релаксация напряжения сжатия относится к причинам разгерметизации уплотнителей аппаратов, работающих под давлением.

Неучет изменения механических свойств от теплового воздействия, в частности, снижения модуля упругости ПМ с ростом температуры, нарушает критерий сохранения прочности изделий, эксплуатируемых в сложных условиях. И так далее, и тому подобное.

Иногда можно слышать сетования по поводу вышедшего из строя изделия из ПМ — «уж эти пластмассы...». На самом деле причина состоит в том, что в процессе проектирования изделия и при выборе материала не были учтены в достаточной мере его доминантные особенности, а именно, вязкоупругость, релаксация, нелинейное влияние температуры на деформационно-прочностные свойства, чувствительность ПМ к присутствию концентраторов напряжений.

1.1.1. Вязкоупругость

Важнейшая особенность всех без исключения полимерных материалов заключается в том, что под действием любой по модулю, знаку и периодичности нагрузки в изделиях одновременно развиваются два вида деформации — упругая и вязкая, или, как ее нередко называют, пластическая. Упругая деформация после снятия нагрузки полностью восстанавливается со скоростью звука в полимерной среде. Для целей практики восстановление упругой деформации можно считать мгновенным. Пластическая деформация после снятия нагрузки не восстанавливается, то есть является окончательно приобретенной. Параметрически эта особенность записывается в дифференциальной форме в виде:

$$d\varepsilon = d\varepsilon_y + d\varepsilon_n, \quad (1.1)$$

где $d\varepsilon$, $d\varepsilon_y$ и $d\varepsilon_n$ — соответственно суммарная, упругая и пластическая относительная деформация.

Вклад упругой и пластической составляющих зависит, главным образом, от физико-химических особенностей полимера, состава пластмассы, наличия и морфологии наполнителей, температуры окружающей среды. Практика показывает, что даже при деформации предельно жестких армированных композитов в них развивается и необратимая пластическая деформация, вклад которой измеряется долями процента. В то же время даже вязкие расплавы термопластов демонстрируют упругие качества.

Вязкоупругость полимеров поддается математическому моделированию с помощью различных по сложности формализованных моделей. Все они состоят из элементов, символизирующих упругие, гуковские, деформации и, соответственно, упругое поведение материала, и элементов, символизирующих вязкие, необратимые, ньютоновские деформации. Простейшие формализованные модели полимеров состоят из двух элементов: упругого гуковского в виде пружины и вязкого ньютоновского в виде некоего «поршня» в цилиндре, заполненном вязкой средой.

Элементы могут соединяться последовательно — модель Максвелла (рис. 1.1) и параллельно — модель Кельвина–Фойгта (рис. 1.2). Известны многокомпонентные модели Догадкина, Каргина–Слонимского, Бюргера–Образцова–Френкеля и др. В упрощенном изложении чем сложнее по химизму, структуре и морфологии полимерный материал, тем сложнее его формализованная модель и тем из большего числа простых элементов она состоит.

Кроме элементов Гука и Ньютона, используются также и другие более сложные варианты. Например, элемент Бингама, символизирующий адгезионные силы сцепления, модель Каргина и др. Подробнейшие сведения по моделированию деформационного поведения различных пластмасс содержатся в [11, 12].

Наша многолетняя практика показала, что для инженерного понимания особенностей вязкоупругого поведения пластмасс вполне достаточно анализа моделей Максвелла и Кельвина–Фойгта с практическими комментариями.

Двухэлементная модель Максвелла (рис. 1.1) описывает поведение пластмасс с развитой пластичностью, а именно: ПЭНП, ПЭВП, ПТФЭ,

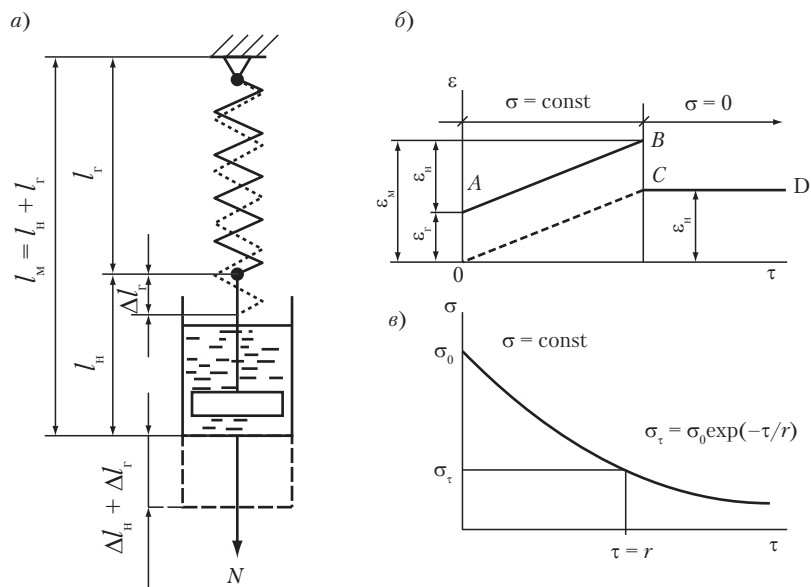


Рис. 1.1. Двухэлементная модель вязкоупругого физического тела (модель Максвелла)

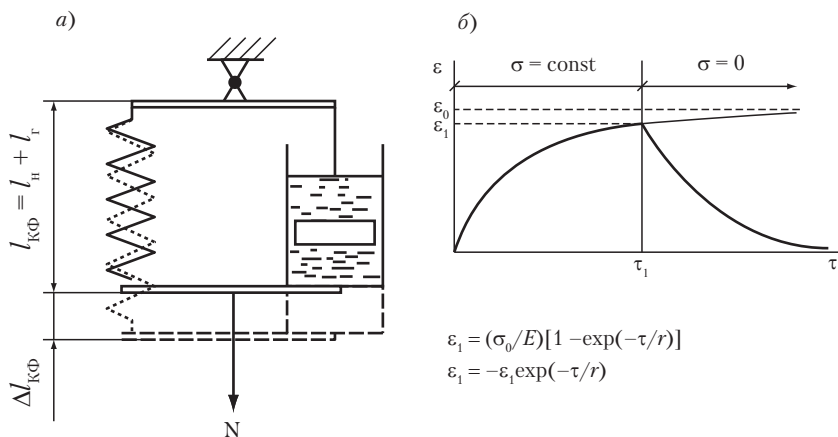


Рис. 1.2. Двухэлементная модель вязкоупругого физического тела (модель Кельвина-Фойгта)

ПТФХЭ, пластифицированного ПВХ, СЭВА и др. Эта модель может использоваться также для описания поведения большинства термопластов в расплаве.

Поскольку гуковский и ньютоновский элементы соединены последовательно, то возникающие в них под действием приложенного к модели усилия N напряжения равны ($\sigma_r = \sigma_n$) и они равны общему напряжению (σ_m) в модели ($\sigma_m = \sigma_r = \sigma_n$).

С деформациями дело обстоит иначе. Каждый из элементов под действием приложенного в течение определенного промежутка времени N деформируется соответственно на Δl_r и Δl_n . Результирующая деформация модели Максвелла составляет

$$\Delta l_m = \Delta l_r + \Delta l_n; \quad (1.2)$$

$$\Delta l_m / (l_r + l_n) = \Delta l_r / l_r + \Delta l_n / l_n; \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_r + \varepsilon_n. \quad (1.4)$$

Переведем уравнение (1.4) в дифференциальную форму (уравнение (1.1)) и почленно разделим его на $d\tau$, тогда

$$d\varepsilon_m / d\tau = d\varepsilon_r / d\tau + d\varepsilon_n / d\tau. \quad (1.5)$$

Заменив $d\varepsilon_r$ через $d\varepsilon = d\sigma / E$ (закон Гука), а $d\varepsilon_n / d\tau$ через σ / η (закон Ньютона), получим

$$d\varepsilon_m / d\tau = d\sigma / E d\tau + \sigma / \eta. \quad (1.6)$$

Здесь E — модуль упругости, Па; η — вязкость, Па·с; σ — приложенное напряжение.

Оценим качественно соотношение (1.6).

При $d\tau$, близком к нулю, значение $(d\sigma / E d\tau) \gg \sigma / \eta$; вкладом пластической составляющей в общую деформацию $d\varepsilon_m / d\tau$ можно пренебречь и тогда в момент приложения к системе силы N , временной импульс которой близок к нулю, общая деформация определяется деформацией гуковской, которая практически мгновенно увеличивается от 0 до ε_r (рис. 1.1, OA). В дальнейшем $\sigma = \text{const}$ и тогда $d\sigma = 0$. Общая деформация определяется линейно развивающейся пластической составляющей (рис. 1.1, AB), пропорциональной времени действия напряжения σ . При снятии напряжения ($\sigma = 0$) упругая деформация восстанавливается мгновенно ($BC = OA$), а достигнутая пластическая деформация (ε_n) сохраняется без изменения (CD).

При $\varepsilon_m = \text{const}$ $d\varepsilon_m = 0$ и уравнение (1.6) приобретает вид

$$d\sigma/Ed\tau = -\sigma/\eta, \quad (1.7)$$

далее

$$d\sigma/\sigma = -(E/\eta)d\tau, \quad (1.8)$$

интегрируем

$$\int_{\sigma_0}^{\sigma} (d\sigma / \sigma) = -(E / \eta) \int_0^{\tau} d\tau, \quad (1.9)$$

и получаем

$$\ln (\sigma / \sigma_0) = -(E/\eta)\tau, \quad (1.10)$$

В 1.10 заменяем $\eta/E = r$, здесь r — время релаксации, тогда

$$\sigma = \sigma_0 \exp[-(\tau/r)], \quad (1.11)$$

при $\tau = 0$, $\sigma = \sigma_0$ (рис. 1.1, θ); $\tau = r$, $\sigma_r = \sigma_0/e \approx 0,3\sigma_0$; $\tau = \infty$, $\sigma_r \rightarrow 0$.

Таким образом, если вязкоупругое полимерное тело находится в условиях постоянной по величине деформации (сжатие или растяжение), то возникшее в нем напряжение с течением времени будет уменьшаться, асимптотически стремясь к нулю при $\tau \rightarrow \infty$.

Прикладное значение установленных зависимостей (1.6) и (1.11) и их графиков, приведенных на рис. 1.1 и 1.2, будут рассмотрены далее.

Упруговязкая 2-элементная модель Кельвина–Фойгта описывает поведение полимеров, у которых величина деформации лимитируется развитием упругой составляющей, а пластическая — влияет на особенности этого развития во времени. Как правило, это ПМ, испытывающие преимущественно так называемое хрупкое разрушение — ПК, ПЭТФ, ПБТФ, отвержденные ЭС, НПЭФ и др.

В модели Кельвина–Фойгта ньютоновский и гуковский элементы соединены параллельно (см. рис. 1.2), их линейные размеры равны и совпадают с исходным размером модели $l_r = l_n = l_{\text{кф}}$. Под действием усилия N оба элемента деформируются на одинаковую величину, которая равна деформации модели ($\Delta l_{\text{кф}} = \Delta l_r = \Delta l_n$ и $\varepsilon_{\text{кф}} = \varepsilon_r = \varepsilon_n = \varepsilon$).

С напряжением (σ) ситуация иная. Поскольку элементы расположены параллельно, то напряжение, действующее в модели под влиянием силы N , является суммой частных напряжений, возникающих в упругом и пластическом элементах.

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_n = E\varepsilon + \eta(d\varepsilon/d\tau). \quad (1.12)$$

Затем

$$\sigma - E\varepsilon = \eta(d\varepsilon/d\tau). \quad (1.13)$$

После почленного деления на E получаем

$$\sigma/E - \varepsilon = (\eta/E)(d\varepsilon/d\tau). \quad (1.14)$$

Введем промежуточную переменную (y):

$$y = (E/\eta)(d\varepsilon/d\tau), \quad (1.15)$$

тогда

$$y = \sigma/E - \varepsilon. \quad (1.16)$$

После дифференцирования 1.16 получаем:

$$dy = -d\varepsilon \quad (1.17)$$

подставляя (1.17) в (1.15)

$$y = E/\eta - d\varepsilon/d\tau \quad (1.18)$$

Далее $dy/y = -(E/\eta) d\tau$ и после интегрирования в пределах $y-y_0$ и $0-\tau$ имеем:

$$y = y_0 \exp[-(\tau/r)], \quad (1.19)$$

где $r = \eta/E$.

После несложных подстановок и замен при условии $\sigma = \text{const}$ окончательно получаем

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \{1 - \exp[-(\tau/r)]\}. \quad (1.20)$$

Проанализируем динамику деформирования физического тела, нагруженного постоянным усилием N , поведение которого адекватно модели Кельвина–Фойгта (рис. 1.2, б) при:

$$\tau = 0, \exp(-\tau/r) = -1 \text{ и } \varepsilon = 0;$$

$$\tau = r, \exp(-\tau/r) = 0,33 \text{ и } \varepsilon = 0,66\varepsilon_0;$$

$$\tau \rightarrow \infty, \exp(-\tau/r) \rightarrow 0 \text{ и } \varepsilon \rightarrow \varepsilon_0.$$

Таким образом, в период действия приложенного усилия N возникающая деформация, во-первых, развивается замедленно и, во-вторых, не достигает теоретического гукковского значения $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$.

В данном случае развитие пластической деформации тормозит рост деформации полной. Этот эффект называется ретардацией.

Логично предположить, что после снятия нагрузки ($\sigma = 0$) пластическая составляющая будет также тормозить исчезающую упругую деформацию.

Действительно, если к моменту времени τ перед снятием нагрузки деформация достигла значения ε_1 , то в случае $\sigma = 0$ уравнение (1.20) примет вид:

$$\varepsilon = -\varepsilon_1 \exp(-\tau/r) \quad (1.21)$$

Знак « $-$ » перед ε_1 означает изменение вектора деформации. Тогда

$$\text{при } \tau = 0 \quad \varepsilon_{-1} = \varepsilon_1$$

$$\text{при } \tau = r, \quad \varepsilon_{-1} = 0,33\varepsilon_1;$$

$$\text{при } \tau \rightarrow \infty, \quad \varepsilon \rightarrow 0.$$

Таким образом, ретардация проявляется и после снятия с физического тела приложенного усилия, причем достигнутая при нагружении деформация полностью не восстанавливается.

Модели Максвелла и Кельвина–Фойгта являются простыми. Они не могут учесть разнообразия свойств и особенностей их проявления у многочисленных по составу и по способам получения полимерных материалов. В связи с этим для описания поведения той или иной пластмассы под нагрузкой используют более сложные формализованные модели.

В качестве примера приведем 4-элементную модель Бюргерса–Образцова–Френкеля (рис. 1.3) [11]. Модель позволяет описать деформацию полимерного тела, состоящую из: упругой, подчиняющейся закону Гука (ε_r); пластической (ε_n), подчиняющейся закону Ньютона, и высокоэластической, описываемой уравнением Кельвина–Фойгта ($\varepsilon_{кф}$),

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_n + \varepsilon_{кф}. \quad (1.22)$$

Зная значение каждой из них, можно для частного случая $\sigma = \text{const}$ записать:

$$\varepsilon = (\sigma_0/E) + (\sigma_1/E[1 - \varepsilon_0 \exp(-\tau/r)] + (\sigma_0/\eta)\tau. \quad (1.23)$$

Графическая интерпретация этого уравнения позволяет оценить как характер изменения деформации полимерного тела, испытывающего

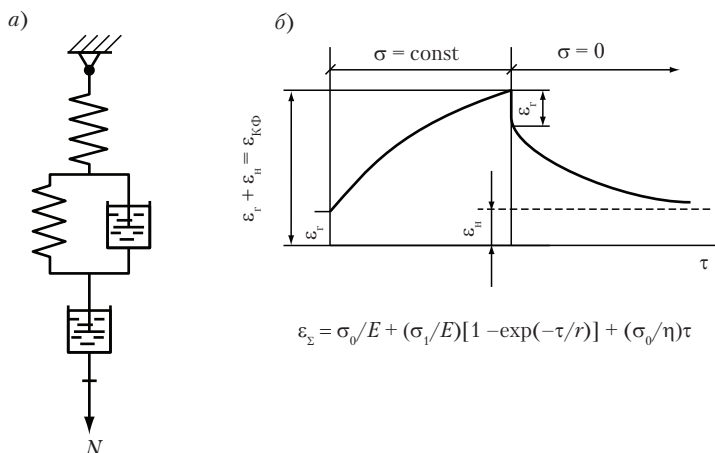


Рис. 1.3. Четырехэлементная модель деформационного поведения полимерного тела

постоянную нагрузку, так и характер восстановления деформации после снятия механического напряжения. Заметим, что уравнение (1.23) удовлетворительно описывает деформационное поведение ПММА и блочного ПС.

На этапе выбора пластмассы уравнение (1.23) можно использовать для проектной оценки поведения жестких конструкционных пластмасс ПЭТФ, ПБТФ, ПЭЭК, ПФС, ЭП, ФП.

1.2. Релаксация

Все рассмотренные выше уравнения содержат величину $\eta/E = r$, называемую релаксацией. Как следует из уравнения (1.10), размерность $[r] = \text{с}$. Следовательно, релаксация описывает процесс, происходящий во времени. Когда-то этот термин был сугубо профессиональным и использовался в медицине и в материаловедении. В настоящее время он вошел в разговорную практику, но не утратил и своего истинного содержания.

Релаксация — это физический процесс перехода системы в новое равновесное состояние, адекватное изменившимся внешним энергетическим условиям.

Скорость релаксации и ее интенсивность применительно к полимерам зависят от их химического и физического строения, от фазо-

вого и физического состояния, межмолекулярного взаимодействия, от параметров любого внешнего энергетического поля (температуры, механического напряжения, амплитуды и частоты нагружения, напряженности и частоты электромагнитного поля, частоты и мощности акустического воздействия и др.).

На макроуровне различают релаксацию напряжения и релаксацию деформации, или ползучесть.

Релаксация происходит во времени. Для оценки степени завершенности релаксационных процессов по отношению к длительности внешнего энергетического воздействия можно использовать критерий Деборы (D) [12]. $D = r/\tau$, где τ — длительность энергетического воздействия, с; r — время релаксации полимерного материала в условиях энергетического воздействия, с.

Если длительность этого воздействия на полимер такова, что процесс релаксации завершился ($D < 1$), то тогда полимерное тело находится во внутренне равновесном состоянии. Если $D > 1$, то релаксация не завершилась и состояние полимера остается неравновесным. В нем продолжают структурные перестроения, действуют внутренние напряжения, сохраняется вероятность возникновения микротрещин, продолжается процесс длительной усадки изделия.

В зависимости от химического и макромолекулярного строения и от внешних условий процесс релаксации может измеряться от минут до многих десятков часов. Момент его завершения не определен. Поэтому со значительной долей условности принято за время релаксации, или просто релаксацию, считать время, за которое параметр релаксации (напряжение) изменится в «е» раз (уравнение 1.11), т. е. примерно втрое (значение r_3 и r_2 на абсциссе графика, рис. 1.4).

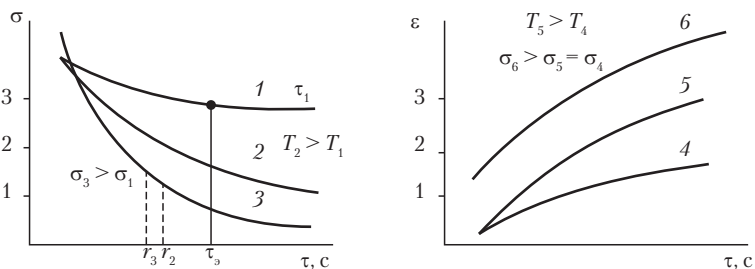


Рис. 1.4. Релаксация напряжения (σ) и деформации (ϵ) в разных условиях

Молекулярная подвижность существенно влияет на процесс релаксации. В густосетчатых полимерах, характеризующихся ограниченностью сегментальных движений, релаксация при прочих равных условиях протекает медленнее, чем, например, в термопластах с разветвленным строением макромолекул.

Увеличение температуры способствует ускорению релаксации напряжения (рис. 1.4, кривые 1 и 2), деформации (рис. 1.4, кривые 4 и 5) и более глубокому ее протеканию. Если экспозиция внешнего напряжения составляет τ_3 , то, судя по графикам на рис. 1.4, полимер при $T = T_2$ перешел в равновесное состояние, а тот же полимер при том же исходном напряжении σ , но работающий при температуре $T_1 < T_2$ в момент времени τ_3 находится еще в состоянии незавершенности процесса релаксации.

Релаксация — это сложный и многоуровневый процесс. По существу, именно релаксационные явления являются причиной отклонения свойств полимеров от свойств веществ с нецепным молекулярным строением. Проанализированные выше многоэлементные формализованные модели можно назвать моделями релаксационными, определяющими степенной характер зависимости $\sigma = \varphi(\tau)$ и $\varepsilon = \Psi(\tau)$.

Рассмотренные положения не абстрактны. Они представляют существенный практический интерес, что будет показано двумя нижеследующими примерами.

Пример 1 (рис. 1.5). В пластмассовую пластину 1 устанавливается металлическая армирующая вставка 2 со сквозным резьбовым отверстием М6. В пластине высверлено или подготовлено формованием посадочное отверстие диаметром d , в которое усилием N и запрессовывается вставка с посадочным участком диаметром D . Конструктивные элементы данного неразъемного соединения в примере не рассматриваются. Главное в нем то, что размер $D > d$ и $D - d = 2\delta$, где δ — деформация натяга. Напряжение натяга $\sigma_{\text{н}}$ определяется из уравнения:

$$\sigma_{\text{н}} = E_{\text{н}} \varepsilon_{\text{н}} = E_{\text{н}} (D - d) / d, \text{ Па}, \quad (1.24)$$

где $E_{\text{н}}$ — модуль упругости пластмассы; $\varepsilon_{\text{н}}$ — относительная деформация натяга; $\varepsilon_{\text{н}} = (D - d) / d$.

Напряжение натяга создает усилие натяга P , фиксирующее вставку от осевого смещения за счет силы трения между пластиной и вставкой (рис. 1.5, б).

В рассматриваемом примере значение $\varepsilon_{\text{н}}$ постоянно, что соответствует условиям уравнения (1.11), описывающим изменение во време-

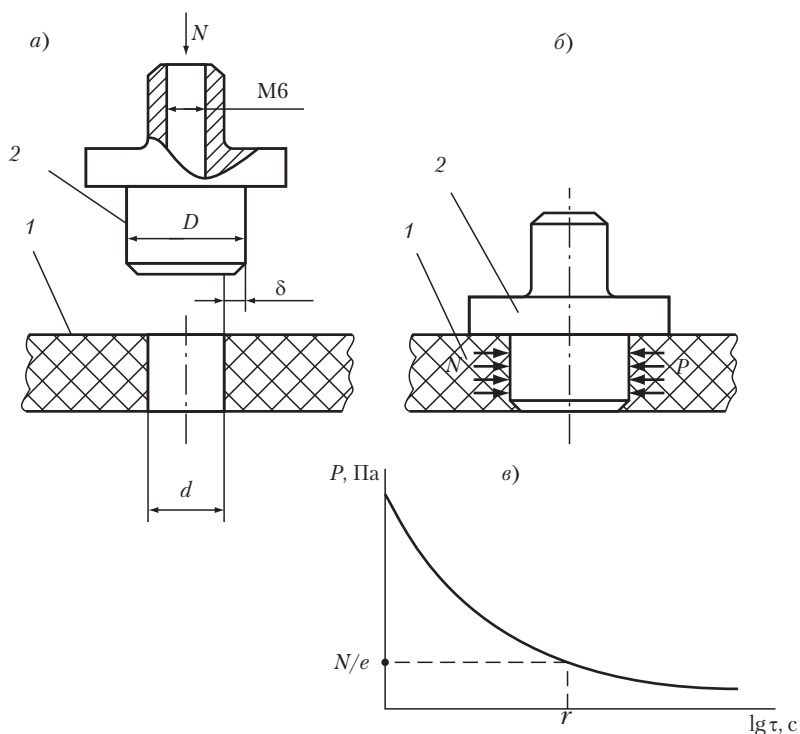


Рис. 1.5. Схема прессового соединения металлического штифта (2) с пластмассовой пластиной (1):

а — исходное положение; *б* — прессовое соединение; *в* — график изменения во времени величины напряжения запрессовки (натяга)

ни величины начального напряжения натяга, вызванное процессами релаксации. С течением времени давление P прессового соединения (рис. 1.5, в) будет уменьшаться, теоретически стремясь к нулю, что означает утрату соединением неразъемности, показанной на рис. 1.5, б. Говоря по-простому, вставка 2 может выпасть из пластины 1 (самопроизвольно или под незначительным осевым усилием).

Отметим, что при $\tau = r$, то есть когда длительность эксплуатации становится равной времени релаксации, величина натяга P уменьшается примерно вдвое (в «е» раз).

Пример 2. В переработке пластмасс экструзией известен эффект разбухания струи экструдата на выходе из формующей головки от диаметра d до диаметра d_p (рис. 1.6).

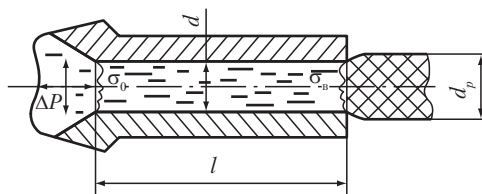


Рис. 1.6. Эффект разбухания экструдата. Пояснения в тексте

По выходе из головки напряжение сжатия расплава σ_v становится равным нулю, вследствие чего деформация сжатия расплава, действовавшая на участке l , исчезает, и поток расплава разбухает на упругую деформацию, созданную ранее.

Пример 3. Две полимерные трубы соединены резьбовой муфтой. Соединение осуществлено при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с фиксированным затягом. В трубопровод подается рабочее тело с $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$. *Анализ:* 1) достигнутый в условиях сборки затяг уменьшается с течением времени в результате релаксации напряжения при постоянной деформации (пример 1); 2) при подаче рабочего тела с $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ процесс релаксации ускоряется и соединение может разгерметизироваться.

Ранее отмечалось, что развитие релаксации напряжения и релаксации деформации (ползучесть) существенно зависят от индивидуальных особенностей полимера и, прежде всего, от его макромолекулярной подвижности. Термопласты с ограниченной сегментальной подвижностью — это, как правило, аморфные полимеры, характеризующиеся замедленным темпом релаксации (рис. 1.7, кривая 1). В кристаллизующихся термопластах релаксационные процессы происходят значительно быстрее (рис. 1.7, кривые 2 и 3).

В последние годы активно развивается производство экструзионных изделий из крупнотоннажных термопластичных материалов и, прежде всего, из жесткого ПВХ и ПЭВП. По графикам на рис. 1.8 и 1.9 можно оценить влияние длительности эксплуатации на прочность таких популярных изделий, как трубы и шланги. Уже примерно через год работы прочность изделий под действием внутреннего давления снижается от 20 до 50%. Если транспортируемая среда нагрета, то релаксация напряжения существенно ускоряется, а величина разрушающего напряжения становится тем меньше, чем температура среды ближе к температуре размягчения (T_p) полимера. Так, ПВХ, у которого $T_p \approx 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, при нагреве до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ теряет через год примерно 40% проч-

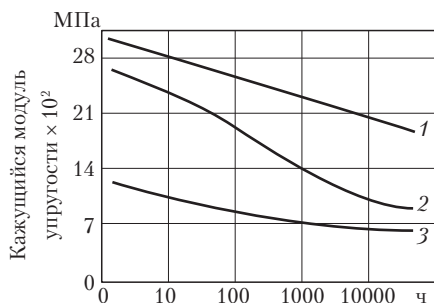


Рис. 1.7. Кривые изменения модуля упругости во времени при 25 °С на основе опытов по релаксации напряжений для $\epsilon = 0,5\%$: 1 — ПММА; 2 — ПФА; 3 — ПА-6

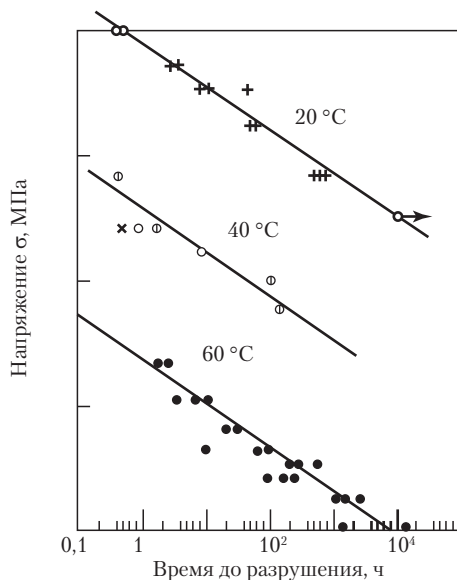


Рис. 1.8. Время до разрушения труб из ПВХ под действием внутреннего давления воды при различных значениях напряжения и температуры

ности, в то время как ПЭВП с $T_p \approx 70^\circ\text{C}$ утрачивает в тех же условиях примерно 60% исходной прочности.

Весьма полезные зависимости длительной прочности ПА-6 приведены на рис. 1.10 [3]. Во-первых, отчетливо наблюдается влияние температуры на уменьшение начального напряжения при фиксированном удлинении ($\epsilon = 2\%$), во-вторых — отмечается резкое ускоре-

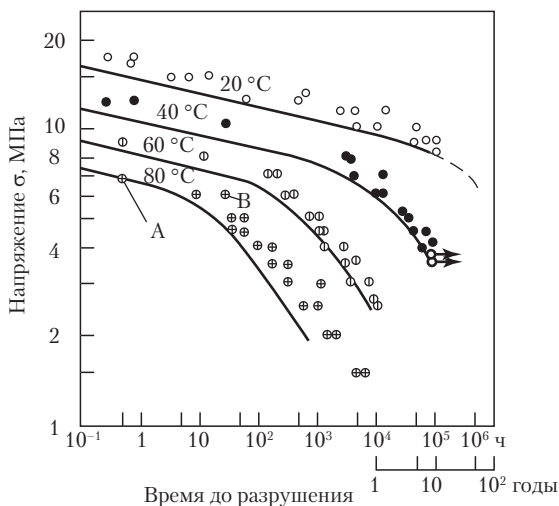


Рис. 1.9. Время до разрушения труб из ПЭВП под действием внутреннего давления воды p при различных значениях напряжения и температуры

ние релаксации при растяжении и, наконец, мы видим совершенно одинаковое влияние влажности ПА на отмеченные выше параметры при $T = \text{const}$. Во всех случаях причина наблюдаемых изменений одна — возрастание сегментальной подвижности макромолекул. Только в случаях 1, 2, 3, 4, 5 и 6 (рис. 1.10) оно вызвано нагревом, в случае 7 (влажность 3,5%) — межструктурной пластификацией, выполняемой молекулами воды.

В полном соответствии с характером релаксации деформации в ПА- 6 развивается и ползучесть (рис. 1.11), причем переход к динамическому характеру нагрузки (рис. 1.12) сопровождается некоторым усилением упругих характеристик этого полужесткого конструкционного пластика.

В армированных пластмассах с термореактивной полимерной матрицей, физическая структура которой представлена густой пространственной сеткой [14], релаксационные процессы развиваются значительно медленнее, чем в длинноцепных термопластах. Достоверные изменения прочности (рис. 1.13) и ползучести (рис. 1.14) во времени наблюдаются при значительно больших напряжениях, но происходят они по тем же адекватным закономерностям.

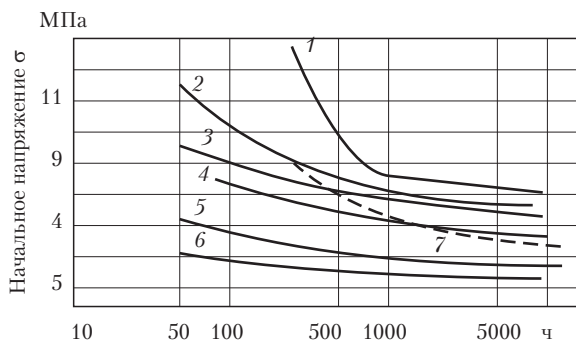


Рис. 1.10. Диаграммы долговременной прочности при растяжении ПА-6 (влажность 1,5%), $\varepsilon = 2\%$:
1 — 21 °C; 2 — 30 °C; 3 — 40 °C; 4 — 50 °C; 5 — 65 °C; 6 — 75 °C; 7 — 21 °C и 3,5% влажности [13]

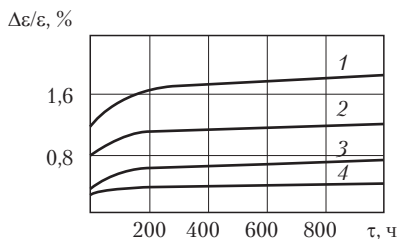


Рис. 1.11. Ползучесть (крип) образцов, изготовленных из ПА-6 при различных напряжениях:
1 — 13 МПа; 2 — 10 МПа; 3 — 5 МПа; 4 — 3 МПа [3]

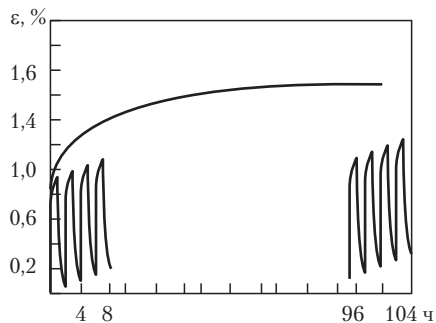


Рис. 1.12. Кривые ползучести ПА-6 при постоянной и периодической нагрузках, 25 °C, 13 МПа [3]

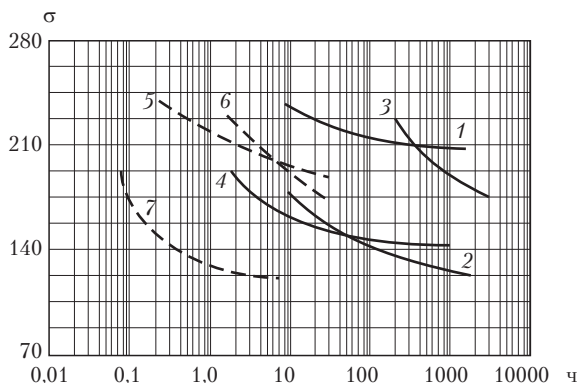


Рис. 1.13. Кривые изменения прочности слоистых стеклопластиков во времени при постоянной нагрузке при 25 °C [3]:

1 — эпоксидный пластик прессованный; 2 — эпоксидный пластик контактного формования; 3 — фенольный пластик; 4 — полиэфирный пластик контактного формования; 5 — эпоксидный пластик; 6 — фенольный пластик; 7 — полиэфирный пластик; сплошные кривые — предел прочности, штрихпунктирные кривые — 0,1% деформации

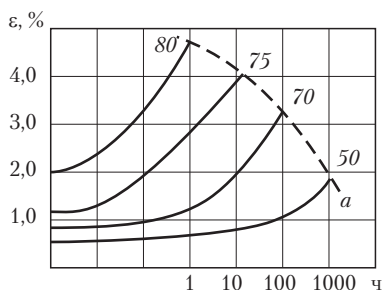


Рис. 1.14. Кривые ползучести полиэфирного стеклопластика, армированного тканью; изгиб в воде при $T = 80; 75; 70$ и 50 °C [3]

1.3. Термомеханические особенности

Под термомеханическими особенностями понимается деформационное поведение нагруженной пластмассы в функции температуры*.

Графически оно, поведение, выражается в виде графиков, построенных в координатах «температура–деформация» (сжатия, растяже-

* Температура, как термин, определяет интенсивность внешнего теплового поля или теплонасыщенности пластмассы в качестве физического тела.

ния или изгиба). Такие зависимости называются термомеханическими кривыми (ТМК). На них аргументом является температура, откладываемая по абсциссе, а функцией — деформация образца, отмечаемая на ординате. Таким образом, температура — это независимая переменная. Скорость ее изменения выбирается с учетом темпа релаксации деформации, как правило — до 2 °С/мин. По ТМК устанавливают аморфность или кристалличность полимера*.

По ТМК также возможна оценка влияния способа производства выбираемого полимера на его свойства, корректируются температурные условия пластикации термопласта, производится оптимизация режимов формования изделий из расплава и из заготовок (пневмо- и вакуум-формование), оценка влияния морфологии и свойств армирующих волокнистых наполнителей на термдеформационное поведение слоистых пластиков. Важно, что значение напряжения может назначаться по величине предполагаемой нагрузки на изделие.

На ТМК выделяются следующие характерные температуры: температура размягчения T_p , при которой начинается деформация, температура перехода в высокоэластическое состояние $T_{вз}$, температура плавления $T_{пл}$ и его начало $T_{н.пл}$. Химическое и физическое строение аморфного термопласта определяет значение интервалов $\Delta T_1 = T_{вз} - T_p$ и $\Delta T_2 = T_{пл} - T_{н.пл}$. ΔT_2 отражает скорость расплавления полимера, зависящую от его химического строения, молекулярной массы и полидисперсности.

По термомеханической кривой можно установить физические состояния аморфного термопласта. Определенный интерес может представлять температура стеклования T_g , устанавливаемая дифференцированием ($d\varepsilon/dt$) кривой на участке перехода ПМ из твердого в высокоэластическое состояние (участок $a-b$ на кривой 1 рис. 1.15).

Для кристаллизующихся полимеров (рис. 1.15, кривая 4) характеристическими являются температуры T_p и $T_{пл.к}$, ниже которой в вязком расплаве начинается кристаллизация (ПЭ, ПП, ПА, ПФА, ...).

Дробление ТМК по зонам позволяет решать ряд практических и технологических задач. Температура размягчения определяет предельную температуру, при которой полимерное изделие, нагруженное напряжением σ , сохранит жесткость и геометрическую форму. Кроме того, по величине T_p назначают температуру оснастки при получении изделий из расплава и температуру самого изделия, при которой его извлечение

* Идентификационный признак (см. гл. 4).

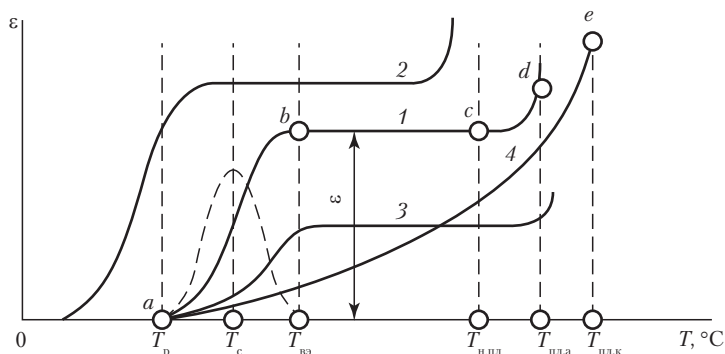


Рис. 1.15. ТМК аморфных (1–3) и кристаллизующихся (4) термопластов:
 1 — ненаполненный; 2 — ненаполненный пластифицированный;
 3, 4 — наполненный непластифицированный

из оснастки не будет сопровождаться появлением дефектов. Подобное справедливо и для частично кристаллизующихся термопластов.

По значениям $T_{вз}$ и $T_{н.пл}$ определяют температуру нагрева заготовки при получении изделий пневмо- и вакуум-формованием, а значение ε позволяет оценить допустимую степень вытяжки заготовки, например, при производстве бутылок из преформ ПЭТ.

Величина интервала $\Delta T_3 = T_{пл} - T_{н.пл}$ дает информацию для выбора длительности выдержки полимера при $T_{пл}$ в целях исключения так называемых «непроплавов» (геликов).

При введении дисперсных наполнителей аддитивно уменьшает значение высокоэластической деформации, при этом температура плавления может незначительно изменяться в ту или иную сторону в зависимости от теплофизических свойств и содержания наполнителя.

Чем больше содержание *дисперсного* наполнителя, тем меньше в материале полимера и тем меньше значение высокоэластической деформации на ТМК аморфных ТП (рис. 1.15, кривая 3).

В армированных пластмассах содержание полимерной матрицы составляет от 50 до 15–20%. Термомеханическое поведение таких пластмасс, а это, как правило, высокопрочные конструкционные материалы (стекло-, угле-, боропластики; стекло-, угле-, асботекстолиты; многочисленные волокниты с разнообразными неорганическими и органическими наполнителями и пр.) существенно отличается от всех, приведенных выше. При температуре размягчения у таких материалов может наблюдаться незначительная по величине деформация, которая

медленно развивается по мере дальнейшего нагревания. Отмеченная особенность способствует термостойкости изделий из подобных высоконаполненных композитов и является одним из компонентов инженерного выбора ПМ.

1.4. Температура и прочность

Тепловое поведение полимерных материалов является их важнейшей характеристикой, определяющей и выбор пластмасс, и их эффективное использование. Большинство пластиков отчетливо реагируют на, как принято говорить, температуру. Причина этого объясняется цепным макромолекулярным строением полимеров. Чем подвижнее кинетические фрагменты макромолекул, тем отчетливее их реакция на интенсивность теплового поля. Подвижность же макроцепей и, следовательно, температурная деформируемость и прочность при нагреве определяются химическим строением, физической организацией полимеров (частично кристаллизующиеся или аморфные), морфологией их надмолекулярной структуры (пачечная, фибриллярная, сферолитная, сетчатая), видом и интенсивностью межмолекулярных связей и, наконец, тем, к какому классу полимеров (термопластичным или термореактивным) они относятся.

Если исходить из параметров деформационно-прочностного поведения, определенных в стандартных условиях, то тепловая реакция полимерных материалов весьма наглядно описывается графическими зависимостями изменения их не абсолютного, но относительного значения параметров свойств в функции температуры, то есть $\Psi(\sigma_p, \sigma_n, E, a) = \varphi(T)$. Такие зависимости для термопластов представлены на рисунках 1.16–1.19 [4]. Их сопоставление позволяет сделать следующие полезные при выборе пластмасс выводы.

1. Чем ниже физико-механические свойства термопластов, тем они чувствительнее к изменениям температуры. Так, среди полиолефинов ПП, прочность и жесткость которого позволяет отнести его к конструкционным материалам, при нагреве до 80 °С теряет около 25% стандартной прочности при изгибе, в то время как ПЭВП уже при 60 °С сохраняет лишь половину исходной прочности (рис. 1.19). Сходные соотношения наблюдаются при испытаниях полиолефинов на растяжение и изгиб (рис. 1.16, 1.17).

2. Аморфные полимеры в целом демонстрируют меньшую зависимость деформационно-прочностных свойств от температуры (рис. 1.16–1.19).

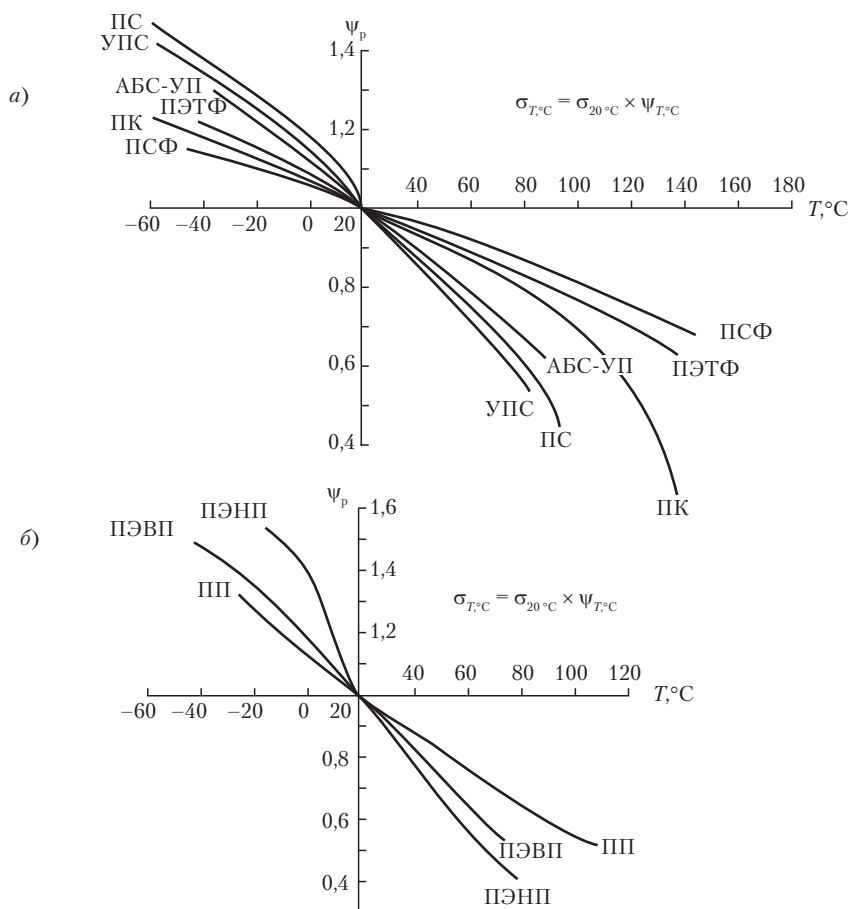


Рис. 1.16. Зависимость относительной прочности при растяжении ψ_p от температуры T термопластов:
а — аморфных; б — частично кристаллизующихся

Вместе с тем и в этой группе бóльшая теплостойкость материала определяет соответственно и повышенное сопротивление тепловому воздействию. Такие пластики, как ПК, ПЭТ, ПФС при $T > 100^{\circ}\text{C}$ сохраняют более 70% прочности.

3. Жесткость полимерных материалов при стандартной температуре не согласуется с их прочностью при нагреве. Это наглядно под-

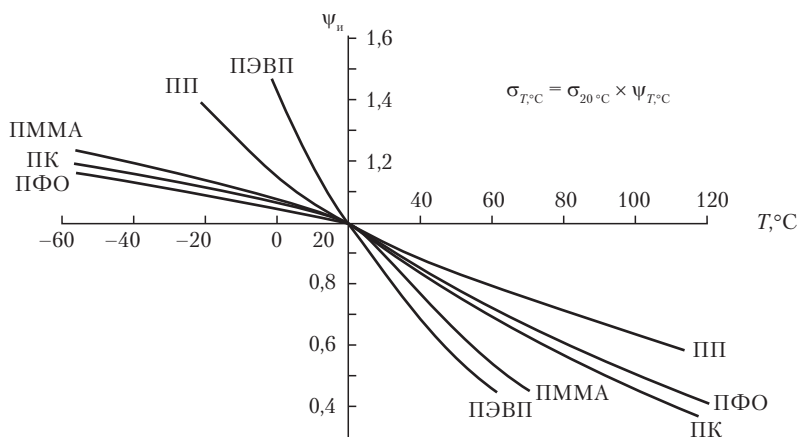


Рис. 1.17. Зависимость относительной прочности термопластов при изгибе $\psi_{и}$ от температуры T

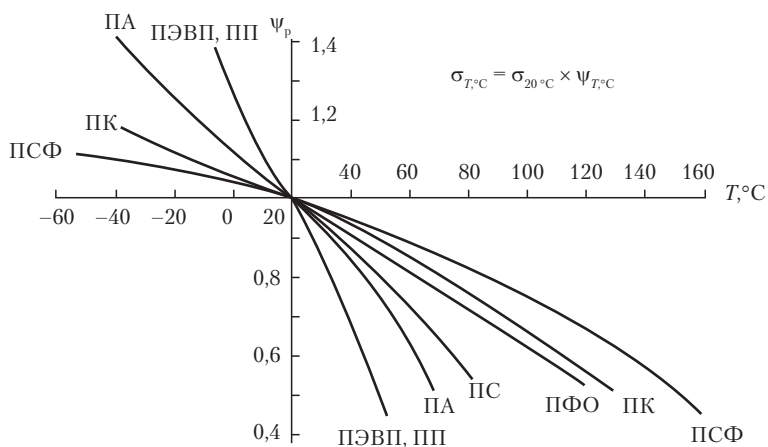


Рис. 1.18. Зависимость относительной прочности при растяжении $\psi_{р}$ стеклонаполненных термопластов от температуры T

тверждается кривыми на рис. 1.18. При близком значении стандартной твердости всех представленных пластиков материалы на основе полимеров стирола (ПС, УПС, АБС) демонстрируют наиболее отчетливую зависимость прочности при растяжении от температуры.

4. Введение рубленного стекловолокна в термопласты (содержание до 30%) способствует снижению теплозависимости свойств, причем не только при нагревании, но и при температуре до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.18). И в этом случае свойства полимерного связующего определяют поведение наполненного композита.

5. Температура весьма существенно влияет на жесткость термопластов, характеризуемую их модулем упругости (рис. 1.19). Сравнение кривых наглядно показывает, что деформируемость частично кристаллизующихся термопластов (ПЭВП, ПА-12, ПА-66) резко изменяется даже при сравнительно небольшой вариативности температуры в нешироком (от -40 до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$) интервале.

Данную особенность необходимо обязательно учитывать, выбирая пластик для изготовления деталей конструкционного назначения, особенно предназначенных для работы в условиях длительных циклических напряжений (ПА-66, ПФА, ПК).

В целом последовательность учета температуры на механические свойства выбираемой пластмассы сводится к следующему:

- 1) по значению температуры (T , $^{\circ}\text{C}$) на абсциссе соответствующей зависимости (рис. 1.16–1.19) проводят линию до пересечения

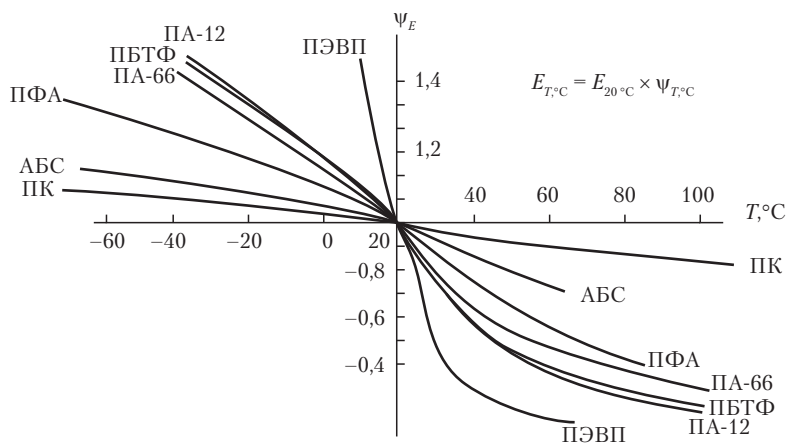


Рис. 1.19. Зависимость относительного модуля упругости при изгибе ψ_E частично кристаллизующихся и аморфных термопластов от температуры T

- с кривой оцениваемой пластмассы и затем на ординате получают значения коэффициента $\Psi_{T^{\circ}C}$;
- 2) из таблиц стандартных свойств пластмасс (приложения 2, 3, 4) выбирают соответствующий показатель пластмассы;
 - 3) оценивают величину коэффициента запаса прочности;
 - 4) полученные значения перемножают, получая величину допускаемого параметра выбираемого термопластика.

Влияние температуры на термореактивные пластики (приложения 5–8) определяется, прежде всего, поведением сетчатого связующего. Известно, что в области стеклообразного состояния с повышением температуры деформационно-прочностные свойства медленно понижаются до достижения температуры размягчения, превышение которой сопровождается ускоренным падением свойств [15]. В отдельных случаях в температурном интервале 10–20 °С значение модуля упругости и разрушающего напряжения уменьшается на два десятичных порядка. Наличие дисперсных наполнителей, оказывающих аддитивное действие на композит, несколько сглаживает эту ступень, а в случае высоконаполненных армированных пластиков переход связующего из твердого, стеклообразного в высокоэластическое состояние происходит еще медленнее.

Анализ данных по тепловой прочности стеклопластиков (табл. 1.1) показывает, что при изгибе резкое падение разрушающих напряжений происходит при температурах, выше температуры размягчения соответствующей эпоксидной смолы. Данные, приведенные в табл. 1.1, подтверждают представление о структурно-деформационной нечувствительности испытаний на прочность при сжатии σ_c .

Среди термореактивных, конструкционных стеклонеполненных пресс-материалов едва ли не наиболее распространенным является материал АГ–4В, получаемый на фенолоформальдегидном связующем, модифицированном поливинилбутиралем, который сохраняет высокие значения свойств до температуры 100 °С и не утрачивает их полностью до 300 °С (см. табл. 1.2).

В соответствии с отмеченным выше в интервале температур 100–150 °С связующее материала АГ переходит в высокоэластическое состояние, что сопровождается существенным снижением свойств.

Применение кремнийорганических связующих (материал РТП, табл. 1.3) позволяет расширить температурный диапазон использования этих материалов от –60 до +400 °С, однако одновременно резко снижается ударная прочность.

Таблица 1.1. Прочность эпоксидных стеклопластиков при различных температурах [15]

Марка стекло-пластика	Связующее	Температура размягчения отвержденного связующего, °С	Разрушающее напряжение, МПа					
			при изгибе			при сжатии		
			при Т, °С					
			20	150	180	20	150	180
СТЭФ	ЭД-16	110	510	65	50	495	305	225
СТЭФ-НТ	ЭД-16	105	490	48	—	455	115	65
СТЭН-253	УП-643	140	520	255	160	—	—	—
СТЭТФ-245	ЭТФ	170	480	234	170	550	440	420
СТЭХД-242Н	ЭХД	160	500	170	105	—	—	—
СТЭБ	ЭД-16	176	480	125	63	610	300	250

Таблица 1.2. Влияние температуры на свойства АГ-4В [10]

Температура, °С	Свойства					
	σ_p , МПа	σ_c , МПа	σ_u , МПа	E_u , ГПа	E_c , ГПа	a , кДж/м ²
–60	68	227	200	17	19	62
20	57	182	149	15	17	53
100	48	126	109	10	18	51
150	26	—	78	8	—	44
200	16	69	65	8	11	28
250	17	—	69	6,5	—	28
300	18	67	60	6,5	8	26

Введение в состав связующего нитрильного каучука (СНК2–27, табл. 1.3) способствует сохранению высоких физико-механических свойств в области низких температур.

Интенсивное развитие средств скоростного транспорта и аэрокосмических систем привело к созданию сверхвысокопрочных стекло-, угле- и гибридных композитов. Их основные физико-механические свойства приведены в приложениях 5–8. Несмотря на своеобразие морфологии этих сложных по устройству армирующих компоненты пластмасс, в них также присутствует характерная особенность — снижение свойств при температуре вблизи интервала «стеклование–

Таблица 1.3. Влияние температуры на свойства стекловолоконистых пресс-материалов [10]

Свойства	Материал															
	СНК2 27				П-1-1				РТП-100				РТП-170			
	Температура, °С															
	−60	20	100	150	−60	20	100	150	−60	20	100	150	−60	20	100	150
σ_n , МПа	88	52	29	24	55	51	40	22	138	90	27	43	180	93	36	51
$\sigma_{ск}$, МПа	129	111	71	58	270	250	170	110	94	83	33	44	91	79	28	32
E_n , ГПа	16	11	10	9	13	11	7,5	4,4	23	17	10	15	9,6	11,0	5,4	4,6
$\varepsilon_{отн}$, %	0,3	0,2	0,2	0,12	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,3	0,15	—	1,5	1,1	0,8	1,0
α , кДж/м ²	108	87	69	64	4,8	4,6	4,6	4,2	240	190	—	—	—	—	—	—

высокоэластика», определяемое поведением полимерной матрицы. Специфическое поведение прочности при изгибе и сжатии ПМ марки РТП–170 при $T > 200$ °C может объясняться частичной карбонизацией органического связующего и принципиальным изменением его физико-химических свойств.

В практике использования пластмасс, когда приходится учитывать не только нагрузки на изделие и температуру его работы, но и иные эксплуатационные и конструктивные обстоятельства (долговечность, агрессивность среды, периодичность нагружения, влияние концентраторов напряжения и пр.), значения допускаемых напряжений снижаются даже по сравнению с величинами, определенными по графикам на рис. 1.18–1.19 (табл. 1.4, 1.5).

Таблица 1.4. Допускаемые напряжения при растяжении (в МПа при постоянной статической нагрузке и различных температурах) [4]

Материал	Температура, °C				
	20	40	60	80	110
ПЭНП	3,0–4,0	1,5–2,0	5,0–8,0	—	—
ПЭВП	5,0–6,0	3,0–3,5	1,0–1,5	—	—
ПП	6,5–7,0	4,0–4,5	3,0–3,5	1,0–2,0	—
ПС	10,0–13,0	8,0–10,0	2,0–3,0	—	—
ПММА	7,0–9,0	4,0–6,0	2,0–3,5	0–1,0	—
ПТФЭ	5,0–6,0	4,5–5,5	4,0–5,0	3,5–4,0	2,5–3,5

Таблица 1.4 (окончание)

Материал	Температура, °С				
	20	40	60	80	110
ПВХ	8,0–11,0	4,0–5,0	0,5	—	—
ПА 6	6,0–7,0	4,5–5,0	3,5–4,0	2,0–3,0	—
ПА 6–ВС	18–20	—	—	10–13	—
ЭП–С	30–40	—	20–30	—	5–10
ПЭ–С	25–35	—	5,0–7,0	3,0	—
ФП	13–16	—	—	7,5–8,5	—
ФПВ	17,0–20,0	—	—	7,5–8,5	—
Гетинакс	30–60	—	—	15–25	—
Текстолит	15–20	—	—	8,0–10,0	—
АП	20–30	—	—	—	—

Таблица 1.5. Зависимость модуля упругости при растяжении (ГПа) от температуры: E — кратковременный модуль упругости; E_k — конструкционный модуль упругости [4]

Материал	Температура, °С										
	20		40		60		80		100		150
	E	E_k	E	E_k	E	E_k	E	E_k	E	E_k	E
ПЭНП	0,13	0,04	0,06	0,025	0,038	0,03	0,07	—	—	—	—
ПЭВП	0,85	0,12	0,5	0,07	0,15	0,09	0,15	0,05	0,06	—	—
ПП	1,3	0,27	0,7	0,14	0,25	0,3	2,0	—	—	—	—
ПС	3,4	1,4	3,2	1,0	2,8	0,1	—	—	—	—	—
ПММА	3,5	1,4	3,2	1,05	2,7	0,7	2,1	0,3	—	—	—
ПТФЭ	0,56	0,11	0,55	0,1	0,32	0,09	0,24	0,08	0,17	0,05	0,07
ПТФЭ–С	1,4	—	—	—	0,9	—	—	—	0,75	—	0,4
ПТФХЭ	1,5	0,3	0,8	0,2	0,4	0,1	0,2	—	0,15	—	—
ПВХ	3,0	1,3	2,1	0,5	1,4	—	—	—	—	—	—
ПА 66	2,7	1,25	2,3	0,8	1,8	0,5	1,4	0,4	0,8	—	—
ПА 6	1,5	0,4	0,6	0,35	0,3	0,25	0,25	0,2	—	—	—
ПА 6–ВС	7,0	—	—	—	—	—	4,2	—	—	—	—
ПК	2,3	1,4	2,0	—	1,8	—	1,7	0,7	1,6	0,5	—

Заключение

Таким образом, выбор пластмасс следует начинать с оценки их длительных свойств, среди которых следующие:

1. Одновременность возникновения упругих и пластических деформаций, соотношение которых зависит от химического строения и физической структуры полимера.

2. Механическое напряжение и деформация, развивающиеся на фоне релаксационных процессов, то есть во времени. При этом в условиях постоянной деформации, что определяется конструкцией изделия и его назначением, начальное напряжение будет уменьшаться. При постоянном напряжении релаксация деформации (ползучесть) развивается, непрерывно замедляясь.

Температура способствует ускорению релаксации. Чем выше жесткость пластмассы, определяемая ее модулем упругости, тем медленнее релаксационные процессы и тем ниже их интенсивность.

3. Температура может оказывать существенное влияние на прочность пластмасс. Характер этого влияния нелинеен. По мере приближения внешней температуры к температуре размягчения (стеклования) полимерной матрицы пластмасс прочностные характеристики убывают быстрее. Армирование полимеров способствует повышению теплоустойчивости пластмасс.

2. Инженерные критерии

Закон Саймона. Любая вещь, составленная из кусков, рано или поздно распадается.

Закон Рудина. Когда люди вынуждены выбирать один путь из нескольких, большинство делает самый неправильный выбор.

А. Блох

При выборе ПМ для конкретных конструкций, кроме рассмотренных выше доминантных особенностей полимеров, необходимо учитывать и инженерные критерии. Первый — это особенности нагружения и, следовательно, вид действующих в изделии напряжений. По ним выполняются проектные или проверочные расчеты, определяются необходимая конфигурация, сечения и долговечность отдельной детали или группы соединенных деталей в виде сборочного узла. В инженерной практике — это соединения резьбовые, прессовые, заклепочные, замковые, сварные и клеевые. В большинстве случаев такие соединения испытывают статические нагрузки.

Второй критерий выбора ПМ действует для деталей передач, отличающихся по конструкции, взаимодействию и применяемости (силовые, приборные, кинематические и пр.), а также для устройств, поддерживающих поступательное и вращательное движение. По сути, это критерий ресурса машины или механизма. Он определяется сохранением детали исходного геометрического контура, который может быть нарушен избыточной деформируемостью материала, его износом или другими причинами. Этот критерий зависит от кинематики подвижных сопряжений (профиль боковой поверхности зубьев, винтовой нарезки, шкивов, профиля скорости относительного движения и т. д.) и характера их контактирования (поверхность, линия, точка).

2.1. Разновидности механических напряжений

Нагрузки, действующие на детали, и вызываемые ими напряжения по характеру изменения во времени могут быть постоянными (статиче-

скими) или переменными (динамическими). Последние изменяются плавно или резко, могут повторяться или быть однократными, ударными, возрастать и убывать в течение весьма малых промежутков времени, измеряемых долями секунды. Для пластмасс, деформативность которых зависит от длительности и скорости приложения нагрузки, эта особенность весьма существенна.

Напряжение, при котором деталь или соединение практически утрачивает требуемые качества, вследствие возникновения недопустимо большой остаточной деформации или разрушения, называется предельным.

Допускаемым (безопасным) называется напряжение, которое может выдержать материал детали или соединения при деформациях, не выходящих за пределы упругости или за пределы допускаемых деформаций. Для пластмасс в плане их выбора последнее требование весьма важно. Дело в том, что в зависимости от соотношения упругих и пластических свойств величина безопасного усилия и напряжения у ПМ различаются в достаточно широком интервале. Жесткие пластмассы (ПС, ПММА, ПК, ФП, АП, армированные реактопласты и др.) при нагружении испытывают в основном упругие деформации (рис. 2.1, кривая 1, участок — a_1), незначительное превышение которых (точка b_1) вызывает разрушение изделия (образца). У этих материалов значения безопасного (точка a_1') и предельного (разрушающего) усилия (точка b_1') близки. У ПМ с развитыми пластическими характеристиками (рис. 2.1, кривая 3) упругие деформации (точка a_3) ограничиваются усилием, существенно меньшим (точка a_3') разрушающего (точка b_3'). У таких ПМ величины допускаемых напряжений невелики (ПЭНП, СЭВА, ФП, пластифицированные ПВХ, некоторые сополимеры стирола и др.). Наконец, упругопластичные ПМ общетехнического назначения (ПЭВП, ПП, СЭП, ПФА, ПА) и в ряде случаев ПМ конструкционного назначения (ПК, ПЭТФ, ПБТФ, ПСФ, ПЭИ и пр.), при растяжении ведут себя так, как это показано кривой 2 (рис. 2.1). В зависимости от физико-химических свойств ПМ, его способности к реструктуризации и, соответственно, деформированию участок a_2b_2 может различаться по «длине». Однако на нем будет обязательно присутствовать один или более «горб» в точке c_2 . У таких ПМ усилие, вызванное упругой деформацией, ограничивается на ординате точкой a_2' , за которой наблюдается активизирующееся развитие пластической деформации вплоть до точки c_2 при усилии c_2' . Величина этого усилия зависит от межмолекулярного взаимодействия в полимере, его

химического строения и физической организации (кристаллический, аморфный, аморфно-кристаллический). Усилие c_2' с определенной долей условности можно считать усилием текучести.

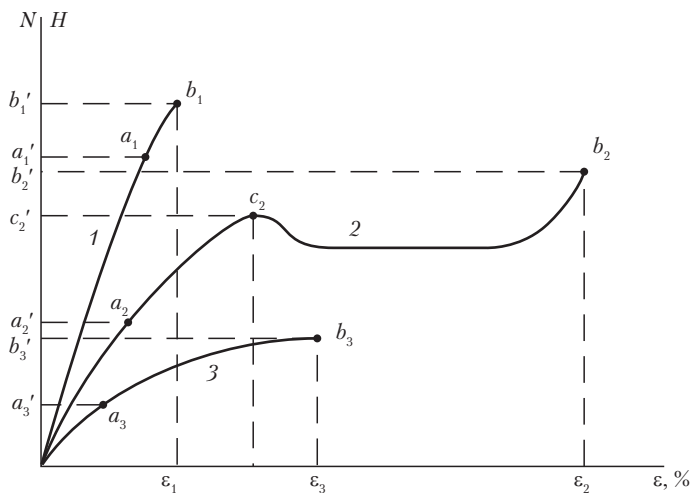


Рис. 2.1. Принципиальная диаграмма растяжения различных ПМ:
 1 — упругие; 2 — упругопластичные; 3 — пластичноупругие; а — упругие деформации и усилия; b — деформации и усилия разрушения; c — начало активной текучести при реструктуризации

При стандартных испытаниях на прочность величину сечения образца (S) принято считать неизменной. В этом случае напряжение растяжения (сжатия) (σ) определяется как частное от деления величины соответствующего приложенного усилия N на $S = \text{const}$. Однако из графиков на рис. 2.1 следует, что при усилиях, превышающих a_1', a_2' и a_3' , образцы начинают испытывать возрастающие пластические деформации, изменяющие площадь сечения в сторону ее уменьшения. Таким образом, определение разрушающих напряжений по стандартной методике, полагающей $S = \text{const}$, явно некорректно. Особенно наглядно эта некорректность проявляется при анализе кривой 2 (рис. 2.1). Наша немалая практика показывает, что к моменту достижения усилия текучести (точка c_2' на ординате) сечение растягиваемого образца уменьшается на 10–30%, а продолжение деформирования приводит к умень-

шению площади рабочего сечения (участок c_2-b_2) примерно в 10 раз. Таким образом, действующее в растягиваемом образце напряжение не убывает, а, как раз наоборот, возрастает в 3–5 раз. В связи с изложенным диаграммы испытаний пластмасс на прочность должны строиться в координатах $\varepsilon - N$, что соответствует показаниям прибора, а привычная диаграмма $\varepsilon - \sigma$ может быть получена лишь инженерным пересчетом экспериментальной кривой по истинному значению площади

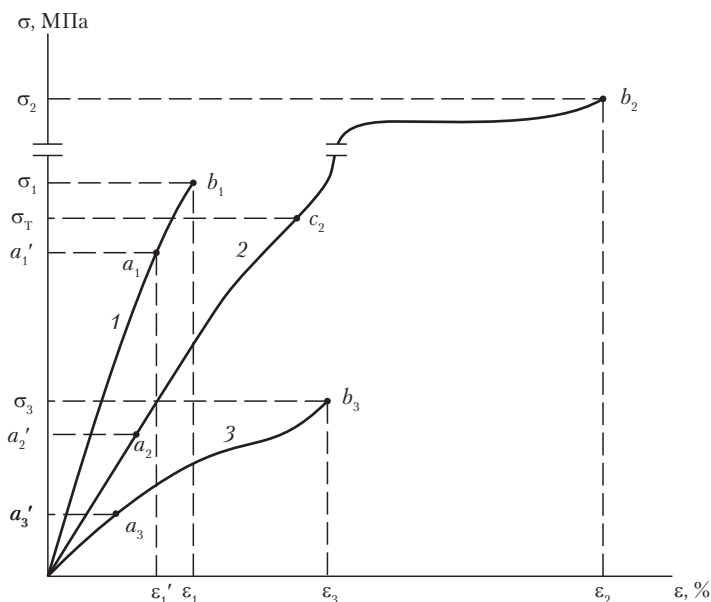


Рис. 2.2. Диаграмма $\varepsilon - N$ (рис. 2.1), перестроенная в координатах $\varepsilon - \sigma$. Обозначения те же

сечения образца. Перестроенные с учетом изложенного в координатах $\varepsilon - \sigma$ принципиальные диаграммы представлены на рис. 2.2.

Такие диаграммы не только объективно отражают процессы, происходящие в нагружаемом образце ПМ, но и дают конкретные инженерные сведения. Действительно, значения напряжения σ_1 соответствуют пределу прочности ($\sigma_{пч}$) жесткого материала, а значение a'_1 — пределу упругости. При этом деформация ε'_1 — упругая, которая восстановится после снятия нагрузки с изделия. В то же время у пластично-упругих

материалов упругая составляющая невелика (a_2' , кривая 3, рис. 2.2) и, следовательно, величина допускаемого напряжения, да еще с учетом релаксации и температуры может принять совсем невеликое значение, что и отражено в табл. 1.4. Примерно такова же ситуация и для упруго-пластичных пластиков (кривая 2), с тем исключением, что сведения о напряжениях выше σ_T имеют скорее познавательную, чем инженерную ценность, поскольку применительно к реальным деталям свидетельствуют об их выходе из строя не вследствие разрушения, а по причине необратимой деформации.

Состояние, вызванное одним видом напряжения, называется простым, а вызванное одновременным развитием двух или более видов и векторов деформации — сложным. Например, сложнапряженное состояние испытывают цилиндрические полые изделия, в стенке которых под действием внутреннего давления одновременно в продольном и в поперечном сечениях развиваются напряжения растяжения, или, например, деталь, испытывающая одновременно нормальные и касательные напряжения.

При выборе пластмасс для таких условий учитывают рекомендации наук «Соппротивление материалов» [16], «Теория механизмов и машин» и «Детали машин» [17].

В отличие от постоянных, повторяющиеся переменные напряжения, называемые динамическими, характеризуются цикличностью нагружения, при которой в течение одного цикла напряжение может изменяться по модулю и по знаку. В большинстве деталей механизмов передач (зубчатые, винтовые и червячные, цепные, фрикционные, ременные, опоры качения, валы и оси) переменные напряжения изменяются по синусоидальному закону, при этом величина усилия, вызывающего циклическое напряжение, может быть неизменной.

Проиллюстрируем это простейшим примером. Допустим, что имеется фрагмент механической передачи (рис. 2.3), состоящий из вала (поз. 1) и закрепленного на нем шкива (поз. 2), к которому приложено окружное усилие P_0 . После приведения силы P_0 к центру вращения (рис. 2.3, а) получаем пару сил, создающую крутящий момент $M_{кр} = P_0 r$ и силу P , действующую на вал и изгибающую его (рис. 2.3, б). Понятно, что в сечении изогнутого вала, условно показанном на рис. 2.3, в, возникают напряжения растяжения (+) ниже оси вращения (зона заштрихована) и напряжения сжатия (–) выше этой оси. При повороте вала на угол $\varphi = \pi$ радиан, ранее растянутая зона попадает в зону сжатия, далее при $\varphi = 2\pi$ рад — возвращается в зону растяжения и т. д.

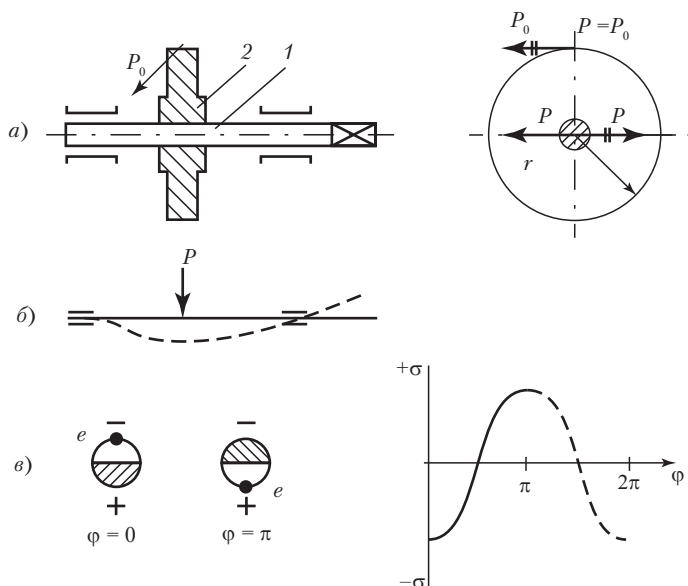


Рис. 2.3. Цикличность напряжений при постоянной нагрузке:

а — устройство узла и приведение окружного усилия к оси вращения; *б* — схема изгиба вала; *в* — цикличность напряжений в сечении вала при вращательном движении точки *е*

Таким образом, при постоянном усилии создается переменное напряжение. В принципе циклические напряжения могут быть знакопеременными симметричными ($\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$, валы, оси) (рис. 2.4, *а*), знакопеременными асимметричными ($\sigma_{\max} \neq \sigma_{\min}$, пружины, винты в условиях вибрации) (рис. 2.4, *б*), знакопеременными асимметричными с $\sigma_{\min} = 0$ (зубья зубчатых колес, штоки, толкатели и шатуны) (рис. 2.4, *в*) и знакопеременными асимметричными ($\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$, большинство деталей передач) (рис. 2.4, *г*).

Отношение наименьшего напряжения к наибольшему, взятое с алгебраическим знаком, называется коэффициентом асимметрии цикла r .

$$r_0 = (\sigma_{\min} / \sigma_{\max}), r_{\tau} = (\tau_{\min} / \tau_{\max}) \quad (2.1)$$

При известном расчетном задании усилий или моментов (P_{\max}, P_{\min} или M_{\max}, M_{\min}) коэффициент r можно определять через изменение внешних нагрузок, то есть, например, для нормальных напряжений

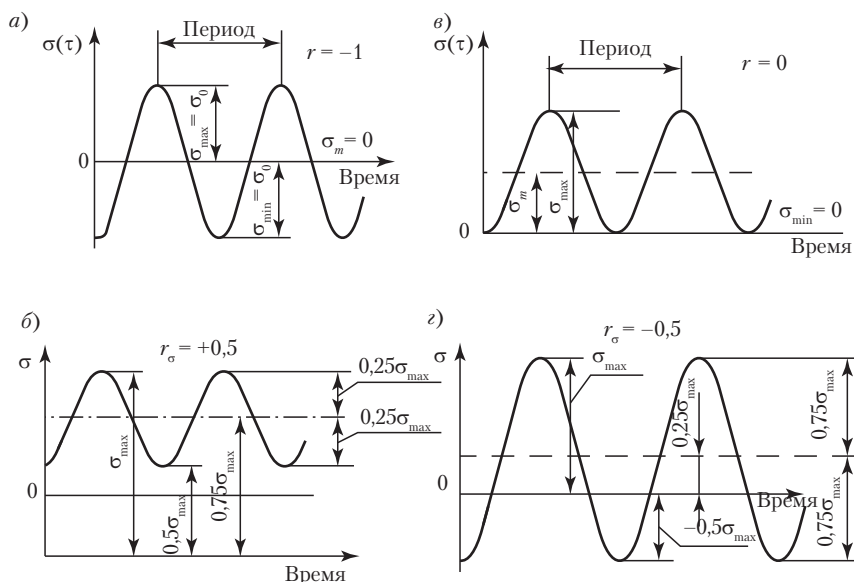


Рис. 2.4. Разновидности циклических напряжений. Пояснения в тексте

значение r изменяется в интервале от $r = -1$ до $r = +1$ и может быть дробным:

$$r_0 = (\sigma_{\min} / \sigma_{\max}) = (P_{\min} / P_{\max}). \quad (2.2)$$

Для симметричного цикла $r = -1$ напряжение обозначается как σ_{-1} (рис. 2.4, а), для пульсирующего цикла $r = 0$ напряжение обозначается как σ_0 (рис. 2.4, в) и так далее.

Цикличность напряжений является причиной усталости материала, которая проявляется в виде образования в изделиях усталостных микротрещин, проявления процессов внутреннего трения, диссипации внешней энергии, саморазогрева пластмассовых изделий и, как следствие, понижения объемной прочности.

В режиме усталостного нагружения могут эффективно эксплуатироваться только полимерные материалы с определенными деформационно-прочностными характеристиками. Из термопластов на сегодняшний день лучше других зарекомендовали себя стеклонаполненные ПА, ПСФ, ПФА. Полиамид ПА-68–ВС демонстрирует усталостную прочность на уровне металлов. Характеристики ненаполненного ПА

ниже. Жесткий сетчатый эпоксидно-новолачный блок-сополимер (ЭНБС), статические свойства которого выше, чем у ПА, в режиме симметричного изгиба существенно уступает ему. В то же время армированные стеклопластики на олигомерном связующем демонстрируют весьма высокие свойства, существенно превышающие усталостную прочность металлов. Так, если предел выносливости качественной углеродистой стали 35А в этих условиях составляет величину порядка $\sigma_{-1n} = (60\text{--}70)$ МПа, то для реактопласта АГ-4С $\sigma_{-1n} = (85\text{--}90)$ МПа. Однако у широко распространенного стеклонаполненного листового материала на основе СП-ПН-1 $\sigma_{-1n} = (30\text{--}35)$ МПа (рис. 2.5).

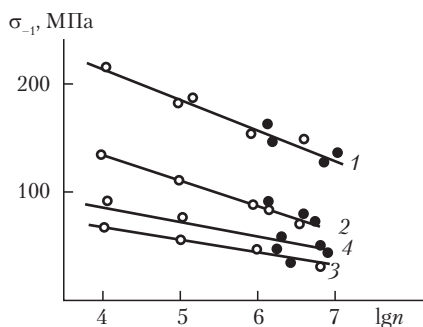


Рис. 2.5. Усталостные кривые армированных пластмасс:

1 — АГ-4С; 2 — СВАМ; 3 — СП-ПН-1; 4 — сталь 35А; ○ — образец разрушился;
● — образец не разрушился

Именно это замечательное качество — высокая усталостная прочность армированных пластиков сделало их незаменимыми для авиакосмической техники и высокоскоростных наземных транспортных устройств.

Вместе с тем необходимо учитывать и специфические особенности поведения полимерных материалов при циклических напряжениях, которые определяются, прежде всего, их релаксационными особенностями. Решая уравнение Аррениуса относительно температуры T , получаем [15]:

$$T = U / [(\lg \tau - \lg \tau_0) R]. \quad (2.3)$$

Принимая $\tau = 1/\omega$, где ω — угловая скорость вращения, получаем, что в любом случае при динамических испытаниях $\tau_d \ll \tau_{\text{стат}}$, и, сле-

довательно, такое нагружение сопровождается увеличением температуры образца. Причиной саморазогрева является внутреннее трение, приводящее к отставанию деформации от приложенного напряжения и зависящее от физико-химических свойств полимера (молекулярная и надмолекулярная организация, межмолекулярное взаимодействие, сегментальная подвижность, наличие свободного кинетического объема). В [18] приведены впечатляющие зависимости температуры саморазогрева от числа циклов нагружения при различных напряжениях изгиба (рис. 2.6). Заметим, что поскольку при увеличении температу-

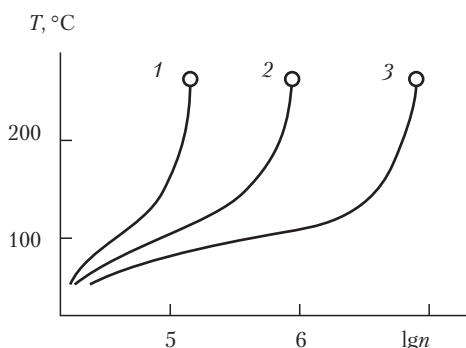


Рис. 2.6. Саморазогрев ПМ [8]. Пояснения в тексте

ры растет и деформация, то аналогичным образом изменяются и деформационные свойства пластиков.

Из зависимостей на рис. 2.6, построенных для стеклопластика на эпоксифенольном связующем, видно, что при частоте всего 15 с^{-1} изменение приложенного напряжения изгиба от 63 МПа (кривая 1) до 58,5 МПа (кривая 2) и 54 МПа (кривая 3) существенно изменяет кинетику саморазогрева от числа циклов нагружения n на фоне одинакового для всех нагружений приращения температуры.

В целом усталостная прочность изделий зависит не только от саморазогрева, но, прежде всего, от наличия на детали концентраторов напряжения и от частоты нагружения. В определенной мере также влияют влажность окружающей среды, наличие в материале пластификаторов и их содержание, свойства, морфология и расположение наполнителей в полимерной матрице.

2.2. Кинематика подвижных сопряжений

Еще К. Маркс, творец «Капитала», обобщил: «Всякая развитая совокупность машин состоит из трех существенно различающихся частей: машины-двигателя, передаточного механизма, наконец, машины-орудия или рабочей машины» [19]. При отсутствии передаточного механизма, то есть в качестве самостоятельного физического объекта, каждая из «машин» так же полезна, по справедливому замечанию еще одного гения позапрошлого века — О. Генри, «как дырка от флейты без флейты». В свою очередь, конструкция передачи и непосредственно способ передачи движения определяются устройством деталей, звеньев, постоянно соприкасающихся друг с другом, и характером своего соприкосновения, определяющим вид относительного движения. Такое подвижное сочленение называют кинематической парой (КП).

В зависимости от устройств в КП могут возникать значительные и разнообразные по характеру напряжения и температуры. В них действуют силы трения и, следовательно, происходит износ, то есть, возникают условия, существенно влияющие на работоспособность полимерных материалов и, соответственно, на ресурс сложных машин и агрегатов. Умелый выбор пластмассы из множества разновидностей, полимерных материалов, предлагаемых современной промышленностью, представляется важнейшим компонентом создания конкурентоспособной продукции. Для этого имеет смысл разобраться с кинематикой сопряжений как таковой.

Кинематические пары (КП) можно классифицировать по двум основным признакам, а именно: по геометрии поверхности соприкосновения и по виду относительного движения соприкасающихся элементов (звеньев).

По геометрии соприкосновения КП подразделяются на низшие и высшие.

Низшими называются такие КП, элементы которых соприкасаются и совершают относительное движение по поверхности скольжения.

Конструктивно они просты, реализуют наиболее распространенные виды относительного движения (вращательное, прямолинейное поступательное), позволяют передавать большие нагрузки от звена к звену при компактных размерах кинематических элементов и незначительных давлениях в них. Последнее обстоятельство способствует минимальности износа элементов и сохранению их первоначальной геометрии, чем достигается постоянство заданных параметров движе-

ния в течение длительного времени. Все низшие КП обладают также немаловажным в конструктивном отношении свойством обратимости, которое заключается в том, что два звена могут совершать относительно друг друга одинаковые движения не зависимо от того, которое из них будет неподвижным.

Существенный недостаток низших пар состоит в возникновении между их элементами трения скольжения при передаче движения от звена к звену. Это снижает коэффициент полезного действия передачи.

Низшие кинематические пары, обеспечивающие требуемое относительное движение, конструктивно могут быть оформлены различным образом (табл. 2.1).

Высшими называются такие пары, элементы звеньев которых соприкасаются в точке или по линии и при этом могут перекатываться друг по другу, скользить друг по другу или одновременно перекатываться и скользить (табл. 2.2).

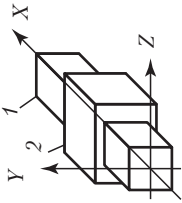
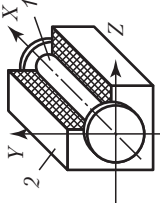
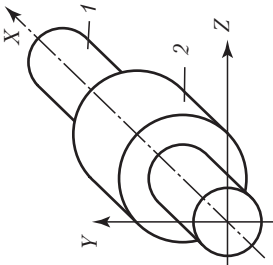
В высших парах соприкосновение кинематических элементов звеньев происходит практически по малым площадкам, образующимся вследствие деформации звеньев в контакте, поэтому в отношении износа они находятся в менее благоприятных условиях, чем низшие КП. При передаче больших усилий для предотвращения перегрузок в контакте размеры кинематических элементов звеньев в высших парах приходится соответственно увеличивать. Высшие пары не обладают также и свойством обратимости.

Несмотря на отмеченные недостатки, высшие пары, так же как и низшие, широко применяются в разнообразных технических устройствах. Если с помощью высшей пары осуществляется только перекатывание элементов или перекатывание при небольшом проскальзывании, то этим достигается значительное повышение КПД механизма и машины. Кроме того, с помощью высших пар возможны многочисленные удачные конструктивные решения по передаче и преобразованию движений. Высшие кинематические пары находят применение в зубчатых зацеплениях, во фрикционных передачах, в шариковых и роликовых подшипниках и др.

С точки зрения выбора пластмассы для высших кинематических пар важен анализ происходящего непосредственно в контакте рабочих звеньев, который рассмотрим на примере сопряжения «каток – плоскость».

На рис. 2.7 представлена схема взаимодействия пластмассового катка 1 с абсолютно жесткой плоскостью 2. К катку приложено усилие Q , вызывающее реакцию плоскости R_n . Вязкоупругий каток сдеформиро-

Таблица 2.1. Разновидности низших кинематических пар [17]

Пара	Эскиз	Кинематические элементы звеньев	Движения, совершаемые звеньями относительно друг друга	Примеры применения пар
Поступательная (призматическая)		Поверхности сплошной (1) и полый (2) призм одинакового сечения	Поступательное движение вдоль оси X (одно возможное перемещение)	От механизмов регулировки зазоров валковых машин до устройств натяжения цепных передач пропильных машин
Вращательная (простой шарнир)		Поверхности сплошного (1) и поллого (2) цилиндров равных диаметров, а также плоские кольцевые поверхности по торцам, образуемые буртами	Вращательное движение вокруг оси X (одно возможное перемещение)	Подшипники скольжения, простые шарниры
Цилиндрическая		Поверхности сплошного (1) и поллого (2) цилиндров равных диаметров	Поступательное движение вдоль оси X и вращательное движение вокруг этой оси (два возможных перемещения)	Толкатели поршневые кольца, штолки

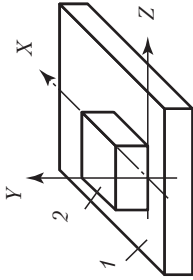
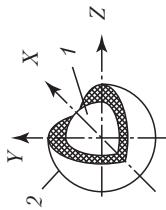
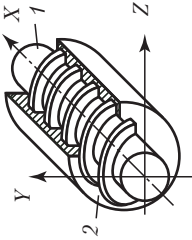
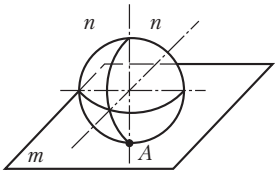
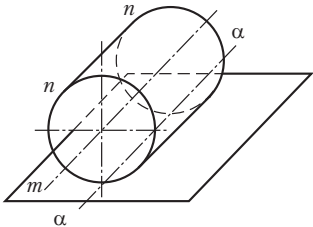
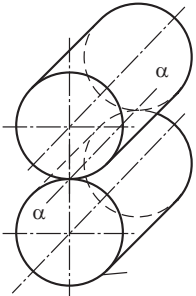
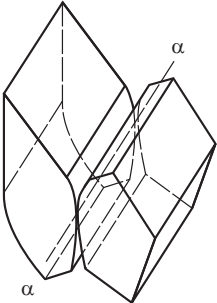
Плоскостная		Поверхности двух плоскостей 1 и 2	Поступательные движения вдоль осей X и Z и вращательное движение вокруг оси Y (три возможных перемещения)	Скользун литевых машин, прессов, переключатели, защелки
Шаровая или шаровой шарнир		Поверхности сплошного 1 и полого 2 шаров равных диаметров	Вращательные движения вокруг трех осей координат (три возможных перемещения)	Шарниры суставов костного скелета, пространственные механизмы переключений
Винтовая		Винтовые поверхности винта (1) и гайки (2) равных диаметров	Движение винтовое (одно возможное перемещение по оси вращения)	Винт и гайка (грузовые или кинематические)

Таблица 2.2. Примеры высших кинематических пар [17]

Пара	Эскиз	Кинематические элементы звеньев	Примеры применения пар
Шар на плоскости		Шаровая поверхность nn и плоскость m . Соприкосновение элементов в точке A	Образующие шарикоподшипников
Цилиндрический каток на плоскости		Цилиндрическая поверхность nn и плоскость m . Соприкосновение элементов по прямой линии $\alpha-\alpha$	Образующие роликоподшипников, лобовые фрикционные передачи, колесо по рельсу или по дорожному полотну
Два цилиндра		Поверхности двух цилиндров. Соприкосновение элементов по прямой линии $\alpha-\alpha$	Катки фрикционных передач, валки каландров, валки прокатных устройств
Два профиля		Поверхности двух профилей. Соприкосновение элементов по прямой линии $\alpha-\alpha$	Зубчатые, червячные передачи

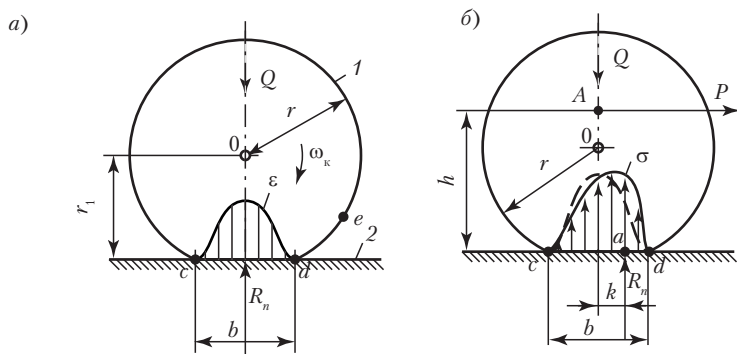


Рис. 2.7. Схема кинематического (а) и силового (б) взаимодействия рабочих элементов высшей кинематической пары «каток (1) – плоскость(2)»

ван на участке шириной b (рис. 2.7 а). При качении катка с $\omega_k = \text{const}$, окружная скорость точки c (v_c) изменяется от $v_c = \omega_k r$ до $v_c = \omega_k r_1$ и затем до $v_d = \omega_k r$, причем $r_1 < r$. Отсюда $v'_c < v_c$ и относительное скольжение $\varepsilon = (v_c - v'_c)/v_c$ изменяется синусоидально на отрезке длиной $d - c = b$ от 0 до \max и опять до 0.

Изложенное свидетельствует, что в контакте на участке длиной b качение катка сопровождается трением скольжения.

Силовой анализ сопряжения (рис. 2.7, б) показывает, что при качении катка ранее симметричная (в покое) эпюра напряжения сжатия σ , вызванная действием силы Q (пунктирная линия), приобретает более сложный характер со смещением ее центра тяжести в направлении движения на величину k (рис. 2.7, б). Из условия равновесия моментов произвольно расположенного усилия P , равного $M_{\text{сдв}} = P \cdot h$, и момента силы сопротивления движению $M_{\text{с.д}} = R_n \cdot k = Q \cdot k$ получаем, что величина момента сопротивления движению пропорциональна величине k , называемой коэффициентом трения качения, которая в свою очередь зависит от размера b , то есть от деформации сжатия катка в силовом контакте и, следовательно, от жесткости полимерного материала.

Таким образом, при выборе материалов, например, для изготовления зубчатых колес предпочтительны пластики с высоким модулем упругости, повышенной усталостной прочностью и износостойкостью при минимальном коэффициенте трения скольжения. Детальный анализ такой кинематической пары и, соответственно, более широкий перечень требований к выбираемым ПМ приведен в главе 3.

Заключение

Суть изложенного во этой главе заключается в том, что пластмассы, являясь весьма сложным материаловедческим объектом, тонко реагирующим на, казалось бы, несущественные элементы условий эксплуатации, требуют более тщательного и развернутого учета обстоятельств их использования. Причем реакция полимера на эти обстоятельства определяется химическими и физическими свойствами полимера. Одних табличных свойств пластиков недостаточно для получения надежных положительных результатов. В большинстве соединений, кроме значений разрушающего напряжения, необходимо знание степени проявления упругих характеристик ПМ, в пределах которых обеспечивается устойчивая эксплуатация изделий и конструкций. При этом проявление упругости на фоне релаксационных свойств полимера будет определяться как характером объемного нагружения, так и особенностями контактного взаимодействия пластмассовых изделий, а оно, в свою очередь, зависит от кинематики подвижного сопряжения, в котором могут возникать условия, принципиально отличающиеся от очевидных. Так, например, выход из строя зубчатой передачи может определяться не изгибной прочностью пластмассы, а ее истираемостью в условиях высшей кинематической пары, элементы которой совершают не только относительное качение, но и скольжение. Замковые соединения при эксплуатации могут утрачивать потребительскую ценность вследствие переоценки проектировщиком прочностных характеристик полимера и одновременного недостаточного учета его релаксационных и пластических свойств. К сожалению, нередко переоценивается роль статической прочности при выборе ПМ для резьбовых соединений и практически не используются особые свойства пластиков, проявляющиеся в контакте двух полимерных поверхностей, совершающих относительное скольжение, особенно при воздействии вибрации. При выборе пластмассы для уплотнительной детали, работающей на сжатие в условиях пульсации, не учитывается в полной мере способность полимера к упруго-пластическому заполнению микротрещин шероховатого рельефа.

На наш взгляд, при инженерном выборе пластмасс необходимо более полно учитывать такие пока еще не слишком популярные условия, как характер нагружения, вид возникающих напряжений, особенно если они периодические, геометрический характер подвижных сопряжений, их конструкцию и кинематику. Решению этих задач в конкретных применениях пластмасс посвящена следующая глава.

3. Инженерно-конструкторские критерии

***Закон Айлза.** Всегда есть более легкий способ что-либо сделать.*

***Кредо Финэйгла.** Наука всегда верна. Пусть вас не уведут в сторону факты.*

А. Блох

Под инженерно-конструкторскими критериями выбора пластмасс понимается учет условий работы материала в конкретном соединении или сопряжении, определяемом назначением технического устройства, его конструкцией и кинематикой сборочного узла. Этот учет происходит на фоне оцененных ранее внешних энергетических условий (удельные нагрузки, температура, релаксационные и иные процессы) и ограничений, перечисленных в предисловии.

3.1. Групповая классификация изделий из ПМ

С позиций классической механики все изделия, то есть детали, применяемые в технических устройствах, подразделяются на специальные и общие. Специальные — присутствуют в машинах, механизмах и иных устройствах только в качестве их специфических исполнительных элементов. Критерии выбора пластмасс для таких изделий также специфичны, многообразны и эксклюзивны.

Общими называют изделия или детали, которые существуют или могут находиться в абсолютном большинстве технических устройств, независимо от их конкретного назначения и конструктивных особенностей.

Такие детали (изделия) общего назначения по областям применения можно разделить на четыре группы.

1. Детали соединений (резьбовые, замковые, прессовые, штифтовые, клиновые).
2. Детали уплотнений.

3. Детали и узлы механических передач (зубчатые, червячные, фрикционные, ременные, цепные).
4. Детали и узлы, поддерживающие или изменяющие движение (подшипники качения и скольжения, фрикционные устройства).

Применительно к пластмассам такой подход требует уточнений. С позиций инженерно-конструкторского оформления, требований и условий работы все изделия из пластмасс можно сгруппировать по ряду дополнительных признаков.

1. **По геометрическим особенностям** все изделия из полимерных материалов подразделяются на погонажные и штучные.

Количество погонажного изделия измеряется погонными метрами. Разновидностей подобных изделий, различающихся, прежде всего, геометрической формой поперечного сечения, сравнительно немного — это пленки, шланги, трубы, рулонные изделия (линолеум, тонкие листы), различные профили (уголки, швеллеры, тавры и двутавры, сайдинги, полые профили сложной геометрии), прутки и др. Основным методом получения погонажных изделий является экструзия.

Штучные изделия занимают, безусловно, первое место в ассортиментном перечне изделий из пластмасс, что и отражается большинством последующих классификационных признаков.

2. **По устройству** изделия из пластмасс можно разделить на монолитные, состоящие полностью из пластмассы одного вида; гибридные — выполненные из двух или более видов полимерных материалов, каждый из которых представлен непрерывным участком изделия; армированные, когда в конструкцию изделия включены детали из других материалов, отличающихся по свойствам (металл, цветные сплавы, керамика). Такие детали имеют самостоятельное назначение (резьбовые вставки, втулки и ступицы, образующие разъемные соединения с металлическими деталями в виде валов, осей, стержней и др.). Армированными могут быть как монолитные, так и гибридные изделия.

3. **По назначению** различают следующие группы штучных изделий:

Резьбовые детали — штучные изделия массового производства. К ним относятся винты и болты с различной по форме головкой, гайки разнообразной конфигурации, резьбовые вставки, вкладыши и т. п. Наличие резьбы на наружной или внутренней части изделий создает технологические трудности при их формовании, а также существенно влияет на прочность. При инженерной оценке пластика учитывают, что резьбовые детали, служащие для разъемных соединений, работают

в сложнапряженном состоянии, склонны к внутренним напряжениям, чувствительны к их концентраторам. К ним предъявляются требования прочности, жесткости, размерной стабильности, долговечности.

Детали передач служат для передачи и преобразования вращательного или поступательного движения. К ним относятся зубчатые и червячные колеса, в том числе мелко модульные, детали винтовых передач, шкивы передач гибкой связью, элементы цепных передач. Они широко применяются в механизмах приборов и устройств бытового и технического назначения; как правило, характеризуются развитой геометрической формой, а по устройству могут быть монолитными и армированными.

Выбор пластмасс является ответственной инженерной задачей, поскольку детали передач эксплуатируются в сложных и тяжелых условиях нагружения (одновременное действие знакопеременных динамических, нормальных и касательных напряжений, контактные деформации), сопровождаемых трением качения и скольжения. К ним предъявляются повышенные требования в отношении прочности, геометрической точности, размерной стабильности, долговечности.

Детали устройств, поддерживающих движение. Это, главным образом, рабочие элементы подшипников качения и скольжения. Из пластмасс изготавливают втулки, вкладыши, сепараторы, тела качения, накладки так называемых скользунов и другие детали сравнительно несложной конфигурации. Основные особенности: детали эксплуатируются в условиях трения, вызывающего их истирание, они взаимодействуют при повышенных температурах и нагрузках. Кроме инженерных параметров точности и размерной стабильности к таким деталям предъявляются специфические требования — определенные антифрикционные качества и повышенная износостойкость.

Детали уплотнений — обычно это изделия простой геометрической формы в виде колец, дисков, манжет, прокладок. Форма сечений — круглая, прямоугольная, овальная или более сложной конфигурации. В отдельных случаях они могут армироваться металлическими пружинами и кольцами, иметь защитную окантовку. Главная инженерная особенность, определяющая выбор пластмассы, — работа в напряженном статическом состоянии (кроме манжет, испытывающих более сложные динамические нагрузки).

Основное инженерное требование — сохранение упругодеформационных характеристик в течение заданного времени эксплуатации.

Корпусные изделия служат для размещения на или внутри них различных технических устройств. Нередко это узлы электромеханического, электронного или радиотехнического назначения. Корпусные детали могут иметь коробчатую форму прямоугольного, круглого или более сложного сечения, форму сложнопрофильных плат, пластин, рамную конфигурацию.

Выбор размеров и форм корпусных изделий зависит от их назначения, а также от вида и действия размещаемых технических устройств.

Инженерный расчет корпусных деталей носит, как правило, условный, проверочный характер. При инженерном выборе материала учитывают основные предъявляемые к ним требования — жесткость, размерная стабильность, сохранение геометрических соотношений отдельных элементов изделия, например, плоскопараллельность поверхностей, соосность отверстий и резьбовых гнезд, отсутствие коробления.

Емкости имеют вид штучных изделий различной геометрической формы, объем — от нескольких кубических сантиметров до кубометров (флаконы, канистры, бочки, защитные оболочки). Обычно основными требованиями к таким изделиям являются длительное сохранение исходной геометрической формы, долговечность и минимальная стоимость, а также герметичность разгрузочных и загрузочных узлов. Расчет емкостей на прочность носит оценочный характер.

Детали трубопроводов представляют собой в большинстве случаев геометрически несложные элементы. По номенклатуре это главным образом трубы различной конструкции, а также фитинги (муфты, уголки, крестовины, тройники). Арматура трубопроводов (задвижки, краны, фланцевые соединения и т. п.) представляет собой достаточно сложные устройства, объединяемые с перечисленными выше изделиями условиями эксплуатации.

Внутреннее давление рабочего тела (жидкость, газ), его температура, прочность, термо- и релаксационные свойства пластмасс — главные факторы инженерного выбора материала. Эффективный выбор пластмассы невозможен и без учета специфических особенностей изделия, а именно: сама конструкция пластмассовой детали, кроме прочности, долговечности и функционального соответствия, должна обеспечивать еще и ее технологичность. Это означает нижеследующее — форма и устройство детали должны быть предельно простыми, что способствует упрощению и, следовательно, удешевлению дорогостоящей формирующей оснастки. Контур отдельных элементов детали должен обеспечить легкость ее извлечения из формы, в том числе с использо-

ванием захватных устройств роботов-манипуляторов. Требуется, чтобы материалоемкость детали была минимальной, но при этом в ней не было бы участков, ослабленных опасными утоньшениями, надрезами, отверстиями, острыми углами сопрягаемых поверхностей. Физико-механические характеристики должны быть одинаковыми на любом участке детали.

Перечисленные пожелания чрезвычайно сложны в исполнении. Например, одинаковость физико-механических характеристик обеспечивается, прежде всего, равномерным остыванием расплава термопласта в формующей камере или одинаковой скоростью химической реакции отверждения, если речь идет о реактопласте. Как следствие, важным требованием к получаемому изделию становится не только равнотолщинность, обеспечить которую на практике весьма непросто, но и выбор пластика с оптимальной тепло- и температуропроводностью.

Создание равномерного температурного поля в пределах формообразующей камеры пресс-формы — другая сложная задача.

В связи с изложенным, основные правила конструирования пластмассовых деталей, базирующиеся на многолетнем опыте практиков, сводятся к следующему:

- деталь должна быть по возможности равнотолщинной;
- деталь должна иметь технологические уклоны;
- жесткость детали должна создаваться не толщиной ее стенки, а умелым применением ребер жесткости и иных конструктивных элементов;
- деталь должна иметь плавные закругления на участках сопряжения формообразующих поверхностей;
- конфигурация детали, в том числе при наличии в ней армирующих вставок, должна исключать появление внутренних напряжений в процессе ее формирования и эксплуатации;
- конфигурация детали должна обеспечивать легкость ее извлечения из формы; при этом в процессе формообразования течение расплава полимера, заполнившего форму, должно происходить без помех.

Отметим, что хотя технологическая оценка выбираемых пластмасс не входит в содержание настоящей книги, ибо она достаточно полно освещена в соответствующих монографиях, но обратить внимание читателя и на эти особенности автор посчитал вполне целесообразным.

3.2. Резьбовые детали

Резьбовые детали являются едва ли не самыми тиражными из штучных изделий. Именно это обстоятельство служит причиной широкого применения полимерных материалов для их изготовления. Резьбы применяются главным образом в разъемных соединениях и, реже, для передачи сил и движения винтовыми механизмами, то есть они могут использоваться для выполнения двух абсолютно противоположных функций — первая, наиболее частая, — предотвращение относительного движения, смещения соединяемых деталей, и вторая — передача движения с минимальными потерями. Одно это обстоятельство показывает, что при инженерном выборе пластмасс для резьбовых изделий должна учитываться их кинематика.

3.2.1. Общие понятия, определения и обозначения

Резьба может быть изготовлена как на наружной, так и на внутренней поверхности цилиндра или конуса. В первом случае она называется наружной, во втором — внутренней цилиндрической или конической резьбой.

Стержень, имеющий наружную резьбу, носит общее название винта, а деталь с внутренней резьбой или изделие, накручиваемое на винт, в общем случае называется гайкой. Именно эти термины используются в дальнейшем.

Любая резьба строится по винтовой линии. Винтовой называется линия, образованная гипотенузой огибаемого вокруг цилиндра прямоугольного треугольника, у которого один из катетов, совпадающий с плоскостью основания цилиндра, равен длине окружности цилиндра, представляя ее развертку (рис. 3.1). Угол α_1 наклона гипотенузы к этому катету называется углом подъема винтовой линии, а катет, противоположный углу подъема, называется шагом винтовой линии H .

Шаг винтовой линии H есть расстояние, измеренное по образующей цилиндра между двумя соседними точками одной и той же винтовой линии. Из рис. 3.1 очевидно, что

$$H = \pi d_1 \operatorname{tg} \alpha_1,$$

а длина одного витка винтовой линии равна длине гипотенузы треугольника (l).

Смещая согнутый треугольник вдоль оси цилиндра на величину шага H , можем продолжить построение винтовой линии.

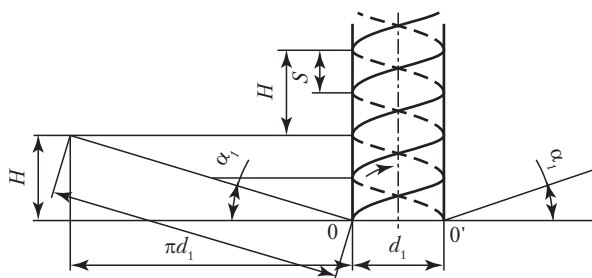


Рис. 3.1. Схема образования непрерывной винтовой линии (правой).
Пояснения в тексте

Поворачивая согнутый треугольник относительно цилиндра на некоторый угол, можно получить новые винтовые линии, отстоящие друг от друга на расстоянии S .

Если треугольник огибать вокруг цилиндра вправо, получим правую винтовую линию, если влево — левую. На рис. 3.1 изображены две правые винтовые линии, смещенные относительно друг друга на 180° .

Изготавливая по винтовой линии канавку определенного профиля, получают резьбу.

Если резьбовой профиль перемещать по одной винтовой линии, получим одноходовую резьбу. При перемещении профиля по нескольким винтовым линиям получим многозаходные резьбы: двухзаходную — при смещении винтовых линий на 180° , трехзаходную — при смещении на 120° и четырехзаходную — при смещении на 90° . С большей заходностью резьбы, как правило, не изготавливаются.

У резьбовых изделий следует различать шаг и ход резьбы.

Шагом резьбы S называется расстояние, измеренное вдоль оси винта между параллельными сторонами двух рядом лежащих витков.

Ходом резьбы H называется расстояние, на которое перемещается винт вдоль своей оси при одном полном повороте в неподвижной гайке.

Ход резьбы равен шагу, умноженному на число заходов (a):

$$H = Sa. \quad (3.1)$$

У резьбы любого профиля различают наружный (d), внутренний (d_1), средний (d_2) диаметры, по которому и принято определять угол подъема (α), а также угол профиля резьбы (β) и рабочую высоту витка (h) (рис. 3.2).

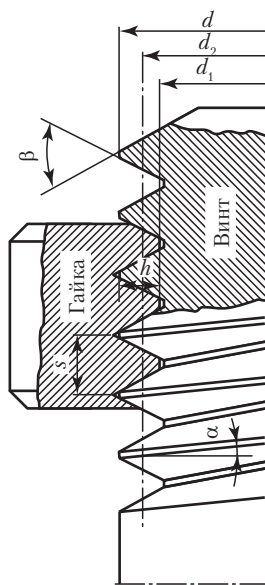


Рис. 3.2. Геометрические параметры резьбы (на примере треугольной резьбы); детали выполнены из пластмассы. Пояснения в тексте

Конструкторские справочники предусматривают использование различных видов резьб, а именно (рис. 3.3): с треугольным профилем метрическую ($\beta = 60^\circ$) и дюймовую ($\beta = 55^\circ$), цилиндрическую и коническую, крупно- и мелкошаговую. Кроме того, допускаются резьбы с прямоугольным (как исключение), трапецидальным, упорным, круглым профилем. Большинство рекомендаций по выбору вида резьбы и ее геометрическим параметрам для пластмассовых изделий опираются на опыт работы с металлами.

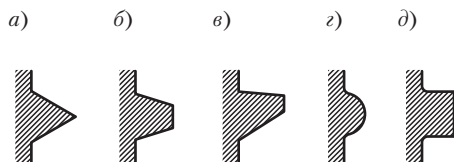


Рис. 3.3. Основные виды резьб:

а — треугольная; б — трапецидальная; в — упорная; г — круглая; д — прямоугольная

3.2.2. Трение в резьбовой паре

Трение реализуется при относительном движении звеньев (деталей), образующих подвижное соединение. В резьбовых парах трение возникает либо в процессе сборки (разъемные соединения), либо при работе (винтовые передачи движения). Резьбы винта и гайки образуют кинематическую пару, элементы которой соприкасаются по поверхности или по линии. Вращение одного из элементов сопровождается одновременным осевым движением либо этого элемента, например, винта при неподвижной гайке, либо другого, например, гайки относительно винта. Приложенное к одному из элементов осевое усилие вызывает в резьбе трение скольжения, сила которого (F) описывается широко известным уравнением Кулона:

$$F = N\mu_{\text{тр}}, \quad (3.2)$$

где N — осевое усилие; $\mu_{\text{тр}}$ — коэффициент трения.

Величина коэффициента трения зависит, прежде всего, от триботехнических свойств материалов, образующих пару трения.

В технике абсолютное большинство резьбовых узлов представлено парой металл–пластмасса и именно инженерный выбор полимерного материала определяет эффективность таких конструкций.

В большинстве показанных на рис. 3.3 видах резьб (кроме круглой) реализуются низшие кинематические пары (скольжение по поверхности). Круглые резьбы требуют дополнительного анализа.

Рассмотрим трение в резьбе на примере резьбы с прямоугольным профилем (рис. 3.4, а, поз. 1). Для этого развернем один виток винта с однозаходной нарезкой и представим его в виде наклонной

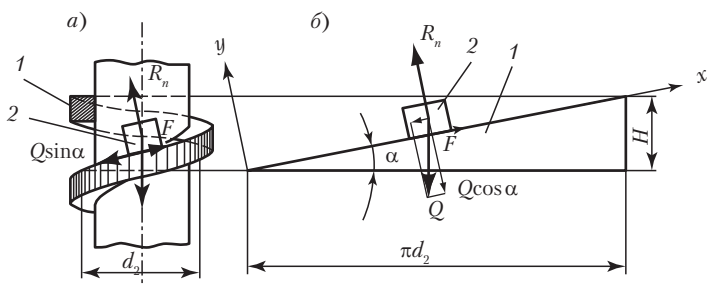


Рис. 3.4. Схема сил, действующих в резьбовой паре (на примере прямоугольной резьбы)

плоскости (рис. 3.4, б, поз. 1). Пластмассовую, или из иного материала, гайку представим в виде параллелепипеда (рис. 3.4, поз. 2), скользящего по резьбе винта (1) и нагруженного действующей со стороны винта, сосредоточенной осевой силой Q .

В условиях равновесия приложенных сил сумма их проекций на оси x и y равна 0.

$$\Sigma x = F - Q \sin \alpha = 0; \quad (3.3)$$

$$\Sigma y = R_n - Q \cos \alpha = 0. \quad (3.4)$$

Отсюда

$$F = Q \sin \alpha; \quad (3.5)$$

$$R_n = Q \cos \alpha \quad (3.6)$$

и учитывая, что

$$F = R_n \mu_{\text{тр}}, \quad (3.7)$$

то

$$Q \cos \alpha \mu_{\text{тр}} - Q \sin \alpha = 0. \quad (3.8).$$

Далее

$$Q \cos \alpha \mu_{\text{тр}} = Q \sin \alpha \quad (3.9)$$

$$\mu_{\text{тр}} = \sin \alpha / \cos \alpha = \operatorname{tg} \alpha,$$

а поскольку $\mu_{\text{тр}} = \operatorname{tg} \rho$, где ρ — угол трения, окончательно получаем: равновесие системы достигается при

$$\rho = \alpha \quad (3.10)$$

Таким образом, при $\alpha > \rho \rightarrow Q \sin \alpha > F$ и реализуется эффект относительного движения элементов резьбовой пары под действием статического осевого усилия Q . В практике это называется саморазвинчиванием. Соответственно, при $\alpha < \rho$ реализуется самоторможение.

С позиций инженерного выбора, пластмассы для резьбовых деталей соединений должны быть фрикционными, то есть с максимальным углом и коэффициентом трения, а для узлов винтовых передач — антифрикционными, то есть с минимальным углом и коэффициентом трения.

Решению условия $\alpha < \rho$ в требуемом направлении способствуют и конструкторские приемы. Так, переход от однозаходной резьбы с крупным шагом к мелкошаговой резьбе (рис. 3.5) приведет к умень-

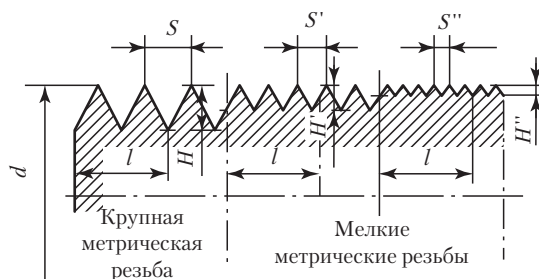


Рис. 3.5. Разновидности метрических резьб

шению угла подъема резьбы и, соответственно, к достижению условия самоторможения $\alpha < \rho$ при неизменном значении угла трения, то есть без изменения вида ПМ.

На величину ρ существенно влияет и профиль используемой резьбы. Из схемы сил, приведенной на рис. 3.6, следует, что в каждом единичном i -том витке винта (поз. 1) действует активное осевое усилие q_i , причем $\sum_i q_i = Q$.

Соответственно на каждом витке гайки возникает реактивное усилие r_i , причем $\sum_i r_i = R$, а $R = Q$. По нормали к поверхности профиля

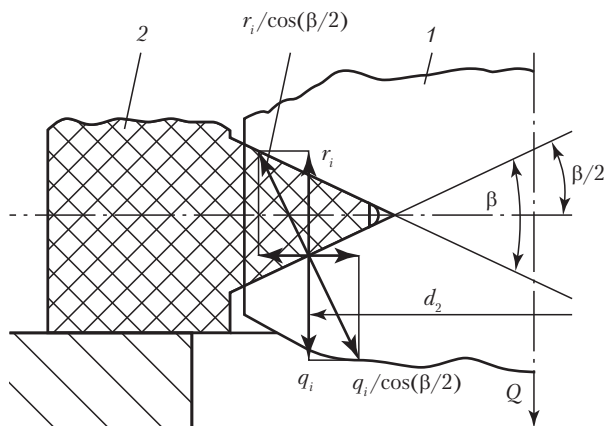


Рис. 3.6. Схема сил, действующих в сопряжении с треугольной резьбой:
1 — винт; 2 — гайка

витка резьбы действуют активные усилия $q_i/\cos(\beta/2)$ и $r_i/\cos(\beta/2)$. Поскольку

$$\Sigma q_i/\cos(\beta/2) = Q_i = Q/\cos(\beta/2)$$

и аналогично

$$\Sigma r_i/\cos(\beta/2) = R_i = R/\cos(\beta/2),$$

то сила трения в резьбе этого профиля (F_n):

$$F_n = R_n \mu_{\text{тр}} = (R_i \mu_{\text{тр}})/\cos(\beta/2) = Q(\mu_{\text{тр}}/\cos(\beta/2)) = Q \mu_{\text{пр}}, \quad (3.11),$$

где $\mu_{\text{пр}} = \mu_{\text{тр}}/\cos \beta/2$.

Здесь $\mu_{\text{тр}}$ — коэффициент трения на поверхности, перпендикулярной вектору силы Q , то есть его табличное значение.

Таким образом, чем больше величина угла профиля резьбы, тем больше (в условиях тригонометрической функции) будет величина приведенного угла трения.

В ряду резьб с углами профиля 60° (метрическая, треугольная), 55° (дюймовая, треугольная), 30° (трапецидальная), 3° (упорная) при прочих равных условиях наибольшее значение угла трения будет в резьбе метрической треугольной, а наименьшее — в упорной.

Достижение условия самоторможения резьбы переходом от крупношаговой к мелкошаговой применительно к ПМ не столь очевидно. Дело в том, что уменьшение шага резьбы сопровождается уменьшением глубины нарезки от H до H'' (по обозначениям на рис. 3.5). А поскольку получение резьбовых изделий из ПМ формованием из расплава (литье под давлением, прессование) всегда сопровождается радиальной усадкой, то последняя неминуемо вызовет пропорциональное уменьшение рабочей высоты витка, что приведет к частичной утрате прочности соединения. Таким образом, для резьбовых деталей с мелкой резьбой могут выбираться только ПМ с минимальной усадкой, например фено- или аминопласты или стеклонаполненные полиэпоксиды.

Особняком к перечисленной группе резьб располагается резьба с круглым профилем, схематически изображенная на рис. 3.7. Ее профиль представляет собой сочетание окружностей, сопрягающихся в точке, расстояние от которой до оси вращения составляет $0,5d_2$. Соприкосновение двух криволинейных поверхностей, отличающихся знаком кривизны, происходит по линии или в точке (на схеме это точка k). Таким образом, данное сопряжение является высшей кинематической парой, при этом касательная $T - T$, построенная к профилям

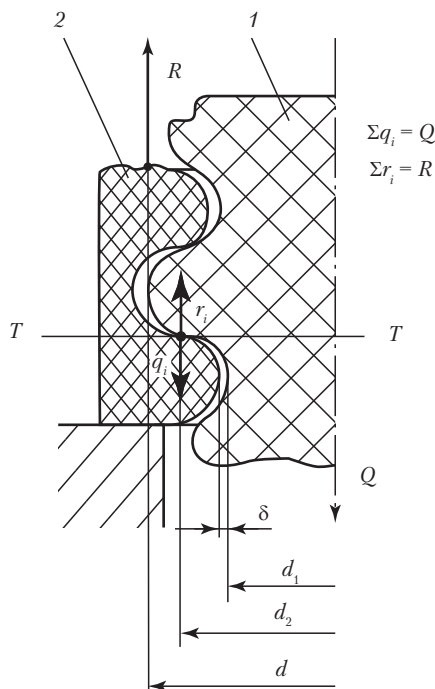


Рис. 3.7. Схема сил, действующих в сопряжении с круглой резьбой:
1 — винт; 2 — гайка

в точке k , перпендикулярна оси вращения. Следовательно, векторы активных (q_i) и реактивных (r_i) усилий, приложенных к виткам, параллельны вектору главной нагружающей силы Q и реакции R .

Определить значение силы трения в круглой резьбе весьма непросто из-за неприменимости закона Кулона к высшим кинематическим парам. Можно лишь сформулировать следующие соображения.

1. Вследствие линейности сопряжения элементов резьбовой пары и, соответственно, минимальности его площади, напряжение сжатия на поверхности контакта может достигать значительных величин (теоретически, поскольку $\sigma_{сж} = Q/S$, а $S \rightarrow 0$, то при любом Q $\sigma_{сж} \rightarrow \infty$).

2. Величина силы трения скольжения в таких условиях может быть весьма значительна.

3. В этом случае основным фактором, определяющим трение и инженерный выбор материалов для круглорезьбовых деталей, будут их

триботехнические свойства, включающие в комплексе и коэффициент трения, и твердость, и прочность материала.

4. При отсутствии сборочного или усадочного зазора δ величина силы трения в резьбовом сопряжении существенно возрастает в результате плотного соприкосновения витков винта и гайки и дополнительного трения при скольжении элементов кинематической пары. Отметим, что в этом случае несколько затрудняются операции сборки–разборки, но улучшается герметичность соединения.

3.2.3. Крепежные резьбы

Как отмечалось ранее, применение пластмасс особенно эффективно в производстве крупнотиражных изделий, к которым относятся болты, винты, гайки, шпильки и др., а также детали типа винтовых пробок с наружной или внутренней резьбой, фрагменты корпусных деталей с резьбовыми отверстиями в бобышках, приливах, фланцах и др. Напомним, что под гайкой понимается любая по конфигурации деталь с резьбовым отверстием.

3.2.3.1. Концентраторы напряжений

Конструкторские справочники предусматривают использование различных видов резьб, а именно, с треугольным профилем метрическую и дюймовую цилиндрическую и коническую, крупно- и мелкошаговую. Большинство рекомендаций по выбору вида резьбы и ее геометрическим параметрам для пластмассовых изделий опираются на опыт работы с металлами и практически не учитывают специфических требований к конструкции резьбовых деталей из ПМ. Между тем анализ геометрии треугольных резьб показывает, что их контур насыщен фрагментами, способствующими концентрации напряжений. Действительно, в местах перелома геометрической поверхности в основании витка из ПМ возникают концентраторы напряжений, способствующие образованию микротрещин и дальнейшему излому резьбового выступа (рис. 3.8). Меньшие по величине, но имеющие место быть концентраторы напряжений фиксируются и в вершине резьбового профиля. Их наличие приводит в процессе эксплуатации к нарушению исходного геометрического профиля в вершине выступа.

В связи с изложенным рекомендуется в основании профилей витков выполнять скругления радиусом $r = 0,144s$, а в вершинах витков — $r_1 = 0,054s$ (рис. 3.10).

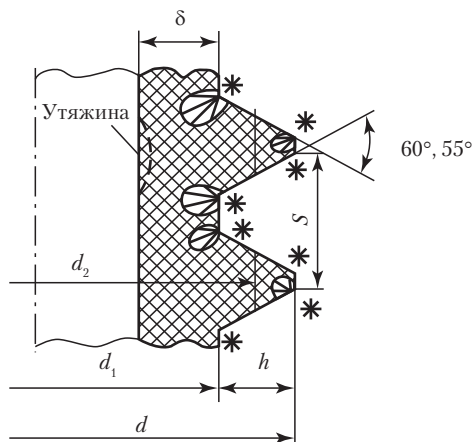


Рис. 3.8. Профиль треугольной резьбы с концентраторами напряжений (*)

В круглых резьбах вероятность концентрации напряжений сведена к минимуму (рис. 3.9). Кроме того, этот вид резьбы допускает ее использование в тонкостенных изделиях, что весьма полезно, поскольку современная технология переработки пластмасс стремится к производству изделий с минимальными толщинами стенок, что позволяет уменьшить удельный расход дорогостоящего сырья. Кроме того, круглые резьбы технологичнее треугольных.

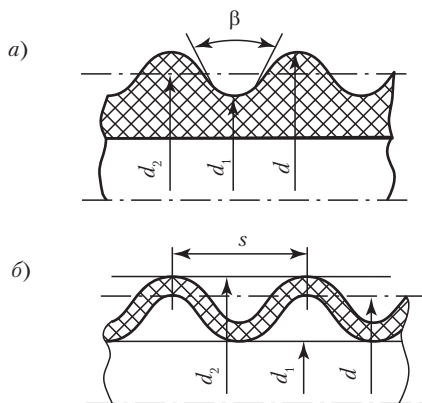


Рис. 3.9. Профиль круглой резьбы:
 а — толстостенное изделие; б — тонкостенное

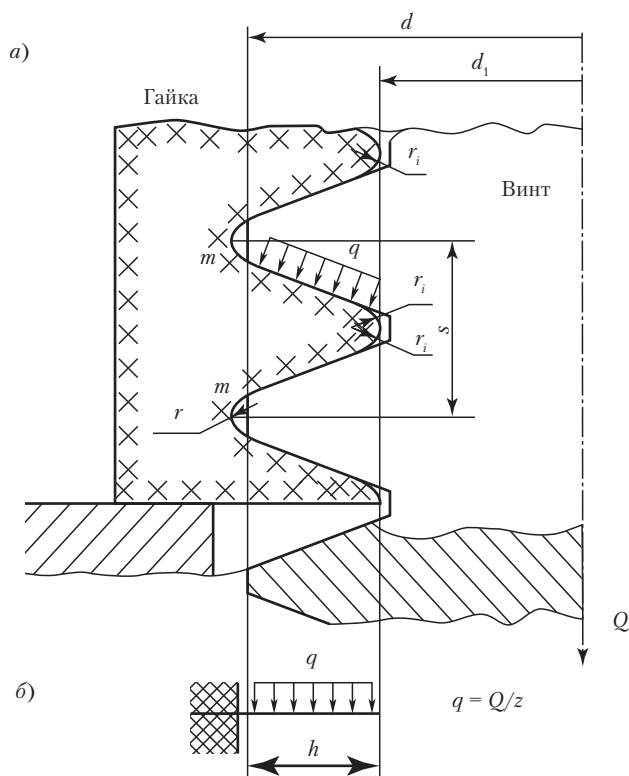


Рис. 3.10. Схема нагружения треугольной резьбы в паре гайка–металлический винт. Пояснения в тексте

3.2.3.2. Прочностной анализ

Практика показывает, что наиболее распространенной крепежной парой является соединение типа пластмассовая гайка–металлический винт (см. рис. 3.10). В этом случае осевая нагрузка Q , приложенная к винту, передается на витки гайки, которые под ее воздействием испытывают сложнапряженное состояние изгиба от распределенного усилия $q = Q/z$, где z – число нагруженных витков гайки (рис. 3.10, б) и среза в основании резьбы по сечению $m - m$.

Эквивалентное напряжение определяется по 4-й, энергетической, теории прочности.

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{(\sigma_n^2 + 3\tau_{\text{cp}}^2)} \leq [\sigma_n]; \quad (3.12)$$

$$\sigma_{\text{н}} = (M_{\text{н}}/W) = (Qh/6)/(z/2 \pi ds^2) = 3Qh/(\pi dzs^2); \quad (3.13)$$

$$\tau_{\text{ср}} = Q/(z\pi ds). \quad (3.14)$$

Число витков резьбы принято определять по условию равнопрочности резьбы и резьбовой детали в ее опасном сечении $n-n$ в теле пластмассовой гайки (см. рис. 3.10, а).

В условии равновесия

$$\sigma_{n-n} = \sigma_{\text{экв}},$$

$$\sigma_{n-n} = Q/F_{n-n}, \quad (3.15)$$

где F_{n-n} — площадь опасного сечения гайки.

Очевидно, что эта величина зависит от конструкции соединения.

В упрощенном варианте:

$$z = Q/(\pi ds[\tau_{\text{ср}}]), \quad (3.16),$$

где $[\tau_{\text{ср}}]$ — допускаемое напряжение среза.

Допускается считать $[\tau_{\text{ср}}] \approx (0,5-0,6) [\sigma_{\text{р}}]$.

Заключение по 3.2.3

Таким образом, решая задачу инженерного выбора пластмассы для резьбового изделия, специалист сталкивается с рядом противоречивых условий:

1. Резьбовое изделие должно быть технологичным, то есть должно производиться высокопроизводительным методом. Как правило, это литье под давлением на термопластавтоматах.

2. Большинство крупнотоннажных конструкционных термопластов антифрикционны (ПП, ПЭВП, ПА, ПК, ПСФ), а это требует уменьшения угла подъема резьбы, то есть шага нарезки.

3. Отсюда следует желание использовать мелкошаговые резьбы, но они чувствительны к усадке ПМ и к концентраторам напряжений. Кроме того, при прочих равных условиях прочность пластмассовых крупношаговых резьб выше, чем мелкошаговых.

4. Поскольку резьбовые профили соприкасаются по поверхности, то желательно использовать ПМ по возможности с большей твердостью (НВ).

5. И наконец, пластмасса должна обладать длительной прочностью, то есть не отзываться на действие концентраторов напряжений и на процесс старения самого полимера.

В этом случае следует искать выход в использовании конструкционных промышленных термопластов с наполнителями, повышающими как прочность, так и коэффициент трения ПМ. Это диспергированное стекловолокно, базальтовое волокно, хлопковый линт, асбест, кварцевая мука и т. д. Из справочной литературы известно, что, например, введение в полиамиды П-6, П-12, П-66 коротковолокнистого стекловолокна повышает коэффициент трения этого ПМ примерно на 30%, а прочность — до 50–100%. Кроме полиамидов, для резьбовых крепежных изделий рекомендуется применять стеклонаполненные ПЭВП, ПП, ПВХ, ПК, ПЭТФ, ПФА, а также термореактивные ПМ типа волокнитов, АГ-4, пресс-порошков на основе фенолоформальдегидных связующих, литевых эпоксидных пластмасс.

Соединение самонарезающимися резьбами в последнее время получает все большее распространение. Его суть проста — в сквозное или глухое цилиндрическое отверстие (гайка) с диаметром, равным внутреннему диаметру резьбы металлического винта, ввертывается этот самый винт. Такая резьба имеет остроугольный профиль, способствующий процессу изготовления винтовой канавки в материале гайки. Схема сопряжения представлена на рис. 3.11.

Качественный анализ показывает, что основными особенностями этой пары являются:

- 1) отсутствие зазоров в сопряжении винт–гайка (конструктивный зазор Δ заполняется вытесняемым полимером (рис. 3.11));
- 2) неминуемость концентрации напряжений в пластмассе в вершинах профилей резьбы винта (рис. 3.11 — концентрация напряжений и $\sigma_{сж}$);
- 3) высокая вероятность образования усталостных микротрещин в зонах концентрации напряжений; развитие таких микротрещин в магистральные может привести к разрушению не только резьбы, но и пластмассовой гайки;
- 4) возникновение сдвиговых напряжений на поверхностях пластмассовой резьбы от трения вращающегося винта при его внедрении в пластик.

Из приведенного качественного анализа следует вывод:

- 1) действующие конструкторские рекомендации по расположению резьбовых отверстий на пластмассовой детали [1, 2] должны быть уточнены в сторону увеличения как расстояния между соседними отверстиями, так и расстояния от отверстия до кромки изделия или его фрагмента (бобышка, прилив, фланец).

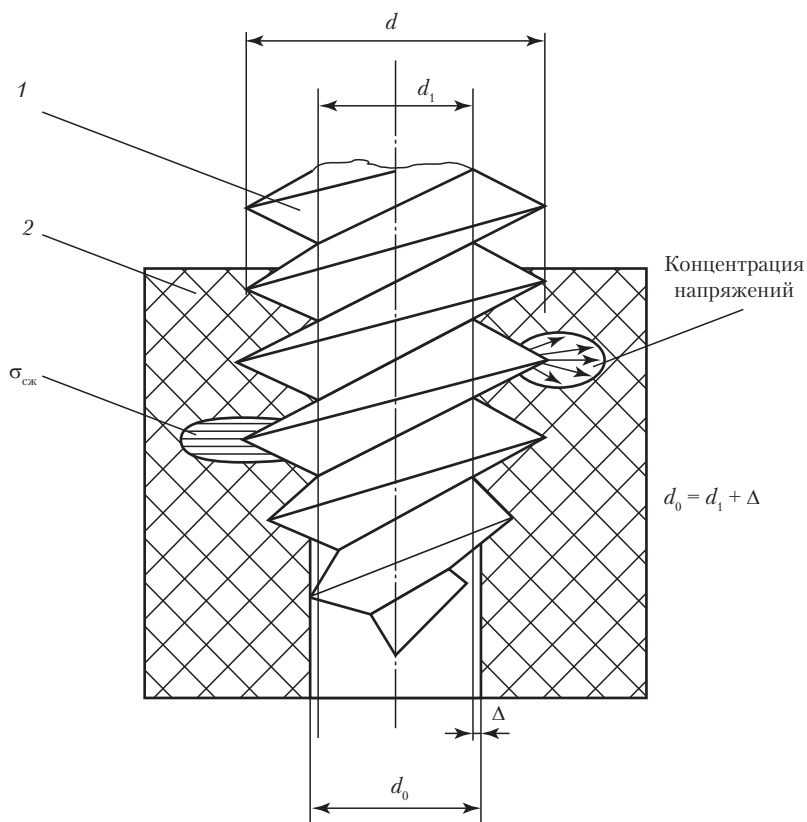


Рис. 3.11. Схема сопряжения «металлический саморезный винт-гайка из ПМ»: 1 — винт; 2 — гайка; $\sigma_{сж}$ — эпюра напряжения зоны сжатия гайки гребнем саморезного винта

В рамках инженерного выбора полимерного материала для подобных соединений рекомендуется использовать ПМ со следующими деформационно-прочностными характеристиками:

- прочность при растяжении σ_p ≥ 30 МПа;
- относительное удлинение при разрыве ϵ , % $50 < \epsilon < 150$;
- ударная вязкость a , кДж/м² $30 < a < 100$.

Не рекомендуются категорически: ФФП, МФП, стеклопластики и иные, в том числе слоистые, пластики на термореактивном связующем (гетинаксы, текстолиты, линкрусты, ДВП, ДСП и т. п.).

Не рекомендуются термопласты, разрушение которых носит хрупкий характер или сопровождается образованием трещин серебра. Это ПС, ПММА, УПС, ПЭТФ, ПБТФ, ПК.

Из перечисленного следует, что ассортимент пластмасс для саморезных соединений невелик. Это ПП, ПЭВП, ПВХ (жесткий), ПА, АБС и ПФА. Кроме того, следует учесть, что термин «самонарезание резьбы» в данном случае некорректен, поскольку при ввинчивании металлического винта в пластик происходит не нарезание, то есть процесс образования профильной канавки с удалением вырезанного материала, а происходит вдавливание гребней резьбы жесткого винта в вязкоупругую среду пластмассовой гайки. В этом случае в контакте винт–гайка создаются условия для протекания релаксационных процессов, описанных в разделе 1.2.

Следовательно, с течением времени или при изменении температуры плотность такого резьбового соединения будет самопроизвольно, то есть бесконтрольно, изменяться. Известно немало случаев, когда недостаточный учет особенностей «саморезного соединения» металл–пластмасса приводил к его разрушению и внешне из-за пустяка выводились из строя достаточно сложные по кинематике и устройству изделия, как правило, бытового назначения.

К сожалению, даже в весьма авторитетных инженерных справочных изданиях [20] на отмеченную особенность не обращается необходимого внимания.

3.2.4. Резьбы для механизмов передачи движения

Для передачи движения винтовыми механизмами применяются резьбы с минимальным значением приведенного угла трения, а именно трапецеидальная и упорная. В абсолютном большинстве случаев винтовые пары в механизмах состоят из металлического винта и пластмассовой гайки. При этом в зависимости от назначения механизмы могут быть грузовыми, передающими или воспринимающими, прежде всего, усилие (домкраты, винтовые прессы, стяжки и пр.) и ходовыми, задача которых — точная передача движения (ходовые винты механизмов регулировки зазоров, механизмов движения суппортов, штурвальных винтов и пр.). Соответственно и пластмассовые гайки таких механизмов участвуют в передаче либо усилия, либо точного движения.

Трапецеидальная резьба имеет рабочий угол профиля $\beta/2 = 15^\circ$ и нормализована для номинальных диаметров d от 10 мм до 640 мм при различных шагах (S) для каждого данного диаметра (рис. 3.12).

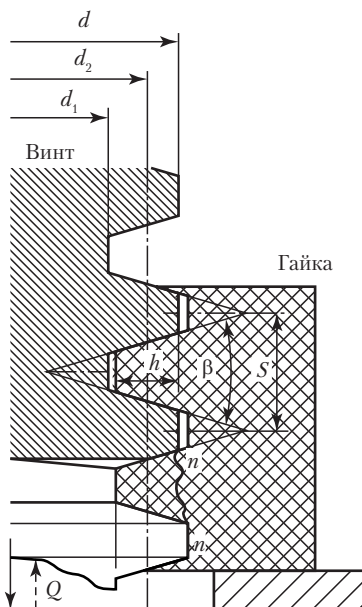


Рис. 3.12. Схема сопряжения винта и гайки с трапецидальной резьбой.
Пояснения в тексте

Трапецидальная резьба может передавать и воспринимать осевое усилие и двустороннее движение в прямом и обратном направлениях.

Упорная резьба имеет рабочий угол профиля $\beta/2 = 3^\circ$ (рис. 3.13), что облегчает ее изготовление. Она нормализована для диаметров d от 10 до 600 мм, при различных шагах (S) для каждого данного диаметра. Эти резьбы обеспечивают повышенный КПД даже по сравнению с трапецидальными, так как:

$$f_{\text{уп}} = f / \cos 3^\circ < f_{\text{трап}}.$$

Упорная резьба является грузовой и применяется в механизмах с большим односторонне направленным усилием, как, например, прессах, нажимных винтовых устройствах, винтовых домкратах большой грузоподъемности и т. п.

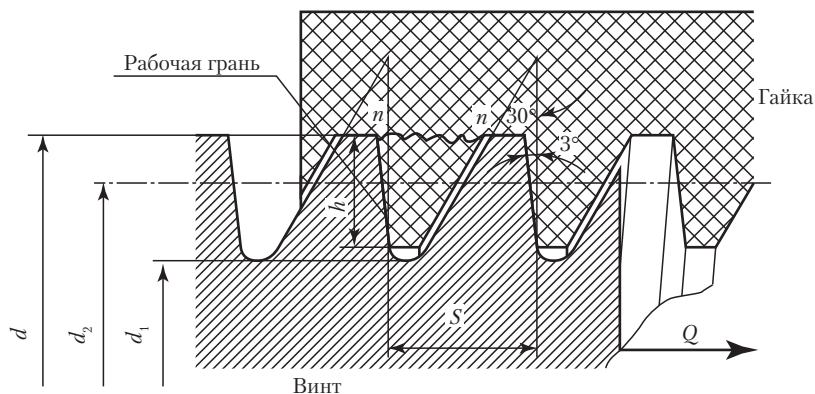


Рис. 3.13. Схема сопряжения винта и гайки с упорной резьбой.
Пояснения в тексте

Коэффициент полезного действия (η) металл–полимерной винтовой пары для случая подъема нагруженного винта относительно опорной гайки за один его оборот определяется уравнением

$$\eta = \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} (\alpha + \rho_{\text{пр}}), \quad (3.12)$$

где α — угол подъема резьбы; ρ — приведенный угол трения.

Наибольшее значение угла α , при котором КПД винтовой пары будет максимальным, определяется взятием первой производной предыдущего уравнения и решением уравнения

$$d\eta/d\alpha = 0. \quad (3.13)$$

Окончательно получаем

$$\alpha = 45^\circ - (\rho_{\text{пр}}/2), \quad (3.14)$$

и далее

$$\eta_{\text{max}} = [\operatorname{tg}(45^\circ - \rho_{\text{пр}}/2)] / [\operatorname{tg}(45^\circ + \rho_{\text{пр}}/2)]. \quad (3.15)$$

Достижение η_{max} в обычных условиях трения со смазкой реализуется при $\alpha = 42 - 44^\circ$.

Близкое к таковому соотношение реализуется в червячном зацеплении.

Для самотормозящихся винтовых пар при $\alpha = \rho_{\text{пр}}$

$$\eta = (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}^3 \alpha) / 2 \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.16)$$

Пренебрегая значением $\operatorname{tg}^3 \alpha$ как малой величиной при $\operatorname{tg} \alpha \leq \rho'$, получим значение КПД ($\eta \leq 0,5$).

Таким образом, для ходовых и грузовых резьб следует стремиться к использованию конструкционных антифрикционных разновидностей ПМ, а именно: термопластов, наполненных дисперсными антифрикционными добавками, коллоидным или тонкодисперсным графитом (Г), тонкодисперсным дисульфидом молибдена (Д, ДМ), сульфатом бария (БС), нитридом бора (НБ). К таким композитам относятся, например, полиамиды марок ПА-610-1-101; ПА-610-1-202; ПА-12-11-3; ПА-12-21-3; графитопласт АТМ-2; полиформальдегиды марок СФД-ДМ; СФД-ВМ; СФД-НБ-БС.

Следует учитывать, что термопласты без дисперсных антифрикционных наполнителей и при отсутствии следов смазки в контакте винт-гайка склонны к слипанию с металлом, что вызывает неравномерность движения элементов кинематической пары под нагрузкой.

В статическом нагруженном состоянии в резьбе возникают следующие виды напряжений (рис. 3.12, 3.13).

1. Изгиб от распределенной нагрузки Q/z в основании витка по сечению $n - n$:

$$\sigma_{\text{и}} = M_{\text{и}}/W = 6,25Qh/\pi dzs^2. \quad (3.17)$$

2. Срез по сечению $n - n$:

$$\tau_{\text{ср}} = Q/(z\omega d - 0,7S) = 1,4Q/\pi dzS. \quad (3.18)$$

Результирующее напряжение по 4-й теории прочности (энергетической)

$$\sigma_{\text{рез}} = \sqrt{(\sigma_{\text{и}}^2 + 3\tau_{\text{ср}}^2)} \leq [\sigma_{\text{и}}], \quad (3.19),$$

где $[\sigma_{\text{и}}]$ — допускаемое напряжение изгиба материала пластмассовой гайки.

3. В отдельных случаях резьба гайки может поверяться на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$ по уравнению

$$\sigma_{\text{сж}} = Q/(z \cos \beta / 2 \pi d_2 h) \leq [\sigma_{\text{сж}}], \quad (3.20)$$

где $[\sigma_{\text{сж}}]$ — допускаемое напряжение сжатия.

При выборе ПМ для резьб полезно учесть рекомендации из [21], касающиеся допускаемого напряжения среза $[\tau_{\text{ср}}]$ для разных термопластов в МПа.

Термопласты	Допускаемое напряжение среза $[\tau_{ср}]$, МПа
ПА П-68	25
ПА П-6	25
ПА АКТ	27
ПФА	22,7
ПК	25
Капролон	26
ПП	15
Ф-4	6

3.3. Резьбовые соединения

Особенность пластмасс как конструкционных материалов заключается в широком разнообразии их деформационно-прочностных характеристик и прежде всего показателей прочности и относительного удлинения. Умелое использование в одной сборочной единице разных по свойствам ПМ позволяет решать достаточно сложные инженерные задачи. Из них едва ли не наиболее распространенной является сохранение требуемой плотности или герметичности разъемного соединения, выполненного из пластмассовых деталей. Как правило, это фланцевые соединения трубопроводов и емкостей различного назначения, фланцевые соединения с уплотнительными прокладками и пр. Принципиальная схема одного из таких вариантов представлена на рис. 3.14. Здесь металлический болт (винт) стягивает фланцы условной емкости из неодинаковых пластмасс. Отметим, что фланцы использованы только в качестве примера. В принципе это могут быть любые детали, сжимаемые, соединяемые деталью резьбовой.

Поскольку в рабочем состоянии в емкости начнет действовать давление q , создающее осевое усилие Q , то при сборке болт затягивают усилием $P_з$, под действием которого он удлиняется, а фланцы — сжимаются. Такое резьбовое соединение называется напряженным. В соответствии с законом Гука

$$\delta_{з.б.} = P_з / C_б = P_з l_б / E_б F_б; \quad (3.21)$$

$$\delta_{з.ф.} = P_з / C_ф = P_з l_ф / E_ф F_ф, \quad (3.22)$$

где $\delta_{з.б.}$ и $\delta_{з.ф.}$ — деформации болта и фланцев от действия силы Q ;

$C_б$ и $C_ф$ — коэффициенты жесткости болта и фланцев;

E, F и l — модули упругости, площади сечения и размеры длины болта и толщины фланцев. Как правило, $l_б = l_ф$.

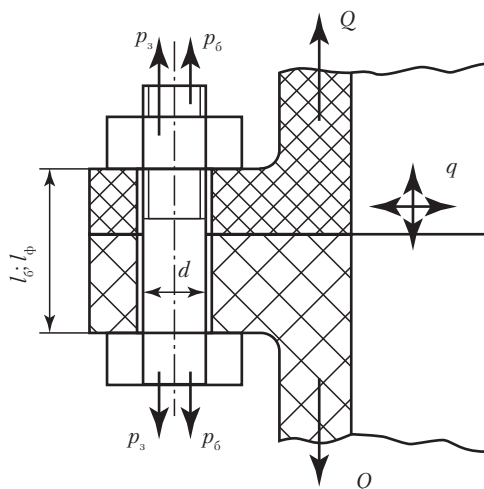


Рис. 3.14. Схема фланцевого соединения из ПМ

Из диаграммы «деформация–усилие» в соединении «фланец–болт» (рис. 3.15) видно, что при сборке под действием силы затяга ($P_з$) болт растягивается на величину $\lambda_{з.б.}$ (деформация +), а фланцы при этом сжимаются на $\lambda_{з.ф.}$ (деформация –). После возникновения в емкости давления q усилие, приложенное к болту, возрастает и достигает значения $P_б$, при этом болт удлиняется на δ_0 , ранее сжатые фланцы распрямляются на это же значение деформации δ_0 , а созданная между ними сила сжатия уменьшается до величины $P_ф$. Чем больше значение δ_0 , тем меньше усилие остаточного сжатия фланцев. При $P_ф \leq Q$ произойдет разгерметизация соединения.

Для получения более наглядной информации о совместности поведения деталей соединения совместим деформационно-силовые графики, приняв за ординату ось $P_з$ (рис. 3.16, а).

Как видно из совмещенной диаграммы, после приложения внешней нагрузки Q детали соединения будут находиться не под действием силы затяга, а под действием других сил. Болт будет растягиваться силой $P_б > P_з$, а фланцы — сжиматься силой $P_ф < P_з$, при этом болт окажется под воздействием оставшегося усилия сжатия фланцев $P_ф$ и внешней нагрузки Q , то есть:

$$P_б = P_ф + Q, \quad (3.23)$$

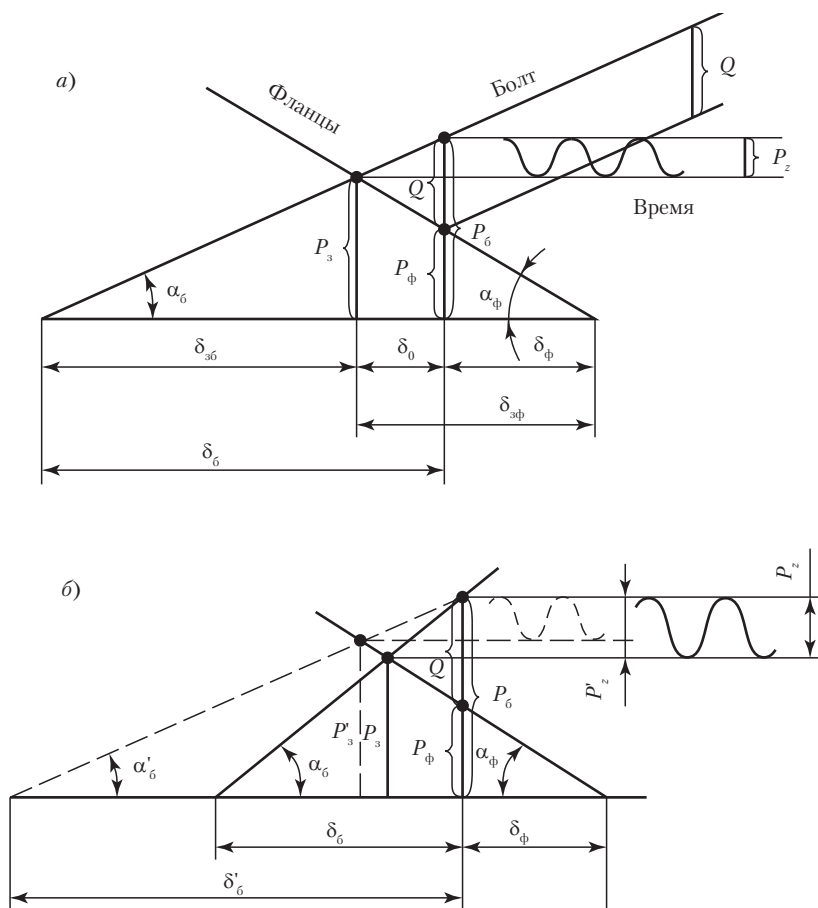


Рис. 3.16. Совмещенная диаграмма «деформация–усилие» напряженного резьбового соединения «фланец–болт»: а — совмещенная диаграмма по рис. 3.15; б — диаграмма в случае применения болта с меньшей жесткостью

Уравнение (3.28) может быть представлено в следующем виде:

$$P_6 = P_3 + P_z, \quad (3.30)$$

то есть в соединении, собранном с предварительной затяжкой (P_3), после приложения рабочей нагрузки (Q), сила, растягивающая болт, возрастает на величину P_z (рис. 3.16, а):

$$P_z = QC_6 / (C_6 + C_\phi) < Q \quad (3.31)$$

Это приращение нагрузки (P_z) будет тем меньше, чем больше C_ϕ . Поэтому, чтобы болт подвергался воздействию возможно меньшей растягивающей силы, следует применять возможно более жесткие фланцы.

При переменной внешней нагрузке, изменяющейся от 0 до Q , болт будет также подвержен действию переменной нагрузки, но изменяющиеся от P_3 до P_6 , так как даже при $Q = 0$ он останется под воздействием P_3 (рис. 3.16, а). Переменная составляющая такого цикла нагружения болта, очевидно, будет равна P_z .

Опытами установлено, что работоспособность болтов при действии переменных нагрузок снижается. Поэтому в затянутых резьбовых соединениях целесообразно предусматривать меры, уменьшающие переменную составляющую P_z .

При заданных значениях Q , P_ϕ , C_ϕ и C_6 необходимое усилие затяга (рис. 3.16, б) будет равно P_3 , при этом переменная составляющая цикла нагружения будет равна P_z . Уменьшим теперь жесткость болта $\alpha'_6 < \alpha_6$. Тогда (см. пунктирное построение на рис. 3.16, б) при тех же Q , P_ϕ , C_ϕ получим $P'_3 > P_3$ и $P'_z > P_z$. Поэтому для уменьшения P_z следует применять болты с меньшей жесткостью и развивать наибольшую, в пределах допустимых значений, силу затяга.

Применительно к полимерным материалам это может означать приближенно следующий выбор материалов для пары фланец–болт (по модулю упругости):

Фланец	Болт
Волокнит	ПА-68ВС
Капролон	ПП
ПВХ	ППС
ПА 66 ВС	П 12
ПФА	П 12

В случае применения уплотнителей (рис. 3.17) различают три возможных варианта.

1. Уплотнительная прокладка выполнена из эластичного материала, жесткость которого (C_n) существенно ниже жесткости деталей соединения (резина, нежесткий полиуретан и т. п.), $C_n \ll C_6$.

2. Жесткость уплотнительной прокладки превышает жесткость резьбовых деталей. Например, прокладка из паронита, а резьбовые детали — из полиамида.
3. Жесткость резьбовых деталей значительно ниже жесткости прокладки. Такой вариант возможен при использовании резьбовых деталей из ПМ общетехнического назначения (ПЭВП, ПП, ПВХ) при прокладках из ПА, ПФА, жесткого ПУ и др.

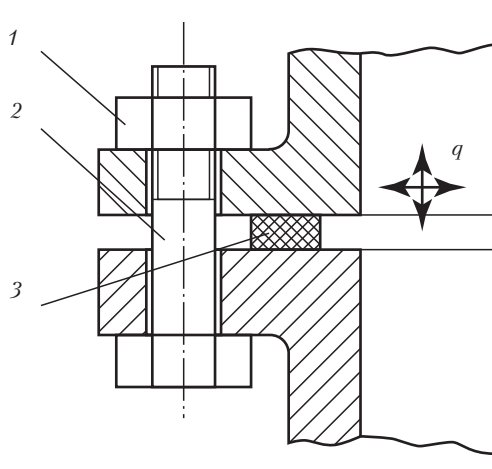


Рис. 3.17. Фланцевое резьбовое соединение с полимерным уплотнителем:
1 — фланец; 2 — болт; 3 — уплотнительная прокладка

Из анализа диаграммы, приведенной на рис. 3.18, *а*, следует, что в результате затяга соединения под действием усилия P_3 болт растянулся на величину $l_{3,6}$, а прокладка сжалась на $l_{3,п}$. Это — состояние монтажа соединения. После того как в герметичной емкости возникнет рабочее давление, а усилие, приложенное к болту, увеличится под действием силы Q и возрастет до P_6 , его удлинение также станет больше на значение Δl . Соответственно, прокладка распрямится на это значение Δl , а сжимающее ее усилие уменьшится до P_0 . Теоретически, чем меньше жесткость прокладки, тем ближе будет величина P_0 к исходному P_3 и при $C_n \rightarrow 0$ будет $P_0 \approx P_3$. Однако это лишь теоретически. На практике жесткость прокладок всегда имеет конечное значение. Также, на практике, вследствие протекания в ПМ релаксационных процессов (смо-

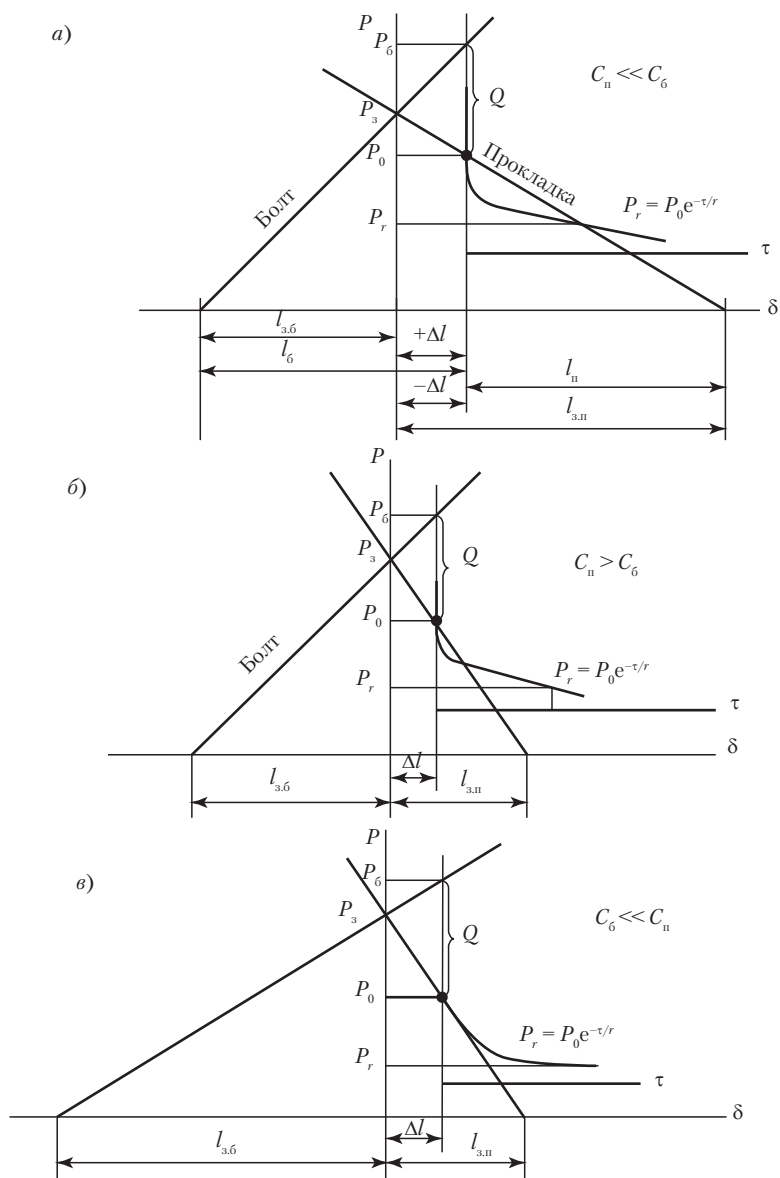


Рис. 3.18. Диаграмма «деформация–усилие сжатия полимерной прокладки» с учетом релаксации напряжения

три раздел 1.2) с течением времени усилие P_0 уменьшится до значения P_r . В этом случае герметичность соединения сохранится только при соблюдении неравенства $P_r > Q$.

Из диаграммы 3.18, б с очевидностью следует, что увеличение жесткости прокладки приведет к уменьшению $l_{з.п.}$, величины Δl и, при сохранении релаксационных параметров, к существенному падению усилия P_r , что затруднит сохранение герметичности соединения.

Очевидно, что результатом инженерного выбора в этом случае должно явиться использование ПМ с минимальной и длительной релаксаций напряжения.

Наконец, в случае «в», диаграмма на рис. 3.18, в, применение болта с увеличенной эластичностью в паре с жесткой прокладкой также не приведет к положительному эффекту вследствие уменьшения величины Δl и релаксационного снижения значения усилия P_r .

В случае невозможности выбора ПМ с необходимыми свойствами, что бывает совсем нередко, обеспечение герметичности конструкции достигается регулированием жесткости деталей соединений за счет изменения их геометрических размеров.

При инженерном выборе ПМ для резьбовых соединений в ряде случаев необходимо учитывать деформацию пластмассовых изделий, вызванную изменением температуры окружающей среды. В отличие от традиционных конструкционных материалов, пластмассы реагируют на изменения температуры совершенно неоднозначно. Эта особенность ПМ наиболее отчетливо проявляется в величине коэффициента линейного расширения (КЛР) (β). Ниже приведена подборка усредненных значений β для различных конструкционных ПМ.

ПМ	Па	ПА-ВС	Фенилон	ПЭВП	ПП	АБС	ПЭТФ	ПК	ПСФ	Эпоксид- пласты	Волокнит ФП	АП
$\beta, (10^5),$ K^{-1}	6–14; до 30	4–8	3–5	17–55	11–18	8–10	8–13	2–6	5–6	0,8–25	1–4	1,5–3,3

Заметим, что введение в большинство термопластов армирующего рубленого стекловолокна может уменьшить значение КЛР примерно в 1,5–2,0 раза.

Таким образом, при выборе материалов следует стремиться к тому, чтобы ПМ для болтов (винтов) и соединяемых изделий (фланцев),

эксплуатация которых происходит при повышенных температурах, были близки по значению коэффициента линейного расширения.

3.4. Уплотнители

Комплекс вязкоупругих свойств ПМ позволяет широко применять их в разнообразных герметизирующих устройствах. В абсолютном большинстве случаев из ПМ изготавливают уплотнительные детали в виде прокладок, конфигурация которых соответствует геометрии разъемного соединения.

Эффект уплотнения реализуется в полной мере только при достижении непрерывности контакта между эластичным уплотнителем и поверхностью детали герметизируемого узла. Учитывая наличие микрорельефа (микротрещины и микровыступы) на металлических или иных поверхностях контакта (рис. 3.19), давление на уплотнитель должно обеспечивать его затекание в микровпадины более жестких деталей, в данном случае — металлических фланцев.

Применительно к конкретным условиям нагружения можно с достаточной надежностью использовать деформационные возможности эластичных материалов. Испытаниями скорости протекания газа через герметизируемый стык от степени сжатия эластичного уплотнителя установлено, что при степени сжатия прокладки 22–25% происходит насыщение фактического контакта, после чего достигается герметичность соединения (рис. 3.20).

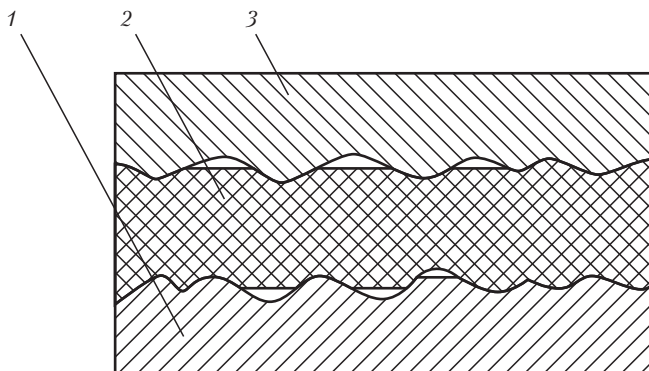


Рис. 3.19. Микрорельеф уплотняемых поверхностей в нагруженном состоянии:
1, 3 — уплотняемые детали; 2 — прокладка из ПМ

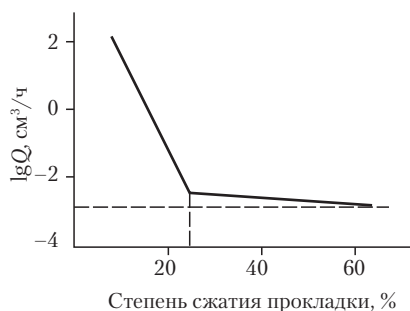


Рис. 3.20. Зависимость скорости протекания газа Q от степени сжатия эластичной прокладки при сухом контакте металл–полимер

Таким образом, считается, что сжатие эластичной прокладки до относительной деформации 25–30% приводит к достижению эффекта герметизации уплотняемых поверхностей.

Конструктивная особенность неподвижного соединения состоит в том, что создаваемая при сборке узла деформация сжатия прокладки сохраняется в дальнейшем без изменения. Это создает условия для релаксации напряжения сжатия, которое оценивается уже приведенным выше уравнением Максвелла, из которого следует, что, при прочих равных условиях, длительность сохранения напряжения сжатия прокладки, близкого к создаваемому при сборке σ_0 , определяется релаксационными свойствами материала прокладки.

Из примера, приведенного на рис. 3.21, следует, что если допустимое минимальное напряжение сжатия уплотнителя составляет величину σ_{\min} , то время эксплуатации кольца из полимера 3 ограничено временем τ_3 .

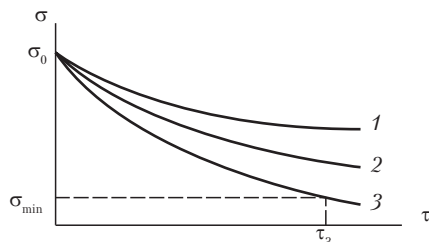


Рис. 3.21. Кривые релаксации напряжения полимерных материалов (1, 2, 3) со временем релаксации $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$

Таким образом, для увеличения долговечности уплотняемого соединения следует использовать уплотнительные кольца из материалов с максимальной длительностью релаксации, которая определяется физико-химическими особенностями пластмассы или эластомера, а для реактопластов — сформировавшейся в связующем пространственной сеткой.

На практике эффект релаксации напряжения сжатия цилиндрической прокладки учитывают введением так называемого коэффициента уплотнения f :

$$f = p_{\text{пр}}/p, \quad (3.32)$$

где $p_{\text{пр}}$ — давление сжатия прокладки, Па; p — рабочее давление в герметизируемом объеме, Па.

При рабочем давлении до 1 МПа — $f = 2$; при давлении до 5 МПа — $f = 3$; при давлении свыше 5 МПа — $f = 3,5-4$.

3.5. Зубчатые передачи

Полимерные материалы (ПМ) широко применяются в производстве деталей зубчатых передач (цилиндрические и конические шестерни и колеса прямо- и косозубые и винтовые). Главными привлекательными качествами ПМ являются: технологичность, позволяющая заменить непроизводительный способ механического нарезания зубьев скоростным методом формования зубчатых деталей, а также такие особые качества ПМ, как антифрикционность, шумопоглощение, возможность эксплуатации без внешней смазки и др.

Для производства деталей зубчатых передач используют конструкционные термо- и реактопласты с повышенными прочностными свойствами. В случаях, когда к передачам предъявляются в качестве основных особые требования, зубчатые элементы изготавливают механическим способом — нарезанием на зуборезном оборудовании.

Наибольшее значение модуля зацепления (m) колес из ПМ достигает значения $m = 5-8$ мм, но в основном из ПМ изготавливают крупнотиражные малонагруженные кинематические и приборные детали передач с модулем $m = 0,2-2$ мм.

Таким образом, зубчатые передачи из ПМ могут быть силовыми и кинематическими, тихоходными и скоростными, ответственного или бытового назначения, но всегда к ним предъявляется требование долговечности, зависящее от учета комплекса причин.

Поскольку ассортимент пластиков широк, то при инженерном выборе ПМ необходимо учитывать не только их назначение и условия эксплуатации, но и, прежде всего, кинематику зацепления, особенности нагружения зубьев.

3.5.1. Элементы кинематики зацепления

Передача движения в зубчатых механизмах происходит за счет давления при перекатывании боковой поверхности зуба ведущего элемента (шестерни, рис. 3.22, б) по такой же поверхности ведомого элемента (зуба колеса). Зубчатое зацепление может быть внешним и внутренним. При внешнем зацеплении центры элементов расположены по разные стороны от зацепления (рис. 3.22, а). При вращении ведущего звена его профиль (рис. 3.22, а, профиль 1) соприкасается с профилем 2 ведомого звена по линии $c - c$, образуя высшую кинематическую пару.

В процессе вращения зубчатых элементов происходит обкатывание зубчатых профилей, при этом точка их соприкосновения в пространстве перемещается по прямой $N - N$, называемой линией зацепления (рис. 3.23) [22]. В то же время точка контакта зубьев (a_1 и b_1 , рис. 3.23) по мере поворота элементов I и II смещается по профилю элемента I из положения a_1 в положение b_1 , а по профилю элемента II из положения b_2 в положение a_2 . То есть точка контакта зацепляющихся зубьев перемещается по высоте зубьев. Для ведущего элемента от корня зуба к головке, а для ведомого элемента — в обратном направлении, то есть

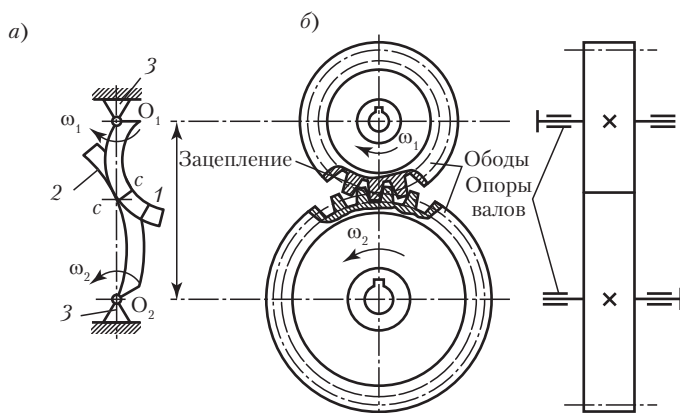


Рис. 3.22. Схема прямозубой зубчатой пары

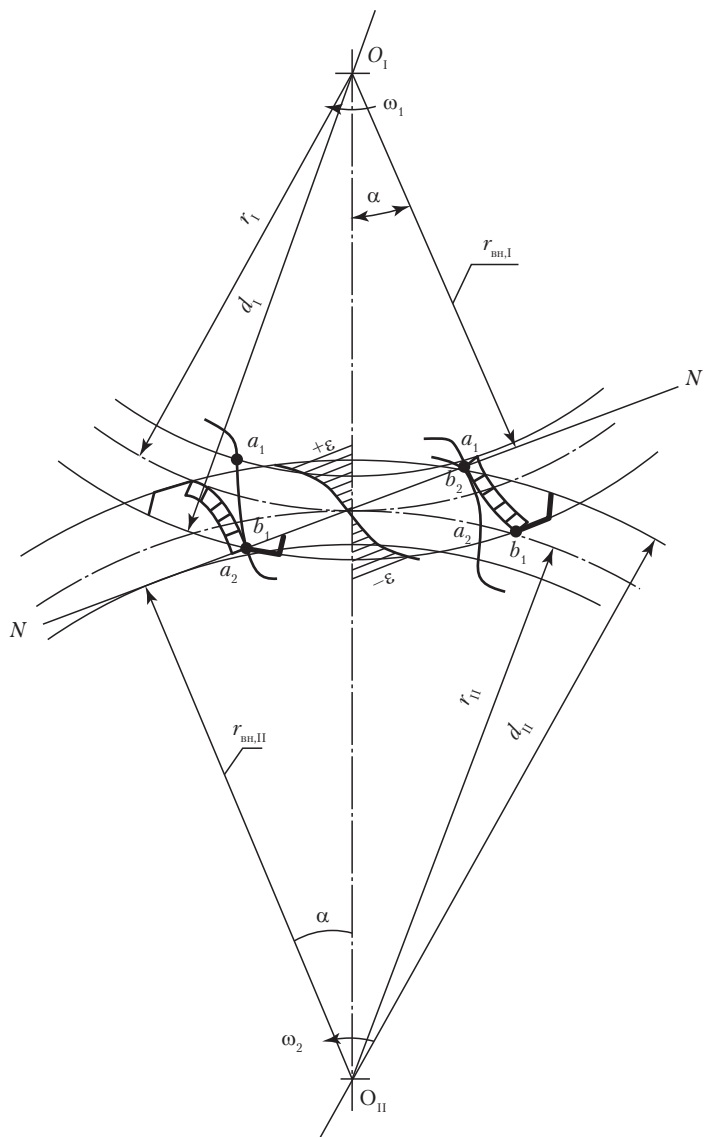


Рис. 3.23. Схема эвольвентного зубчатого зацепления. Пояснения в тексте

от головки зуба к его корню. Поскольку в точке контакта окружные скорости профилей не совпадают, то возникает относительное перемещение профилей с коэффициентом относительного скольжения ε_{2-1} :

$$\varepsilon_{2-1} = (v_{b2} - v_{a1})/v_{a1}. \quad (3.33)$$

В точке контакта на пересечении линии зацепления $N - N$ с линией центров O_1O_2 , то есть в точке соприкосновения делительных окружностей (радиусом r_1 и r_{II}) $v_b = v_a$ и $\varepsilon_{II-I} = 0$. При дальнейшем повороте зубчатых элементов величина относительного скольжения возрастает, причем изменяется его знак. Это означает, что если в начале зацепления профиль элемента 2 опережал профиль элемента 1 (+ ε), то в конце зацепления происходит инверсия скольжения, и уже профиль 1 будет опережать профиль 2 (– ε , рис. 3.23, эпюра ε).

Относительное скольжение профилей является одним из неустраиваемых недостатков зубчатых передач. Это причина износа зубьев, особенно в области головки и корня. Скольжение профилей снижает КПД передач, вызывает необходимость принудительной смазки зацепления, что усложняет конструкцию и эксплуатацию зубчатых механизмов.

3.5.2. Силовой анализ

С точки зрения науки «Сопротивление материалов» [16], единственный зуб зубчатого элемента представляет собой консольную балку переменного сечения, находящуюся в циклическом сложнапряженном состоянии. Наиболее опасные параметры этого состояния наступают в момент входа зуба в зацепление, когда сила полного нормального давления (P_{II}), действующая по линии зацепления, приложена к верхушке зуба (рис. 3.24, *a*). Эта сила распределена равномерно по длине зуба b (рис. 3.24, *б*). Она раскладывается на касательную, $P_{II} \cos \gamma$, и радиальную, $P_{II} \sin \gamma$, составляющие, вызывающие в зубе, соответственно, напряжения изгиба и сжатия. Эпюра результирующего ($\sigma_{рез}$) напряжения несимметрична относительно оси симметрии зуба. Как установлено критерием практики, трещины усталости обычно появляются и развиваются на стороне приложения усилия, то есть на стороне n_1 . Поэтому результирующее опасное нормальное напряжение равно не сумме, а разности напряжений изгиба и сжатия.

$$\sigma_{рез} = \sigma_{II} - \sigma_{сж}, \quad (3.34)$$

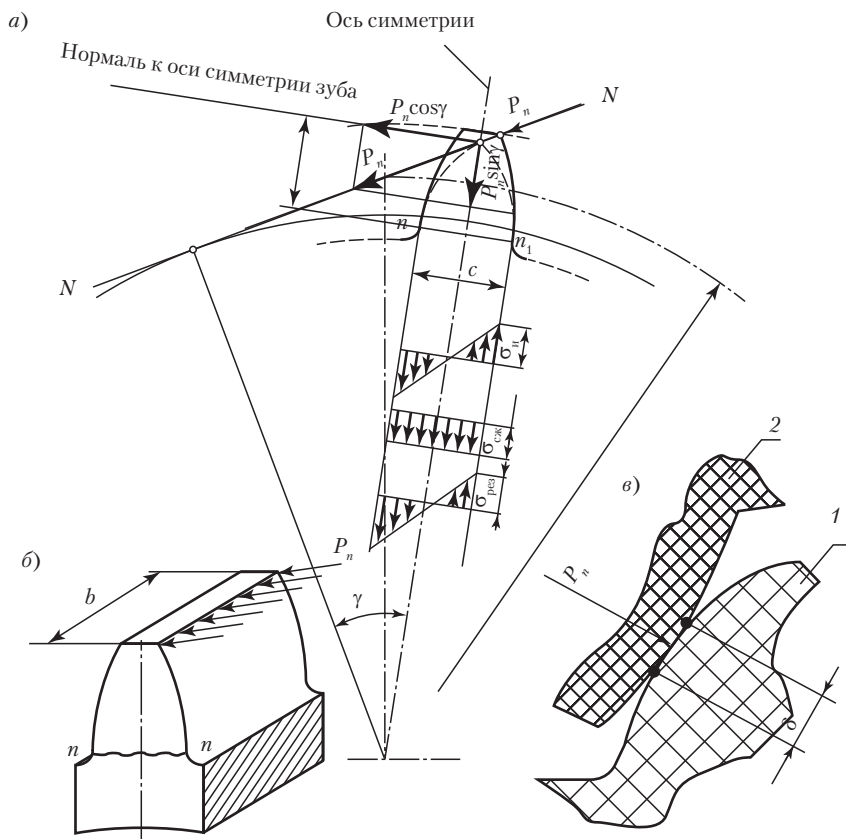


Рис. 3.24. Схема нагружения зубьев

Применительно к ПМ эта особенность несколько сокращает их отставание по прочностным показателям от традиционных металлов.

Хотя теоретически контакт зубьев должен иметь линейный характер, однако в силу вязкоупругости ПМ и деформации поверхности соприкосновения, он является не линейным, а скорее площадным или плоскостным. Ширина полоски контакта зубьев составляет величину δ (рис. 3.24, в), а ее длина равна длине зубьев b . Для вычисления значения δ можно использовать уравнение [13]:

$$\delta = 2\sqrt{[2P_N(1 - \nu^2)R/\pi E]}, \quad (3.35)$$

где ν — коэффициент Пуассона; R — приведенный радиус кривизны профиля зуба; E — модуль упругости ПМ.

С позиции инженерного выбора ПМ уравнение (3.35) интересно тем, что в его состав входит модуль $E^{1/2}$. Это означает, что при прочих равных условиях замены низко модульного ПМ с величиной модуля упругости $4 \cdot 10^4$ МПа на ПМ с $E = 12 \cdot 10^4$ МПа, то есть вдвое более жестким, приводит к уменьшению ширины контактной полосы δ всего в 1,7 раза.

Наконец, при выборе ПМ необходимо учитывать, что характер приложения нагрузки к зубьям носит циклический характер, причем длительность цикла нагружения зависит и от частоты вращения и от числа зубьев шестерни или колеса. Соотношение «нагружение–отдых» равно числу зубьев зубчатого элемента. Длительность нагружения (τ_z) составляет:

$$\tau_z = 60/nz, \text{ с}; \quad (3.36)$$

где n — число оборотов в минуту зубчатого элемента; z — число зубьев элемента.

Простейшие расчеты показывают, что длительность нагружения зубьев измеряется сотыми или даже тысячными долями секунды. На рис. 3.25 показан динамический характер нагружения, имеющий параметры несимметричного знакопостоянного пульсирующего цикла с коэффициентом асимметрии $r = 0$.

Из изложенного следует, что выбор ПМ для зубчатого элемента по показателям статической прочности не соответствует условиям нагружения и может привести к существенной ошибке.

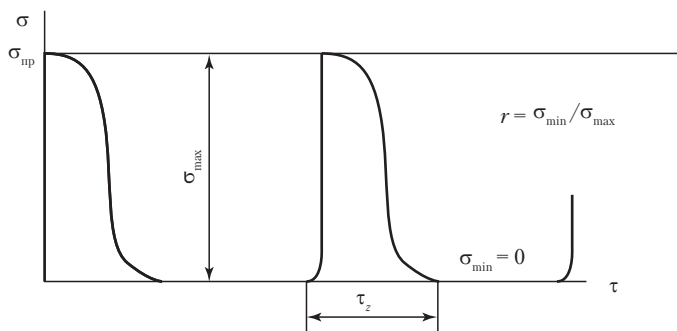


Рис. 3.25. Характер циклических напряжений, возникающих в щели зуба

В то же время в справочной литературе лишь в отдельных случаях удается отыскать значения пределов усталости ПМ при переменном нагружении с $r = -1$ (σ_{-1} ; τ_{-1}). Однако, учитывая, что прочность ПМ при $r = 0$ превышает прочность при $r = -1$, можно ориентироваться на табличные данные, повышающие запас прочности реальной конструкции.

При выборе ПМ для зубчатых деталей необходимо также учитывать, что излом пластмассового зуба происходит в его корне по линии $n - n_1$ (рис. 3.24, а). В соответствии с теорией Гриффита излом начинается с образования усталостных микротрещин, возникающих в зонах внутренних напряжений. Это, в свою очередь, налагает ограничения на использование ПМ с недостаточной ударной вязкостью.

Таким образом, инженерно обоснованный выбор ПМ для деталей зубчатых передач представляется многофакторным и достаточно непростым действием. Необходимо решать противоречивые задачи из области физических свойств и технологии производства изделий. Некоторые из них представлены ниже:

1. ПМ должен быть жестким, высокомодульным и в то же время не быть чувствительным к концентраторам напряжений и обладать повышенной усталостной прочностью.

2. ПМ должен иметь повышенную твердость и в то же время обладать свойствами самосмазываемости для минимизации потерь от относительного скольжения.

3. ПМ должен перерабатываться в изделие высокопроизводительными способами формования из расплава (литье под давлением, компрессионное и трансферное прессование), сопровождающимися процессами усадки и в то же время должен обеспечивать высокую точность зубчатых шестерен и колес.

Отметим, что перечисленным требованиям полностью не отвечает ни один из известных полимеров. Требуемые качества реализуются только в композиционных материалах.

Повышенная усталостная прочность достигается введением в ПМ армирующих волокон. Как правило, это рубленые угле-, стекло-, органические волокна.

Антифрикционные свойства и износостойкость достигаются введением дисперсных наполнителей неорганического или органического происхождения (графит, дисульфид молибдена, тальк, фторопласт).

Повышенная деформационная теплостойкость достигается применением суперконструкционных термостойких полимерных матриц (ПСФ, ПИ, ПАИ, Фенилон и др.).

3.5.3. Червячные передачи

Червячными называются механизмы, передающие движение с помощью червяка и червячного колеса (рис. 3.26). Ведущим элементом в абсолютном большинстве случаев является червяк, а ведомым — червячное колесо с наружной нарезкой (рис. 3.27). Передача движения в обратном направлении возможна лишь при определенных геометрических соотношениях нарезки червяка и червячного колеса. *В случае использования в червячных передачах ПМ обычно венец червячного колеса с зубьями изготавливают из пластмассы, а червяк — из металла, как правило, из стали.*

При передаче движения профиль витков червяка и зубьев колеса образуют высшую кинематическую пару, элементы которой соприкасаются по линии. На рис. 3.27 видно, что червячная пара — это трехзвенный* пространственный механизм с перекрещивающимися осями. Число степеней свободы такого механизма равно единице.

Червячные механизмы предназначены для передачи только вращательного движения и обычно с большим передаточным числом в паре зацепления; при этом угол перекрещивания осей червяка и червячного колеса, как правило, равен 90° . Червячные механизмы широко распространены в машино- и приборостроении благодаря ряду существенных

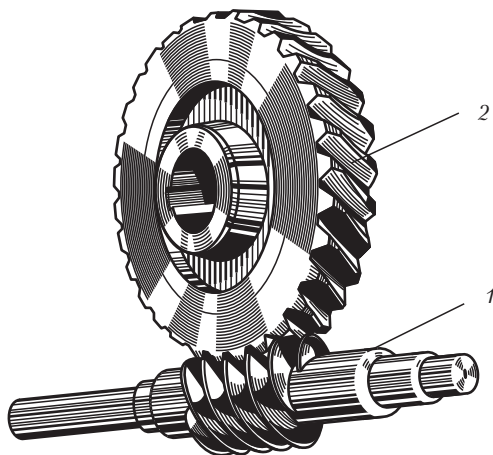


Рис. 3.26. Общий вид червячной пары:
1 — червяк; 2 — червячное колесо

* Третье звено представлено неподвижным корпусом передачи.

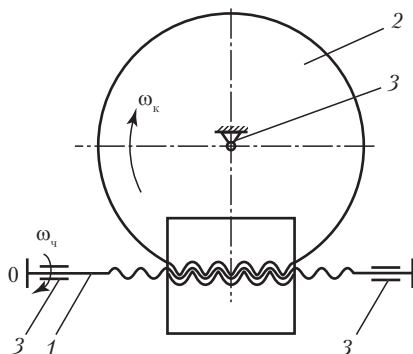


Рис. 3.27. Схема червячного зацепления:
1 — червяк; 2 — червячное колесо, 3 — опоры вращения

достоинств: возможности осуществлять передачи с большими передаточными числами — $i_{\text{ч-к}} = 100$ и более (обычно $i_{\text{ч-к}} < 40$) при окружной скорости на червяке до 25 м/с; сравнительно небольшим габаритам, бесшумности работы, плавности передачи движения и др. Однако в процессе передачи движения витки вращающегося червяка скользят по зубьям колеса в условиях линейного контакта, что значительно снижает КПД червячных механизмов (0,7–0,8) и с этой стороны ограничивает их применение.

Силовой и геометрический анализ показывает следующие основные особенности червячного зацепления (рис. 3.28), которые определяют выбор ПМ.

1. Со стороны червяка по его оси на зубья колеса действует постоянное усилие P .

2. Положение точки контакта «червяк–колесо» неизменно (точка K на линии $x-x$, рис. 3.28).

3. По этой причине в течение акта зацепления величины напряжений, действующих в зубе колеса и напряжений, возникающих в винтовой нарезке червяка, постоянны по величине.

4. В зацеплении непрерывно действует трение скольжения, реализуемое в неблагоприятных для этого вида движения условиях высшей кинематической пары.

Значение окружного усилия на колесе ($P_{\text{ок}}$) равно:

$$P_{\text{ок}} = P(1 - \operatorname{tg} \rho' \operatorname{tg} \lambda), \quad (3.37)$$

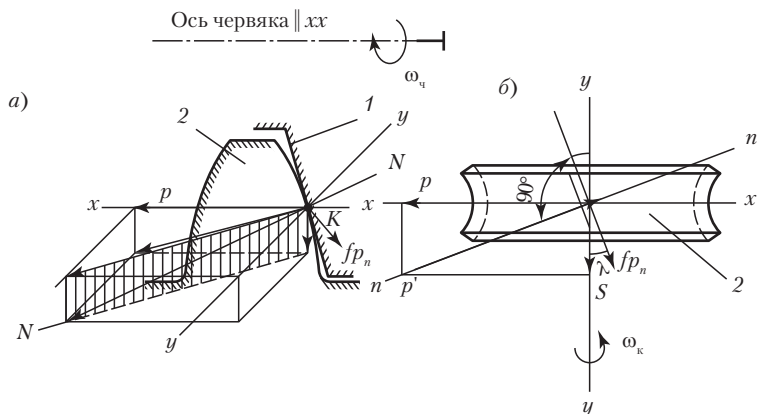


Рис. 3.28. Схема сил, действующих в червячном зацеплении:
1 — зуб колеса из ПМ; 2 — фрагмент металлического червяка

где P — осевое усилие на червяке; $\operatorname{tg} \rho'$ — приведенный угол трения; λ — угол наклона винтовой линии нарезки червяка.

КПД червячной передачи ($\eta_{\text{ч.п.}}$) определяется по формуле

$$\eta_{\text{ч.п.}} = \operatorname{tg} \lambda / \operatorname{tg} (\lambda + \rho') / \quad (3.38)$$

В реальных однозаходных передачах угол наклона винтовой линии составляет $4-7^\circ$ и поэтому основным элементом, влияющим на повышение энергетического совершенства передачи, является приведенный угол трения ρ' .

Это открывает возможности для умелого инженерного выбора ПМ.

1. Поскольку величина силы, действующей в зацеплении, постоянна, то ПМ можно выбирать по параметрам статической прочности.

2. Особые требования должны предъявляться к значению коэффициента трения ПМ. Он должен быть минимальным при высокой изгибной прочности ПМ.

Поскольку трение скольжения в контакте реализуется в условиях значительных контактных напряжений (соприкосновение элементов теоретически происходит по линии), то возможно значительное тепловыделение с местным поверхностным разогревом зуба колеса, размягчением поверхности и ее сдвигом (рис. 3.28, а). Отсюда — необходимость применения полимерных матриц с повышенной деформационной теплостойкостью, которая у таких популярных ПМ, как полиамиды, не превышает $80-90^\circ \text{C}$.

3.5.4. Конструкция зубчатых и червячных колес

Конструктивное оформление зубчатых и червячных колес весьма разнообразно и зависит от нагружающего усилия, требуемой точности изготовления и тиража. В принципе любая зубчатая деталь может быть изготовлена полностью из полимерного материала, однако лучшие результаты получают при использовании армированных изделий, представляющих сочетание металлической ступицы с пластмассовым зубчатым венцом (рис. 3.29, *а* и *б*). Такие конструкции обеспечивают жесткость и точность соединения с валом. Реже (и главным образом в малонагруженных приборных передачах) венец размещается непосредственно на валу (рис. 3.29, *в*). В особых случаях полимерный материал образует толстостенное покрытие на металлической сердцевине зуба (рис. 3.29, *г*). Такая конструкция предназначена для улучшения теплоотвода из зоны зацепления при одновременном возрастании его кинематической точности.

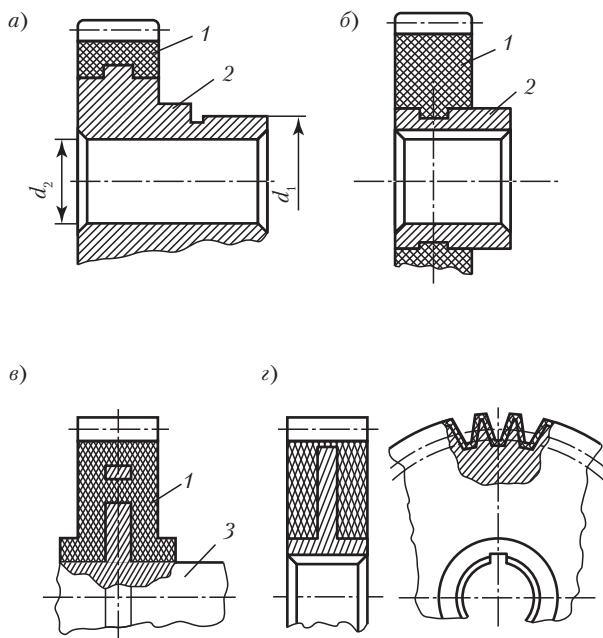


Рис. 3.29. Конструкции армированных зубчатых колес

а, б — с венцом 1 на ступице 2; *в* — с венцом на валу 3; *г* — с армированными зубьями; 1 — венец из ПМ; 2 — ступица; 3 — вал

Детали рассмотренных конструкций получают литьем под давлением, трансферным (литьевым) прессованием, а также полимеризацией в форме.

При использовании слоистых пластиков заготовка венца изготавливается отдельно от ступицы и соединяется с ней резьбовыми деталями (рис. 3.30), а нарезка зубьев осуществляется после сборки.

При конструировании зубчатых и червячных передач с применением ПМ необходимо учитывать особенности физико-химических процессов в контакте полимер–металл. Практика показала, что, например, полиамиды в определенных условиях могут изнашивать стальное контртело.

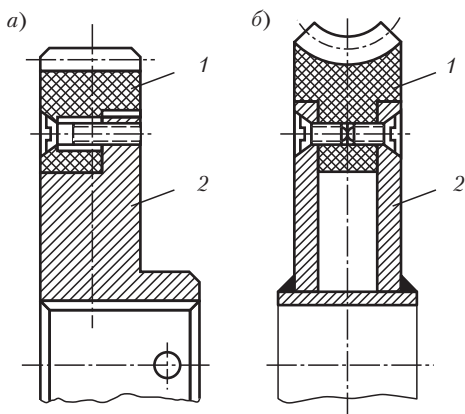


Рис. 3.30. Конструкции сборных зубчатых (а) и червячных (б) колес:
1 — ступица; 2 — вал

3.6. Ременные передачи

Ременные передачи относятся к механизмам с гибкой связью. Они состоят из тел вращения, шкивов и гибких (кинематических) звеньев — ремней. По способу передачи движения и усилия в паре «ремень — шкив» такие механизмы подразделяются на передачи трением и передачи зацеплением. Первые имеют абсолютное преимущественное распространение, вторые — используются в специальных областях применения.

3.6.1. Передачи трением

По характеру работы и форме поперечного сечения гибкого звена ременные передачи трением подразделяются на плоскоременные (прямоугольное сечение ремня), клиноременные (трапецеидальное сечение ремня) и круглоременные (круглое сечение ремня). Форма сечения применяемого ремня определяет соответствующую форму обода шкива (рис. 3.31).

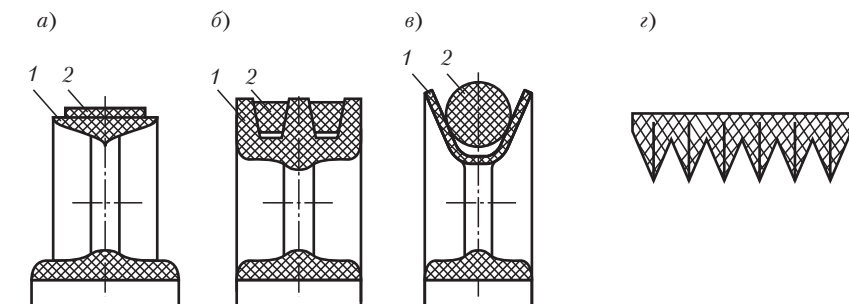


Рис. 3.31. Разновидности ременных передач трением:
а — плоскоременная; б — клиноременная; в — круглоременная;
г — поликлиноременная; 1 — шкив; 2 — ремень

Основными достоинствами ременных передач трением являются: возможность передачи движения между удаленными валами; бесшумность работы; смягчение ударов, толчков и вибраций благодаря эластичности ремня; проскальзывание по шкивам, что при значительных перегрузках предотвращает поломки; невысокая стоимость и простота в обслуживании. Все это послужило причиной их широкого распространения для передачи механической работы.

К недостаткам ременной передачи следует отнести сравнительно большие габаритные размеры, некоторое непостоянство передаточного числа по причине проскальзывания ремня на шкивах, относительно большие давления на валы и опоры. Ремни в этих передачах с течением времени вытягиваются и изнашиваются, что требует регулировки натяжения. Ввиду электризации ремня во время работы ременные передачи не применяются во взрывоопасных помещениях.

Все перечисленные недостатки диктуют необходимость умелого инженерно обоснованного выбора пластмасс для этих механизмов.

В ременных механизмах, показанных на рис. 3.31, передача работы от ведущего звена с центром вращения O_1 (рис. 3.32, а) к ведомому шкиву O_2 происходит за счет сил трения между шкивами и ремнем при условии соблюдения неравенства:

$$P_o \leq F$$

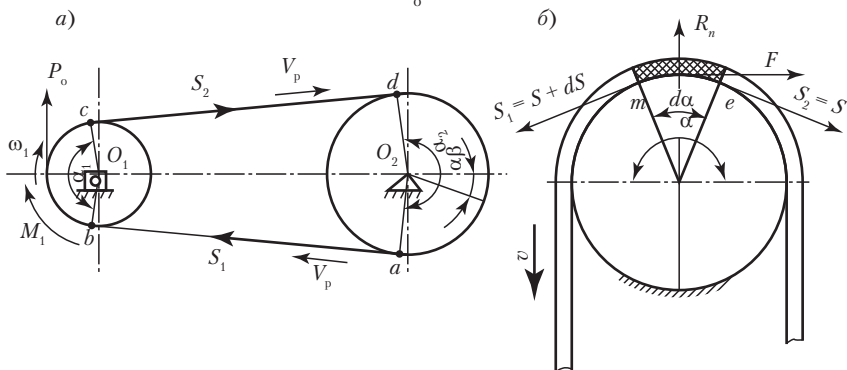


Рис. 3.32. Схема плоскоременной передачи: а — кинематическая схема; б — схема нагружения ремня (гибкого элемента)

Сила трения, необходимая для передачи усилия P_o определяется разностью натяжения ведущей и ведомой ветвей передачи, нагруженных соответственно усилиями натяжения S_1 и S_2 (рисунок 3.32, а).

$$F = S_1 - S_2 > P_o. \quad (3.39)$$

Определим соотношение между этими натяжениями.

На этом же участке (рис. 3.32, б), помимо сил S и $S + dS$, будет действовать вызываемая ими (от давления нити на диск) реактивная сила R_n . Под действием этих трех сил элементарный участок em будет находиться в равновесии. Проецируя все силы на ось y , получим

$$R_n - (S + dS) \sin(d\alpha/2) - S \sin(d\alpha/2) = 0. \quad (3.40)$$

Заменяя синус бесконечно малого угла $[\sin(d\alpha/2)]$ его дугой $(d\alpha/2)$ и пренебрегая бесконечно малой величиной $[dS \sin(d\alpha/2)]$, получим

$$R_n = S d\alpha. \quad (3.41)$$

Далее, имея в виду, что

$$dS = F = \mu R_n = \mu S d\alpha, \quad (3.42)$$

где μ — коэффициент трения между материалом нити (ремня) и материалом диска (шкива), получим

$$\int_{S_2}^{S_1} (dS/S) = \int_0^\alpha (\mu d\alpha), \quad (3.43)$$

$$\ln (S_1/S_2) = \mu\alpha, \text{ или } S_1/S_2 = e^{\mu\alpha}. \quad (3.44)$$

откуда

$$S_1 = S_2 e^{\mu\alpha}. \quad (3.45)$$

Это уравнение называется уравнением гибкой нити (уравнение Эйлера).

Решая совместно (3.40) и (3.45) получаем:

$$S_1 = P_0 e^{\mu\alpha} / (e^{\mu\alpha} - 1) \text{ и } S_2 = P_0 / (e^{\mu\alpha} - 1). \quad (3.46)$$

Отсюда видно, что уменьшить значения S_1 и S_2 можно как конструкторскими решениями, так и подбором материалов с максимальным коэффициентом трения.

Практика показала, что из конструкторских решений наиболее эффективным оказалось изменение профиля сечения ремня и, соответственно, шкива, и переход от плоскоремненной формы к форме сечения в виде клина с углом β (рис. 3.31, б, г). Такие передачи движения осуществляются как моноклиновыми вариантами, когда каждый ремень кинематически самостоятелен, так и поликлиновыми вариантами, в которых несколько клиньев объединены в одно целое общей плоской лентой, с которой они составляют единое целое (рис. 3.31, г).

В клиноремненной передаче (рис. 3.33) сила Q , прижимающая ремень к шкиву, вызывает на боковых гранях канавки (ручья) нормальные реакции $2R_n$, в результате чего возникает сила трения F , которая должна быть больше или равна окружному усилию P_0 .

$$F = 2R_n \mu \geq P_0. \quad (3.47)$$

Проецируя все силы на линию действия Q , получим

$$Q = 2R_n [\sin(\beta/2) + \mu \cos(\beta/2)]. \quad (3.48)$$

Решая совместно эти уравнения, будем иметь

$$P_0 = Q\mu / [\sin(\beta/2) + \mu \cos(\beta/2)] = \mu' Q. \quad (3.49)$$

Величина $\mu' = \mu / [\sin(\beta/2) + \mu \cos(\beta/2)]$ — является приведенным коэффициентом трения. Легко подсчитать, что величина μ' всегда мно-

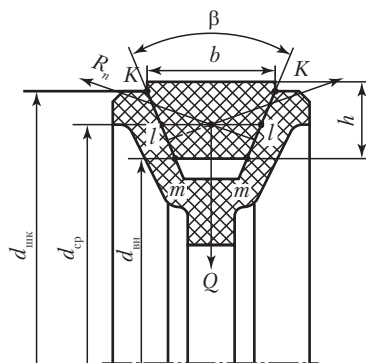


Рис. 3.33. Схема сил, действующих на клиновой ремень

го больше μ . Следовательно, и величина $e^{\mu\alpha}$ в уравнении (3.45) в случае клиноременной передачи будет больше, чем для плоскоремной. Отсюда следует, что при прочих равных условиях натяжения ведомой и ведущей ветвей в клиноременной передаче будут значительно меньше, чем в плоскоремной.

Однако все не так безоблачно. Дело в том, что боковые поверхности клинового ремня работают в условиях относительного скольжения по поверхности ручьев (канавок) шкивов. Поскольку линейная скорость ремня (V_p , рис. 3.32)

$$V_p = 0,5\omega d_{сп} = 0,5\omega_2 d_{сп2} = 0,5\omega_{шк} d_{сп.шк}, \quad (3.50)$$

где $d_{сп}$ — средний диаметр ручья, то при огибании шкива окружная скорость точки K на шкиве

$$V_{к.шк} = 0,5\omega_{шк} d_{шк} > V_p \quad (3.51)$$

и ремень отстает от шкива с относительным скольжением ε_p

$$\varepsilon_p = (V_p - V_{к.шк})/V_p. \quad (3.52)$$

В то же время в точке m на шкиве

$$V_{м.шк} = 0,5\omega_{шк} d_{вн} < V_p \quad (3.53)$$

и ремень опережает шкив с относительным скольжением, равным модулю ε_p . Такой вид скольжения называется также геометрическим. Относительное скольжение сопровождается трением и разогревом

поверхности, что, с одной стороны, ограничивает скоростные возможности клиноременной передачи, а с другой — налагает ограничения на выбор материала для шкивов и ремней.

В круглоременных передачах ремень и шкив теоретически соприкасаются по линии, образуя высшую кинематическую пару. На практике натяжение эластичного ремня сопровождается изменением геометрии его сечения, которое приобретает сложный, близкий к эллиптическому, профиль. В этом случае ремень соприкасается со шкивом не по линии, а по площадке, ширина которой определяется модулем упругости ремня и усилием натяжения. Для круглоременных передач характерны меньшие значения геометрического скольжения, в связи с чем они нередко применяются в приборных устройствах в качестве так называемых пассеков.

Поскольку во всех разновидностях ременных передач трением гибкая связь выполнена из сравнительно низкомодульного (E_p) эластичного материала, подверженного растяжению, а силы, действующие на рабочей (S_1) и холостой (S_2) ветвях, не равны ($S_1 > S_2$), то и величина деформации растяжения ремня на рабочей и холостой ветвях также будет различна.

Если предположить, что материал ремня подчиняется закону пропорциональности деформации действующим напряжениям, то величины относительных удлинений λ_1 , на участке ab и λ_2 на участке cd (рис. 3.33) будут соответственно:

$$\lambda_1 = S_1/FE, \lambda_2 = S_2/FE_p. \quad (3.54)$$

Натяжение $S_1 > S_2$ и, следовательно, $\lambda_1 > \lambda_2$. На участке bc ведущего шкива ремень укорачивается на величину $\lambda_1 - \lambda_2$, а на участке da ведомого шкива удлиняется на такую же величину. По этой причине ведущий шкив, имеющий скорость v_1 , несколько обгоняет ремень, перемещающийся со скоростью v , а ведомый шкив, имеющий скорость v_2 , в свою очередь, отстает от ремня. Следовательно, всегда будет соблюдаться неравенство

$$v_1 > v > v_2,$$

то есть имеет место скольжение ремня, происходящее на обоих шкивах только по поверхности касания их с ремнем, чем оно и отличается от проскальзывания ремня, в котором участвует весь ремень. Такое скольжение, происходящее в результате упругих деформаций ремня, называется упругим скольжением, оно будет тем больше, чем больше

разность $S_1 - S_2$. Соотношение между скоростями v_1 и v_2 или числами оборотов n_1 и n_2 определяется через коэффициент скольжения $\varepsilon_{\text{ск}}$:

$$\varepsilon_{\text{ск}} = (v_1 - v_2)/v_1 = 1 - (v_2/v_1) = 1 - D_2 n_2 / D_1 n_1. \quad (3.55)$$

Таким образом, инженерный анализ устройства и действия ременных передач трением показал следующее:

1. Для ремней и шкивов необходимо выбирать материалы с наибольшим коэффициентом трения и износостойкостью.
2. Материал ремней должен характеризоваться повышенной, в пределах возможного, жесткостью в продольном направлении, то есть минимальным удлинением.

Таковыми материалами для ремней являются композиционные резиноканевые составы, в которых эластомерная составляющая (резина, полиуретан) обеспечивает повышенный коэффициент трения, а тканевый наполнитель ориентированной укладкой — высокую продольную прочность при минимальной деформативности.

Использование в качестве полимерных матриц таких термопластов как ПА, ПФА, ПВХ, ПП, не приведет к улучшению тяговых и эксплуатационных характеристик ременных механизмов.

Для шкивов лучшие результаты дает использование жестких фрикционных термореактивных пресс-материалов типа АГ и волокнит. Не рекомендуется изготовление шкивов из термопластов типа капрон и других полиамидов.

Поскольку все полимерные материалы характеризуются низкой теплопроводностью, то для предотвращения излишнего нагрева клиноременных шкивов рекомендуется предусматривать в их конструкции элементы самообдува и выбирать ПМ с наполнителем в виде теплопроводящего углеволокна.

3.6.2. Зубчато-ременные передачи

Конструктивно этот тип передач существенно отличается от традиционных. На внутренней стороне бесконечного ремня имеются поперечные выступы — «зубья», расположенные с постоянным шагом. Соответственно, шкивы представляют собой своеобразные элементы с наружными «зубьями», профиль канавок между которыми соответствует профилю выступов на ремне — полукруглый или трапециевидный (рис. 3.34).

Такая конструкция обеспечивает принципиальные отличия в работе зубчато-ременных передач от передач, рассмотренных выше.

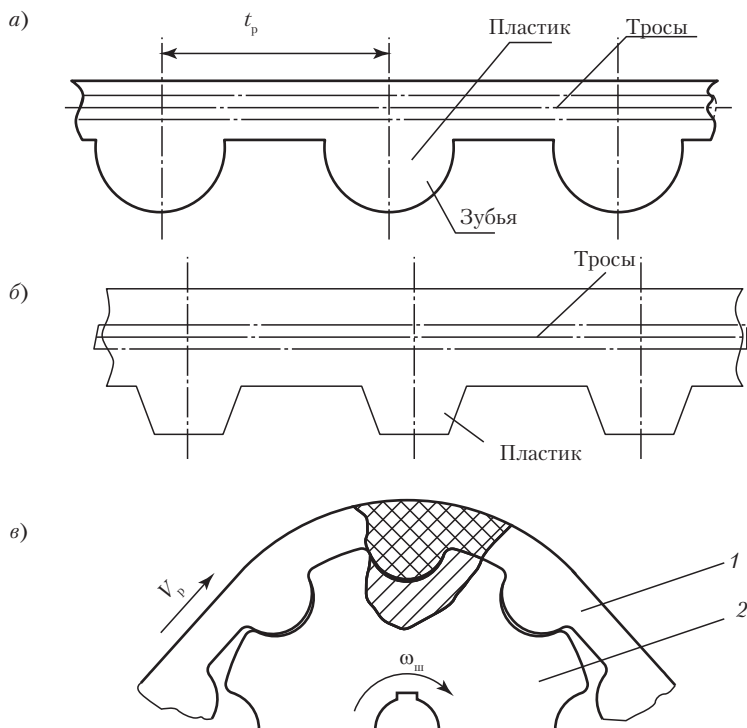


Рис. 3.34. Схема фрагмента зубчато-ременной передачи: а — ремень с полукруглым профилем зубьев, t_p — шаг зубьев; б — ремень с трапецидальным профилем зубьев; в — шкив с ремнем; 1 — зубчатый ремень; 2 — зубчатый шкив

1. Тяговое усилие передается не трением, а зацеплением за счет бокового давления зубьев. Поэтому его значение теоретически не зависит от силы прижатия ремня к шкиву и, соответственно, от силы натяжения ремней.

2. При передаче движения и усилия отсутствует относительное проскальзывание, что обеспечивает постоянство передаточного числа.

3. Однако, на практике шаг зубьев ремня на рабочей ($t_{p.p}$) и на холостой ($t_{p.x}$) ветвях вследствие деформативности материала ремня в условиях $S_1 - S_2 = P_0$ все-таки не совпадают, причем поскольку $S_1 > S_2$, то и $t_{p.p} > t_{p.x}$. Это осложняет эксплуатацию зубчато-ременных передач и ограничивает их ресурс.

Одновременно, благодаря отмеченным особенностям, изменяются и критерии инженерного выбора материалов для ремней и шкивов.

1. Главным критерием являются деформационно-прочностные и усталостные характеристики полимерного композиционного материала. ПМ должен обладать повышенной прочностью при статическом растяжении и изгибе, а также повышенным пределом усталости в условиях пульсирующего цикла напряжений.

2. Поскольку движение выступов–зубьев ремня по канавкам шкива сопровождается относительным скольжением профилей и, следовательно, трением, то желательно использование ПМ с уменьшенным значением коэффициента трения.

3. Наличие трения скольжения неминуемо сопровождается нагревом сопрягающихся кинематических элементов, что диктует необходимость выбора для их изготовления ПМ с повышенной теплостойкостью ($T_p > 100^\circ\text{C}$).

4. Следствием тепловыделения в зоне контакта является необходимость теплоотвода генерированной энергии. Как правило, это достигается применением металлических шкивов.

5. В настоящее время зубчатые ремни выполняются из эластомеров неопрена или полиуретана, армированных металлическими тросами диаметром 0,36–0,65 мм. Здесь эластомер обеспечивает износостойкость и изгибную (на шкивах) деформативность, а металлические тросы создают продольную прочность и жесткость. Однако вполне возможна и замена фрикционного неопрена или полиуретана на высокопрочные износостойкие композиционные пластики последнего поколения — ПФС, ПАИ и др. (см. приложение), не нуждающиеся в дополнительном армировании.

3.7. Цепные передачи

Полимерные материалы стали применяться в цепных передачах сравнительно недавно и лишь после появления на рынке конструкционных термопластов с относительно повышенной прочностью и сопротивлением ударным нагрузкам. И тем не менее диапазон использования цепных передач из ПМ весьма ограничен. Это, главным образом, пищевые, медицинские и биолого-технологические производства, то есть те сферы применения, где от материалов требуется химическая и биологическая стойкость, способность к разнообразным видам стерилиза-

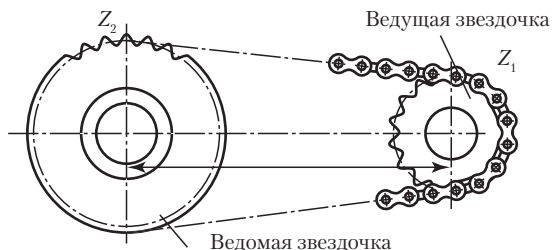


Рис. 3.35. Схема цепной передачи

ций; на них действуют сравнительно невысокие нагрузки при невысоких требованиях к кинематической точности.

В типовой цепной передаче (рис. 3.35) тела вращения выполнены в виде колес, имеющих по периферии на окружности зубья, изготовленные по определенному профилю. Такие цепные колеса называются звездочками.

В качестве гибкого (кинематического) звена в этих передачах применена цепь, состоящая из ряда последовательно шарнирно соединенных одинаковых элементов, называемых звеньями цепи. Передача движения и работы в цепной передаче осуществляются за счет зацепления звеньев цепи с зубьями звездочек и создания бокового усилия в контакте «зуб звездочки—цепь». Одним из достоинств цепного механизма является возможность осуществлять передачу движения с постоянным передаточным числом i_{1-2}^* на значительные расстояния ($A \leq 8$ м) при большой компактности конструкции.

Возможна передача движения с одной цепью нескольким звездочкам. Цепная передача обычно применяется в тех случаях, когда невозможно или невыгодно осуществлять ее зубчатыми колесами, но необходимо точно выдержать среднее передаточное число.

Наряду с перечисленными достоинствами цепная передача, в том числе и пластмассовая, имеет и существенные недостатки. К ним относятся: неизбежная вытяжка (удлинение) цепи (вследствие износа шарниров); внезапность разрыва цепи; возможность осуществления передачи только между параллельными валами, сравнительно малая способность поглощать ударные нагрузки, а поэтому недостаточная пригодность для периодически действующего или быстро реверсируемого привода; необходимость тщательной сборки передачи и хорошего ухода при эксплуатации.

* Передаточное число $i_{1-2} = z_2/z_1$, где z — число зубьев.

При всем при том пластмассы (в качестве исключительно технологичных материалов) весьма привлекательны для производства цепей и прежде всего так называемых втулочно-пластинчатых, элементы которых могут изготавливаться высокопроизводительными методами литья под давлением, прессования и штамповки из листа.

Каждое звено пластинчато-втулочной цепи (рис. 3.36) состоит из валика 1, на который свободно надета втулка 2. На концы втулки напрессованы внутренние пластины 3, а на концы валика — наружные пластины 4. Для обеспечения равнопрочности пластин на растяжение при наименьшем их весе им придают форму, напоминающую восьмерку.

Пластины 4 вместе с валиком 1 могут свободно поворачиваться во втулке 2 относительно пластины 3. Втулка цепи непосредственно соприкасается с зубьями звездочки. Расстояние между осями валиков 1 называется шагом цепи t . Такие цепи применяются обычно при $v \leq 10$ м/с.

При набегании цепи на звездочку каждое звено поворачивается относительно последующего на угол α (рис. 3.36, б) в направлении вращения звездочки, а при сбегании с нее — на такой же угол, но в противоположном направлении. Это «качательное» движение является основной причиной износа шарниров цепи и ее разрушения. Кроме того, в пластинчатых цепях отмечаются потери на трение боковых поверхностей пластин.

Натяжение рабочей ветви цепного механизма при передаче окружного усилия вызывает напряжение и деформацию растяжения пластин (сечение $e-e'$), изгиб валиков (участок $a-d$) и их возможный срез по плоскостям соприкосновения пластин наружного и внутреннего звеньев (сечения $b-b'$ и $c-c'$, рис. 3.36, а).

Накопленная по длине рабочей ветви суммарная деформация растяжения существенно ухудшает кинематические параметры цепной передачи.

Таким образом, при инженерном выборе ПМ исходят из того, что цепные передачи работают в условиях динамических нагрузок, создающих в элементах цепей сложные напряженные состояния (растяжение, изгиб, срез), сопровождаемые явлениями трения и износа шарниров, что существенно ограничивает ресурс этих механизмов.

Для изготовления элементов цепей рекомендуется применять высокопрочные конструкционные антифрикционные термопласты с рубленым волокнистым наполнителем. Из распространенных разновидностей ПМ это могут быть стеклонаполненные ПА, ПФА, ПП, ПК, ПЭТФ. Безусловно, пригодны и такие термопласты, как фенилон, по-

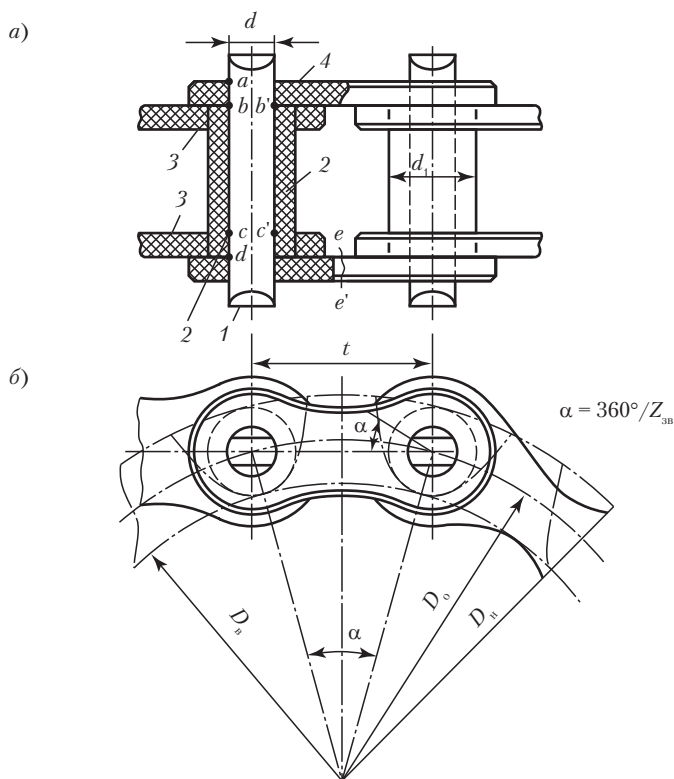


Рис. 3.36. Устройство пластинчато-втулочной цепи. Пояснения в тексте

лисульфон, полиимид и другие, относящиеся к сверхвысокопрочным полимерам. Для пластин, валиков и втулок рекомендуется использовать различные по свойствам ПМ. Например, пластины — П12ВС, втулки — ПФА, валик — аман.

Для изготовления звездочек рекомендуются волокниты, эпоксипласты, материалы типа АГ-4, а также термопласты, перерабатываемые полимеризацией в форме, например, капролон.

При необходимости бесшумной и плавной работы передач мощностью до 5 кВт со скоростями металлических цепей до 10 м/с можно изготавливать гибридные металлопластиковые звездочки с венцами из текстолита, ПФА, ПА.

В отдельных случаях для снижения шума в скоростных передачах применяют звездочки с покрытиями рабочих поверхностей зубьев в виде антифрикционных конструкционных термопластов (см. приложение).

3.8. Опоры качения

По тиражу и распространенности опоры качения могут сравниваться лишь с крепежными резьбовыми изделиями. Это объясняется их главным достоинством — при нормальных режимах работы средние значения коэффициента трения, приведенные к цапфе поддерживаемой детали, колеблются в пределах 0,0015–0,008. Малая величина потерь на трение в подшипниках качения обеспечивает высокий КПД механической передачи и всей машины, минимизирует период ее пуска и обеспечивает минимальный нагрев узлов трения. Абсолютное большинство подшипников качения изготавливается из высококачественных легированных сталей и подвергается сложной термохимической обработке. Тем не менее и подшипники качения не лишены недостатков, а именно: высокие контактные напряжения в паре элемент качения–дорожка качения; ограниченная способность к восприятию ударных нагрузок; ограниченный ресурс в режиме малых скоростей вращения при значительных нагрузках; чувствительность к запыленности окружающей среды; необходимость граничной смазки в условиях высоких скоростей ($> 200 \text{ с}^{-1}$).

Перечисленные плюсы и минусы опор качения заставляют оценить возможность выбора и применения в этих узлах полимерных материалов.

Подшипники качения состоят из двух колец, наружного *A* и внутреннего *B* (рис. 3.37), между дорожками качения *C* которых помещены элементы качения *D*.

В подшипниках качения наиболее распространены следующие элементы качения (рис. 3.38): *a* — шарики; *б, в* — ролики гладкие цилиндрические (короткие или длинные); *г* — цилиндрические витые; *д* — конические; *е* — бочкообразные; *ж* — игольчатые.

В большинстве конструкций подшипников элементы качения разделены промежуточным кольцом-сепаратором *E* (см. рис. 3.37).

По форме тел качения различают подшипники шариковые и роликовые, в зависимости от геометрической формы тел качения.

Роликовые подшипники, кроме того, подразделяются на подшипники с короткими (цилиндрическими, коническими и бочкообразными)

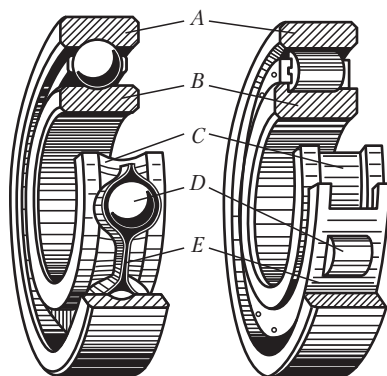


Рис. 3.37. Устройство подшипника качения

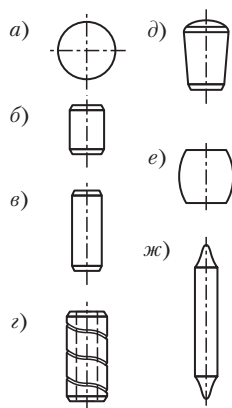


Рис. 3.38. Форма элементов качения. Пояснения в тексте

и длинными роликами (цилиндрическими сплошными, цилиндрическими витыми и игольчатыми). На все разновидности металлических подшипников действуют международные стандарты. Выбор конкретного типоразмера подшипника качения определяется условиями его эксплуатации (модуль и вектор нагружения, температура, скорость вращения шипа, наличие вибрации, требуемая точность узла и т. д.).

Принципиально возможны два варианта использования пластмасс в подшипниках качения.

Первый — изготовление подшипника полностью из полимерных материалов.

Второй — частичное применение ПМ в металлических подшипниках качения.

Из схемы на рис. 3.39 видно, что кривизна тела качения (в данном случае $d_{ш}$, поз. 1) и дорожки качения (d_k , поз. 3) не совпадают, причем $d_k > d_{ш}$.

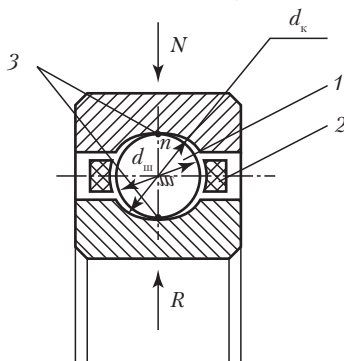


Рис. 3.39. Схема устройства и нагружения радиального шарикоподшипника

Это означает, что теоретически эти элементы соприкасаются в точке. Понятно, что реально контакт не точечный, но площадь его минимальна и она функционально антибатна, но не обратно пропорциональна значению модуля упругости материалов колец и элементов качения. Поскольку из любого справочника по ПМ можно легко установить, что модуль упругости даже самого жесткого высокопрочного пластика в десятки раз ниже модуля упругости стали (см. приложение), то становится понятным нижеследующее:

1. Применение пластмасс для подшипников качения, полностью адекватных стальным, — совершенно бесперспективное дело.

2. При крайней необходимости, вызванной особыми условиями применения (агрессивная среда, необходимость периодической стерилизации, незначительность скоростей и нагрузок и тому подобное), исключая использование серийных подшипников, допустимо применение высокопрочных теплостойких антифрикционных полимерных материалов. Предпочтительная конструкция подшипника — роликовая или игольчатая. Возможно следующее сочетание ПМ.

Материал кольца	ПК + СВ	ПФА	ПЭТ
Материал тела качения	ПК + СВ + ДМ	ПК + СВ + ДМ	ПФС + УВ

3. В металлических подшипниках ПМ могут применяться для изготовления сепараторов, которые будут представлять собой источник поступления твердой смазки на поверхность элементов качения и дорожки. Такими материалами для сепараторов являются композиции на основе фторопласта Ф-4 с дисперсными наполнителями, среди которых желательное присутствие твердосмазочных компонентов (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Твердосмазочные тонкодисперсные наполнители [28]

Наполнитель	Индекс	Допустимые условия работы
Графит	Г	До +540 °С, среда — агрессивный газ
Дисульфид молибдена	Д	От –180 °С до +525 °С
Нитрид бора	НБ	До +200 °С
Оксид бора	ОБ	До +1250 °С, вакуум
Дисульфид вольфрама	ДВ	На воздухе до 500 °С, в вакууме до 1250 °С
Диселенид вольфрама	ДСВ	В вакууме при $\sigma_k \leq 1300$ МПа
Бронзовая пудра	Б	

Применение сепараторов из самосмазывающихся ПМ существенно расширяет возможности подшипников качения. Так, сепаратор из Ф4С15Д1,5 позволяет эксплуатировать подшипник в криогенных жидкостях (здесь С15 — 15% рубленого стекловолокна, выступающего в качестве армирующего элемента), сепаратор из Ф4Д5 обеспечивает работу шарикоподшипника из стали ШХ-15 без смазки при контактных напряжениях до 1,8 ГПа.

В качестве высокоэффективных сепараторов используют также литьевые марки фторопластов на основе сополимера Ф40: Ф40С15Д1,5; Ф40Д30; Ф40Г20; Ф40Б70.

3.9. Опоры скольжения

В подавляющем большинстве случаев опоры скольжения служат для поддержания вращательного движения валов и осей. Конструктивно такие опоры оформляются в виде радиальных подшипников (рис. 3.40, а) или подпятников (рис. 3.40, б). В первых нагрузка действует по оси, совпадающей с радиусом шипа или цапфы поддерживаемой детали, а во вторых — нагрузка действует вдоль оси поддерживаемой детали. Для уменьшения потерь на трение между поддерживаемой деталью и корпусом опоры размещают вкладыш из антифрикционно-

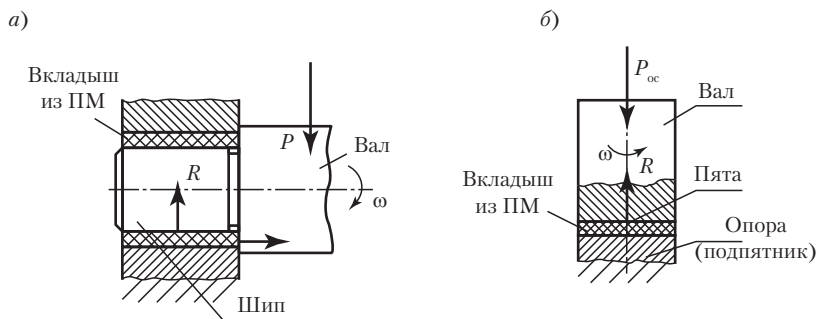


Рис. 3.40. Схема устройства опоры скольжения:
а — радиальная (подшипник); б — осевая (подпятник)

го материала. В нашем случае этот материал — пластмасса. Практика показала, что в абсолютном большинстве применений используются именно радиальные схемы в виде радиальных подшипников скольжения, в которых нагруженный (сила P) металлический вал или ось вращаются, скользят в неподвижном кольцевом элементе — вкладыше. В зазор между валом и вкладышем может подаваться смазка. Скольжение сопровождается трением, а трение всегда, раньше или позже, приводит к разрушению, истиранию соприкасающихся поверхностей, даже в условиях так называемого безызносного трения.

Разнообразные факторы, которые необходимо учитывать при выборе пластмассы для узла трения и оценке сопровождающего его изнашивания, группируются в две неразделимые триады: материаловедческую — «исходные свойства–изменение свойств–разрушение» и конструкторско-эксплуатационную — «вид сопряжения–режим работы–конструкция узла». Попытка решить задачу создания или выбора полимерного материала, опираясь только на одну из перечисленных триад, не дает положительных результатов.

В нашем сугубо материаловедческом случае, абстрагируясь от всех конструкторских и эксплуатационных вариантов, мы выбираем критериальные параметры, определяющие главное в выборе ПМ для опор скольжения. Будучи предельно укрупненными, они формулируются следующим образом:

1. В узле присутствует жидкая смазка; скольжение происходит в условиях, когда поверхности узла скольжения полностью разделены и не соприкасаются при относительном движении.

пает в зону трения и сохраняется в ней в течение определенного времени. Микрогеометрия контакта и в этом случае неизменна (см. рис. 3.41, б).

В первом случае полное разделение вала и вкладыша происходит в условиях образования масляного клина при затягивании жидкой смазки в зону трения вращающейся детали. Гидродинамическое давление в клиновом слое уравнивает давление от рабочего усилия P (см. рис. 3.41, б). В этом установившемся режиме износ вкладыша практически отсутствует, а величина коэффициента трения определяется реологическими особенностями смазки. По логике вещей от ПМ не требуется антифрикционность, а желательны лишь повышенный модуль упругости и твердость как свойства, определяющие точность и размерную стабильность изделий. Однако в этом рассуждении не учитывается важное обстоятельство.

В состоянии покоя ($\omega = 0$) цапфа лежит на вкладыше подшипника (см. рис. 3.41, а) и зазор между цапфой и вкладышем имеет клиновую (серповидную) форму. В начале движения цапфы между ней и вкладышем возникает полусухое трение. Затем, по мере увеличения ω наступает режим полужидкостного и, лишь в конце разгона, — жидкостного трения, при котором (см. рис. 3.41, б) цапфа всплывает на слое смазки.

До образования масляного клина вал и в этом случае соприкасается с вкладышем на участке дуги $m - n$ (см. рис. 3.41, а), микрогеометрия которого показана на рис. 3.41, в.

Поскольку модуль упругости пластмассы в сотни раз меньше, чем у металла, то такую пару трения можно представить набором абсолютно жестких микровыступов (металл), внедряющихся в ровную поверхность полимерного тела (см. рис. 3.41, в). Глубина внедрения зависит от свойств пластмассы и давления на номинальной поверхности. На суммарную площадь фактического контакта, который в пределе может достигать номинальной площади, оказывает решающее влияние шероховатость металлической поверхности, оцениваемая высотой микровыступов h .

На участках фактического контакта между контрповерхностями возникают фрикционные связи, разрываемые тангенциальными усилиями.

Если под действием нормального усилия полимерный материал заполняет микровпадины шероховатого металлического тела полностью, то такой контакт называют насыщенным. В случае, когда фрикционный контакт ненасыщен, свободные микрообъемы заполняются либо жидкой смазкой, либо продуктами износа, либо обоими этими

компонентами. При использовании в составе полимерного композита твердосмазочного компонента вакантные микрообъемы выступают в качестве коллекторов твердой смазки.

Кинематическая работоспособность пары трения скольжения сохраняется независимо от степени износа, разумеется, в лимитированных пределах ее элементов.

Таким образом, даже в условиях гидродинамического режима трения от выбираемого полимерного материала требуется определенная антифрикционность, то есть пониженный коэффициент трения в условиях граничного или полусухого режимов.

Отсюда следует материаловедческий вывод — вкладыш для подшипника скольжения в любом случае должен обладать антифрикционными свойствами.

Под антифрикционными свойствами понимается способность ПМ к скольжению с минимальными потерями на трение ($F_{\text{тр}}$), поскольку

$$F_{\text{тр}} = \mu_{\text{тр}} N, \quad (3.56)$$

где N — нормальное усилие; $\mu_{\text{тр}}$ — коэффициент трения при скольжении:

$$\mu_{\text{тр}} = F_{\text{тр}}/N. \quad (3.57)$$

Именно этот безразмерный параметр является фрикционной характеристикой ПМ.

Принято считать, что антифрикционными являются пластмассы, у которых $\mu_{\text{тр}} \leq 0,2$. Пластмассы с $\mu_{\text{тр}} \geq 0,3$ считаются фрикционными. Фрикционные ПМ используются в специальных устройствах, предназначенных для передачи или замедления движения за счет сил трения. В настоящей работе они не рассматриваются.

Такое деление довольно условно. Дело в том, что еще в 70-х годах С.Б. Айнбиндер и Э.Л. Тюнина [26] установили, что при скольжении в вакууме все исследованные ими полимеры, а это были и популярные, признанные в качестве антифрикционных, полиамиды, полиформальдегиды и признанные фрикционные пластики на основе фенолоформальдегидных смол и ряд других термо- и реактопластов, продемонстрировали движение с $\mu_{\text{тр}} = 0,6\text{--}0,9$. Даже такой полимер, как фторопласт Ф4 показал, что $\mu_{\text{тр}} = 0,3$.

Вместе с тем нанесение следов влаги или смазки жидкой или твердой на поверхность трения приводило к многократному уменьшению коэффициента трения.

Отсюда следует ряд практических выводов:

1. Нет антифрикционных полимеров, а есть пластмассы, демонстрирующие антифрикционность в условиях наличия на поверхности трения хотя бы следов смазки (влаги, масла, твердые смазки и др.). Такие ПМ называются антифрикционными.
2. Поскольку даже следов смазки достаточно для реализации антифрикционности, то введение в состав термопластичного или термореактивного полимера веществ, способных создавать монослой в зоне трения, позволяет приготавливать антифрикционные композиты с широким комплексом триботехнических, деформационно-прочностных, теплофизических и технологических свойств, оптимально приспособленных для работы в узлах трения самого разнообразного назначения, то есть практически в любых технических устройствах любых отраслей техники: от бытовой до аэрокосмической.
3. Широкий спектр антифрикционных трибопластов позволяет осуществлять эффективный инженерный выбор материалов для новых создаваемых машин и механизмов.

В качестве полимерных матриц для антифрикционных полимерных материалов (АПМ) чаще всего используют термопласты, характеризующиеся повышенными физико-механическими свойствами и деформационной теплостойкостью. Чаще других используются полиамиды, полиформальдегид, поликарбонат, полиимиды, полиарилаты, фенилоны, а также фторопласты и термостойкие конструкционные пластмассы из новых полифениленоксидов, полиимидов и др. (смотри приложение). В отдельных случаях известно использование полипропилена и полиэтилена высокой плотности [27].

Термопластичные АПМ перерабатываются в изделия высокопроизводительными методами литья под давлением и экструзии, что важно для массового и крупносерийного производства.

В качестве антифрикционных наполнителей используют дисперсные порошки неорганических веществ, имеющих слоистую кристаллографическую решетку. К ним относятся графит, дисульфид молибдена (природный), диселениды и дихалькогениды металлов, а также нитрид бора, йодистый кадмий и другие. Из органических продуктов используют фторопласт-4, полиэтиленовые воска, а также жидкие антифрикционные добавки. Нередко АПМ содержит несколько разновидностей антифрикционных наполнителей.

Содержание наполнителей и добавок составляет от 1 до 15%*. Дальнейшее увеличение количества наполнителей приводит к быстрому падению физико-механических свойств и износостойкости.

Термодеформационные и теплофизические свойства дисперсно наполненных АПМ близки тем или иным свойствам ненаполненных полимеров и поэтому в них отмечаются характерные недостатки пластмасс — низкая теплопроводность, высокий и нестабильный коэффициент линейного теплового расширения, в большинстве случаев недостаточная теплостойкость.

Для улучшения свойств АПМ армируют жесткими и прочными наполнителями — углеродными или металлическими волокнами, тканями, лентами, шнурами, коксом. Содержание наполнителей в этих случаях может возрастать до 20–50% для литевых марок и до 60–98% — для прессовочных. У таких материалов повышается теплопроводность, стабилизируются свойства в функции температуры [29].

Из термореактивных связующих в АПМ используются практически все известные полимеры. Наиболее популярны эпоксидные смолы, фенолоформальдегидные олигомеры, ненасыщенные полиэфиры, эпоксидно-новолачные сополимеры. Основные разновидности АПМ приведены в табл. 3.2.

Процессы трения и сопровождающего его износа характеризуются следующими техническими параметрами (табл. 3.3):

1. Коэффициент трения скольжения $\mu_{\text{тр}}$ (рассмотрено выше).

2. Интенсивность износа J , равная отношению изменения размера (массы) изнашиваемого изделия или затрат энергии на этот процесс к пути трения L , называемого также пробегом. Различают интенсивность износа:

- линейного $J_h = \Delta h/L$;
- массового $J_g = \Delta g/L$;
- энергетического $J_w = \Delta A_{\text{тр}}/L$;

где J_h и J_g — толщина и масса изношенного слоя; $\Delta A_{\text{тр}}$ — работа трения на пути L (Дж).

3. Износостойкость I — величина, обратная интенсивности износа $I = 1/J$. Соответственно, различают износостойкость линейную (безразмерная величина), массовую (м/мг) или энергетическую (м/Дж).

* За исключением фторопласта-4, хладотекучесть которого пытаются уменьшить созданием каркаса из частиц кокса, содержание которого может превышать указанные пределы.

Таблица 3.2. Разновидности антифрикционных самосмазывающихся пластмасс [31, 32]

Марка материала	Основные компоненты	Метод переработки	Применение
Термопластичные материалы			
П-610-1-109	П-610, дисульфид молибдена, стекловолокно (30%)	Литье под давлением	Подшипники, зубчатые колеса, $T < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
ПА-12-21-3	П-12, дисульфид молибдена	Экструзия	Профильные изделия, трубки
ПА-6-1-203	ПА-6, графит	Литье под давлением	Подшипники для ударных нагрузок
АТМ-2	Вторичный полиамид, графит, термоантрацит	Литье под давлением	Втулки, шестерни, уплотнения
АМС-2С	Вторичный полиамид П-610, графит, кокс	Литье под давлением	Тяжелонагруженные втулки
САМ-4	ПА-6, ПЭВП, добавки	Литье под давлением	Зубчатые колеса без смазки
Маслянит ПМ	ПЭВП, минеральное масло, высокодисперсный наполнитель	Литье под давлением	Направляющие для спуска судов
Фенилон ФГ	Фенилон, углеродное волокно	Прессование	Подшипники для абразивных сред при $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
СФМ-ДМ	Полиформальдегид с дисульфидом молибдена	Литье под давлением	Подшипники, уплотнения для вакуум-систем
Эстеран	Поликарбонат, наполнители	Прессование	Детали скольжения и качения
Тесан	Поликарбонат, дисульфид молибдена	Прессование	То же
ПМ-67 ДМС	Полиимид ПМ 67, дисульфид молибдена	Прессование	Тела качения и скольжения при $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
ПМ-69 Г5	Полиамид ПМ 69, графит	Прессование, механическая обработка	То же
Материалы на основе фторопластов			
АФГ-80 ВС	Фторопласт-4, графит, кокс	Прессование	Подшипники, уплотнительные кольца
Ф-4Г40	Фторопласт-4, графит	Прессование, спекание	Уплотнения для компенсаторов

Таблица 3.2 (окончание)

Марка материала	Основные компоненты	Метод переработки	Применение
Ф-4К20	Фторопласт-4, кокс	То же	Уплотнители для вакуум-установок
Ф-4С15В5	Фторопласт-4, измельченное стекловолокно, нитрид боа	Прессование	Подшипники при повышенных температурах и агрессивных средах
Термореактивные материалы			
АТМ-1	Новолачная ФФС, электродный графит, добавки	Прессование, карбонизация	Детали насосов, токоъемники
АФ-3Т	Резольная ФФС, нефтяной кокс	Прессование	Подшипники для агрессивных сред
УГЭТ	Эпоксидная смола, углеволокна, тетраглицидиламин, наполнители	Намотка и горячее прессование	Подшипники для морской воды
АГЭН	Эпоксидно-новолачный сополимер, углеволокно, добавки	Горячее прессование	Подшипники стиральных машин
СТЭН-АФ	Эпоксифенольный сополимер, углеткань, добавки	Намотка, прессование	Подшипники для экстремальных условий
ЭНГ-25	Эпоксидноноволачная смола, дисульфид молибдена, добавки	Трансферное прессование	Кулачки приборных механизмов
ЭДМА-5	Эпоксидная смола, наполнители	Холодное отверждение, механическая обработка	Антискачковые композиции

4. Параметры режима трения: давление номинальное, $P = N/S$, Па; скорость скольжения v , м/с. Произведение Pv имеет весьма важное значение при оценке практической применимости материала в подшипниках скольжения, работающих в определенных энергетических условиях нагрузки и скорости скольжения. Размерность Pv — Вт/м². Каждый трибопласт характеризуется своим допускаемым параметром режима, обозначаемым $[Pv]$ (табл. 3.4).

Таблица 3.3. Параметры трения и изнашивания АПМ [27]

Марка материала	P , МПа	v , м/с	$J_h \cdot 10^8$	$\mu_{тр}$
АМС-1	1,0	0,5	0,01	0,20
	5,0	0,5	0,10	0,08
	15,0	0,5	0,27	0,03
АМС-3	1,0	0,5	0,02	0,25
	5,0	0,5	0,22	0,1
АФ-3Т	1,0	1,0	0,07	0,16
	4,0	1,0	0,25	0,18
Реолар-9	0,2	2,0	0,1	0,08
Тесан	0,2	2,0	0,07	0,06
Эстеран	0,2	2,0	0,05	0,08
ФАФФ-31Г	—	—	8200	—
ПАМ-15-67	5,0	0,5	5,0	0,1–0,2
ПАМ-50-67	5,0	0,5	1,0	0,08–0,09
АТМ-2	2,0	0,27	0,54	—
	4,0	0,287	0,10	0,15
Ф-4С15	1,5	0,25	0,18	—
Ф-4К20	1,5	0,25	0,06	—
АФГ-80ВС	4,0	0,287	0,5	—
СФД-ДМ	0,8	0,3	2,7	0,18–0,26
ПА-66ПЭ	0,8	0,3	0,57	—
	18	0,12	10,0	0,08
ЭНГ-25	1,0	0,5	0,83	0,08
	18	0,12	12,0	—
КСПЭ	1,0	0,5	12,0	—
	18	0,12	0,44	0,18
КСЦ	1,0	0,5	17,0	—
	18	0,12	0,17	0,14
ЭДМА-5	2,0	0,06	1,0	0,22
	0,4	0,06	0,3	0,23
ЭДМ А-10	2,0	0,06	2,0	0,24
	0,4	0,06	0,28	0,40
П15Н	0,65	1,0	0,05	0,28–0,32
Фенилон ФА	2,0	1,0	0,06	—
АГЭН	0,65	1,0	1,2	0,10–0,15

Таблица 3.4. Сравнительные возможности подшипников скольжения из различных материалов

Показатели	Углеродистые			Полиамиды	
	простые	с добавкой Ф-4	с добавкой бронзы	обычные	с графитовым наполнителем
p_{\max} , МПа (при $v = 0$)	1,4–3,5	3,5–7,0	7,0	2,5	2,5
v_{\max} , м/с (при длительной работе)	1,0–2,5	2,5–7,5	5,0–12,0	1,0–2,0	1,0–2,0
$[Pv]$, МПа·м/с (при долговечности 10 000 ч)	5,0	4,0	5,0	0,8–2,0	1,0–2,0
Коэффициент трения	0,10–0,30	0,10–0,20	0,12–0,25	0,20–0,40	0,10–0,25
Допустимая температура на рабочей поверхности, °С	120–150	150–200	150–200	70	80
Сопротивление влаге	Отличное	Хорошее	Хорошее	Удовлетворительное	Удовлетворительное
Сопротивление коррозии					
	Хорошее	Удовлетворительное	Плохое	Хорошее	Хорошее

Полиформальдегид		Фторопласты			Графитопласты		Дерево, пропитанное воском
обычный	наполненный тефлоном	наполненный		с ориентированными волокнами	волокнистые	фенопласты, аминопласты	
		низкой теплопроводности	высокой теплопроводности				
5,6	5,6	1,0	7,0	4,2	35,0	28,0	7,7
1,5	2,0	0,5	0,5	1,0	5,0	3,0	2,0
0,8–1,0	1,2–2,5	0,3–0,6	0,3–12,0	1,5–5,0	10,0	7,0	2,5
0,15–0,35	0,05–0,20	0,10–0,25	0,10–0,25	0,02–0,25	0,10–0,20	0,02–0,10	0,07–0,18
90	110	160	160	160	120	160	70
Хорошее	Хорошее	Хорошее	Хорошее	Хорошее	Удовлетворительное	Хорошее	Хорошее
Хорошее	Хорошее	Хорошее	Хорошее	Хорошее		Хорошее	Хорошее

Инженерное совершенство узла трения определяет оптимальность сочетания режимов работы, то есть давления на поверхности трения и скорости скольжения с условиями теплоотвода из зоны трения через металлический вал и специальные охлаждающие системы.

Режимный фактор Pv имеет большое значение при работе подшипников скольжения, так как характеризует удельную мощность трения и определяет конструкцию охлаждающих устройств. Предельное значение удельной мощности трения определяется по формуле:

$$Pv_{\mu_{\text{тр}}} = (K[T]/S) [Pv], \quad (3.58)$$

где P — давление в зоне трения, кПа; v — скорость относительного скольжения, м/с; K — коэффициент теплоотвода, Вт/град; $[T]$ — допускаемая избыточная температура, °С; S — площадь проекции поверхности трения на плоскость, нормальную вектору силы, создающей давление в паре трения; для радиального подшипника скольжения, $S=dl$, где d — диаметр, l — длина опорного участка вала (цапфы или шипа); $[Pv]$ — табличная величина допускаемого для данного трибопласта значения удельной мощности трения (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Триботехнические свойства АПМ (с использованием данных [20])

Показатель	Ф-4	Ф-4К20	Ф-4К15М5	АГЭН	СТЭН-АФ
Предельное значение $[pv] \cdot 10^3$ при v , м/с:					
0,05	45	500	600	450	700
0,50	65	700	700	480	850
1,5	—	—	—	550	1000
5,0	90	1100	1100	600	1500
Коэффициент сравнительного изнашивания	645	1,4	0,9	1,2	0,6
Относительная износостойкость, $1 \cdot 10^9$	1	650	1000	750	2500

Коэффициент теплоотвода определяется с учетом параметров теплопередачи между элементами пары трения и активности охлаждения. Допускаемая избыточная температура равна разности между допускаемой температурой эксплуатации полимера и температурой окружающего пространства.

Расчет по уравнению (3.58) позволяет решать вопрос о целесообразности использования в узле трения тех или иных АПМ.

Таким образом, решая вопросы выбора полимерных материалов для узлов трения, необходимо учитывать комплекс условий, включающих материаловедческие, кинематические, инженерно-конструкторские и эксплуатационные факторы. Оптимальное сочетание перечисленных факторов является гарантией высокой эффективности металло-полимерных узлов трения.

Инженерная практика показала, что лучшие эксплуатационные показатели реализуются в гибридных металлополимерных конструкциях подшипников скольжения. В них сочетаются лучшие антифрикционные свойства полимеров, например Ф-4, Ф-4НТД, и механическая прочность и жесткость металлической обоймы.

4. Практическая идентификация пластмасс

Закон Мейера. *Усложнять вещи очень просто, но сделать их простыми очень сложно.*

Закон приложения силы Энтони. *Не применяйте силу, лучше возьмите молоток.*

А. Блох

Под практической идентификацией понимаются действия, позволяющие с достаточной степенью вероятности определить вид полимерного материала с тем, чтобы в дальнейшем получить возможность уже по табличным данным оценить его технические, технологические и эксплуатационные свойства. На этом уровне идентификации не ставится задача детального, глубокого анализа пластика, позволяющая установить его подробную рецептуру, молекулярные и надмолекулярные особенности, химическое строение и структурные параметры полимерной матрицы, особенности ее взаимодействия с наполнителем и другими компонентами состава и пр.

В связи с этим практическая идентификация решает прикладные, инженерные задачи методами, не требующими узкоспециальных аналитических подходов.

Необходимость таких действий вызывается множеством практических причин, например:

1. При конструировании нового изделия по имеющемуся образцу требуется установить, из какого материала изготовлен аналог, и выбрать пластик, обеспечивающий новому изделию конкурентное превосходство.
2. В конфликтных ситуациях бывает необходимо установить, действительно ли то или иное изделие изготовлено из пластмассы (ПМ), указанной его разработчиком.
3. При получении сырья без надлежащих характеристик может потребоваться установление его вида, а лучше, если возможно, марки.
4. В ряде случаев требуется проверить полученное сырье или определить, из свежего или вторичного сырья, или их смеси получено

изделие. Последнее актуально для экструзионного производства. И так далее.

Примерный алгоритм идентификации ПМ выглядит следующим образом.

1. Установление группы, к которой относится оцениваемый материал — термопласт или реактопласт.
2. Установление вида полимера или полимерной матрицы. Это — наиболее сложная часть исследования.
3. Оценка содержания и вида наполнителя.
4. Оценка наличия модификаторов.

В соответствии со сложностью решаемых задач применяются две группы методов. Первая, достаточно простая, основана на последовательном исключении возможных вариантов с помощью простейших испытаний, включающих и органолептический подход. Вторая, аппаратная, состоит в системном экспериментальном анализе, выполненном с привлечением сложной лабораторной техники, причем интерпретация полученных результатов под силу только квалифицированному специалисту в области химии и технологии пластических масс.

4.1. Упрощенная оценка

Эта стадия идентификации состоит из действий, перечисленных ниже в пунктах А, Б и В.

А. Идентификацию начинают с установления, является ли оцениваемый ПМ термопластом или относится к термореактивным материалам (реактопластам).

В литературных источниках [20, 31, 32] для этой цели предлагается использовать паяльник, горячую палочку или нагретую спицу. Суть испытания состоит в оценке реакции ПМ на контактное воздействие горячего предмета, температура которого должна быть не менее 250 °С. Отметим, что далеко не в каждой лаборатории, даже цеховой, имеется паяльник; горячую, нагретую до ~300 °С палочку или спицу совсем не просто удержать в требуемом положении да еще и давить на нее и уж тем более «протыкать» ею образец [32], причем металлическая спица будет быстро остывать, что потребует периодического подогрева, сопровождаемого обгоранием налипшего на нее полимера. Поэтому, как показывает практика, данное испытание чаще всего проводят, используя пламя газовой горелки или зажигалки.

Термопласт при нагреве поверхности размягчается и загорается. Реактопласт — обугливается без размягчения, может с трудом загореться.

Б. Оценивают плотность испытываемого ПМ. Как правило, используют метод погружения образца в жидкость с известной плотностью по принципу «плавает или утонет».

Начинают с воды. Все полимерные материалы с плотностью $\rho < 1 \text{ г/см}^3$ будут, естественно, плавать. Это, прежде всего, такие термопласты, как ПЭНП, ПЭВП, ПП, СЭП, СЭВА и некоторые другие*. Остальные термопласты с $\rho > 1 \text{ г/см}^3$ утонут. Заметим, что интервал плотностей тонущих в воде термопластов составляет от $1,071 \text{ г/см}^3$ — для ПС до $2,301 \text{ г/см}^3$ — для ПТФЭ марки Ф-4. В [31] рекомендуется в качестве жидкости с большей, чем у воды, плотностью использовать раствор тиосульфата натрия (70 г ТСН на 60 мл воды) с плотностью $\rho = 1,11 \text{ г/см}^3$. В этом случае будут плавать образцы ПС, САН, АБС-пластика и ПА. Для дальнейшего испытания можно использовать 25%-ный раствор NaCl (поваренная соль) в воде. Плотность такого раствора составляет $1,21 \text{ г/см}^3$.

Более универсальным и несложным в использовании является гидростатический метод, позволяющий определять плотность любых ПМ с $\rho > 1 \text{ г/см}^3$ — наполненных, армированных, усиленных и пр. [37, с. 88]. Основными элементами метода являются рычажные весы и стакан (рис. 4.1).

Образец ПМ взвешивают с точностью до $0,002 \text{ г}$, погружают в спирт или петролейный эфир (то есть в жидкость, в которой полимер не растворяется и не набухает) для удаления с поверхности таблетки пузырьков воздуха и затем вытирают фильтровальной бумагой. После этого образец подвешивают на очень тонкой проволоке к крючку над чашкой весов и подставляют стакан с жидкостью, в которой проводят определение (образец не должен в ней растворяться и набухать в процессе измерения). Стакан ставят на специальную подставку, которая не должна касаться чашки весов. Образец с проволокой погружают в воду при 20°C и взвешивают. Затем взвешивают проволоку без образца при том же уровне погружения.

Плотность полимера ρ (в г/см^3) вычисляют по формуле

$$\rho = g\rho_0/[g - (b_1 - b_2)]$$

* Значения плотностей ПМ приводятся в типовых таблицах их свойств и в настоящей главе не повторяются.

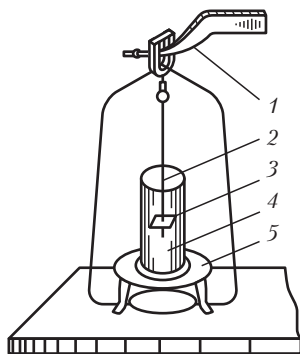


Рис. 4.1. Прибор для определения плотности гидростатическим методом:
1 — весы; 2 — проволока; 3 — образец ПМ; 4 — стакан; 5 — подставка

где g — вес таблетки полимера на воздухе, г; b_1 — вес таблетки и проволоки в воде, г; b_2 — вес проволоки в воде, г; ρ_0 — плотность воды или другой жидкости при 20 °С, (для воды $\rho_0 = 0,9983$), г/см³.

В. Испытание на горение. Его суть состоит в следующем. Образец вводят в бесцветную область пламени газовой горелки Бунзена или зажигалки и наблюдают за нижеследующим:

- горит ли ПМ;
- каков цвет пламени;
- каков запах горящего ПМ;
- как происходит горение (быстро или медленно, с образованием капель, растрескиванием, цвет образующегося дыма);
- продолжает ли гореть ПМ после удаления образца из источника пламени.

Испытания ПМ на горение следует выполнять, соблюдая правила безопасности. Во избежание отравлений, ожогов или иных повреждений все испытания необходимо проводить либо в вытяжных шкафах, либо в подготовленной для этих действий, хорошо вентилируемой и не загроможденной части помещения и с использованием средств индивидуальной защиты (перчатки, защитные очки, халаты и пр.).

Выполнение анализа. Образец полимера массой до 1 г, как правило, 0,1–0,3 г, на стеклянной лопаточке или закрепленный на конце отрезка медной проволоки, вносят в пламя горелки (синий конус) и отмечают особенности процесса пиролиза.

Основные идентификационные характеристики горения различных ПМ представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Идентификационные характеристики горения полимеров

Вид полимера	Поведение в пламени горелки			Другие характеристики	
	Цвет пламени	Запах при горении	Темп горения	Характер горения	
ПЭНП	Голубой с желтой верхушкой	Горящего парафина (потушенной свечи)	Быстро	Плавится, образует капли	Легко воспламеняется, горит почти без копоти и после удаления из пламени
ПЭВП	Голубой с желтой верхушкой	Резкий, напоминающий дизельное топливо	Медленно	Плавится, образует капли, нити	Легко воспламеняется, горит и после удаления из пламени, без сажи и почти без копоти
СЭВА	Желтый	Уксусной кислоты и горящего парафина	Медленно	Плавится, капает, немного коптит	Горит и после удаления из пламени
ПС, УПС	Оранжевый, желтый	Сладковатый, цветочный, светильного газа	Быстро	Плавится, капает, коптит с дымом	Легко воспламеняется, вспыхивает при поджигании. Горит и вне горелки, образует много сажи. Образует много копоти. Горит и после удаления из пламени
САН	Оранжево-желтый	Сладковатый запах стирола	Быстро	Легко плавится	Много копоти, вспыхивает при поджигании, горит легко и вне пламени
АБС-пластик	Голубой с желтыми краями, оранжево-желтый	Резкий, горящей резины и стирола	Быстро	Плавится, горит с образованием копоти	Воспламеняется с трудом, вне горелки самопроизвольно затухает. Образует белый дым
ПВХ-жесткий	Зеленоватое, по кромке желтое, зеленое	Резкий (хлороводорода)	Медленно	С копотью, с выделением сажи, без копоти	Образует белый дым
ПВХ-мягкий	Зеленое с голубой верхушкой	Очень резкий (хлороводорода)	Медленно	Горит, но вне горелки гаснет	Загорается с трудом
ХПЭ ПХП	Зеленое с голубой верхушкой	Очень резкий с примесью паленой резины	Очень медленно	Горит, но вне горелки гаснет	Образует белый дым
ПММА	Синее с белой верхушкой	Сильный цветочно-плодовый	Быстро	Горит легко и вне горелки	Немного коптит, воспламеняется легко

ПФА	Синеватое, голубое	Резкий, формальдегида	Медленно	Горит без дыма	Затухает вне горелки
ПЭТФ (Лавсан)	Желтое, светящееся	Сладковатый	Быстро	Горит почти без дыма	Горит с искрами, слегка коптит, образует капли в виде черных пластинок
ПБТФ	Желто-оранжевое, светящееся	Сладковатый, ароматический, фруктовый	Медленно	Горит с образованием капель	Воспламеняется с трудом, горит и вне горелки
ПК	Оранжевое или желтое, неспокойное	Запах фенола	Медленно	Горит с образованием черного дыма	Воспламеняется с трудом, постепенно самозатухает с образованием пузырей
ПА	Голубое с желтой каймой	Горелой шерсти, жженого рога	Медленно	Горит, белый дым, без сажи, может пузыриться	При горении может вспениваться, течет нитью
ПСФ	Оранжевый	Запах серы	Быстро	Горит с образованием черного дыма	—
ПФО	Желтовато-оранжевый	Запах фенола	Медленно	Трудно загорается, дымит	—
ПФС	Желтый, оранжевый	Слабый запах сероводорода	Медленно	—	—
ПТФЭ, Ф-4	Желтое	Резкий (фтороводорода)	Медленно	Горит без копоти	При удалении из пламени горелки
ПУ	Синеватое, с желтыми краями, светящееся	Острый	Быстро	Горит, легкий дым, течет по каплям	гаснет, ядовит. Легко загорается, весьма ядовит, опасен для здоровья
ФФС	Желтый	Фенола (карболки)	Медленно	Горит только в пламени горелки	При горении вздувается, трескается, постепенно гаснет
МФС	Желтоватое	Аммиак и формальдегид	Очень медленно	Горит за счет наполнителя	Разбухает и растрескивается, обугливается
ЭС	Желтый	Острый запах амина, жженой кости	Медленно	Горит вне пламени горелки	Коптит, постепенно затухает

Упрощенная идентификация позволяет получить лишь самые общие, ориентировочные данные. Достаточно сравнить сведения по цветам пламени горящих ПМ, чтобы убедиться в сказанном. То же самое относится и к запахам горения, которые сами по себе субъективны. Приведенные обстоятельства являются следствием сложности состава промышленных полимеров, включающих такие компоненты, как пластификаторы, стабилизаторы, разнообразные ингибиторы (антифоги, антирады, антипирены, антистатик и т. д.). Кроме того, в отдельных случаях в состав ПМ вводят так называемые «отдушки», существенно изменяющие запах материала.

Вероятность ошибок упрощенной идентификации вполне очевидна. Отсюда следует необходимость продолжения действий по идентификации ПМ, но уже с привлечением объективных аппаратных методов.

4.2. Уточненная идентификация

Современные ПМ являются сложными многофакторными объектами. Их полимерная компонента может быть представлена не только гомополимерами, но и двойными и тройными сополимерами, смешанными составами, может быть подвергнута модификации, изменяющей доминантные идентификационные признаки высокомолекулярного органического вещества. Наличие, как упомянуто выше, в составе ПМ добавок различного назначения еще больше осложняет задачу исследователя, тем более что нередко количество идентифицируемого продукта исчисляется в лучшем случае граммами. В связи с изложенным, уточненная идентификация ПМ требует современного прецизионного оборудования, высокой квалификации и опыта исследователя. В табл. 4.2 приведен список основных методов, применяемых для аппаратной идентификации ПМ.

В условиях решения практических задач наиболее часто используются ИК-Фурье-спектроскопия, дериватография, термосканирование и термомеханический анализ. Возможно использование капиллярной вискозиметрии.

4.2.1. Фурье-инфракрасная спектроскопия

Этот вид спектроскопии отличается от традиционной инфракрасной разновидности тем, что получаемая прибором интерферограмма преобразуется в ИК-спектр не напрямую, а через уравнение Фурье по

Таблица 4.2. Основные аппаратурные методы идентификации полимеров

Метод	Применение
Фурье-инфракрасная спектроскопия	Тип полимера, добавки
Дериватография (термогравиметрия)	Температуры отверждения, плавления, деструкции Содержание твердых неорганических наполнителей
Термосканирование	Температура и процесс плавления и деструкции
Дифференциальная сканирующая калориметрия	Процессы плавления, кристаллизации, степень кристалличности, наличие разнообразных добавок
Рентгеноструктурный анализ	Состав ПМ
Термомеханический анализ	Термо- или реактопласт, температуры размягчения, стеклования, высокоэластичности, параметры сетчатой структуры. Оценка плавления
Ядерный магнитный резонанс	Идентификация органических макромолекул и определение их структуры
Хроматография	Идентификация веществ
Масс-спектроскопия	Детальная идентификация строения полимера
Микроскопия — оптическая, электронная, сканирующая, атомно-силовая	Прямые сведения о морфологии поверхности образцов, надмолекулярных образований, их разновидностях и распределении

косинусам, что резко расширяет возможности метода, позволяет отказаться от длительной операции подготовки образцов, расширить круг объектов исследования, многократно упрощает операцию снятия ИК-спектра. Как отмечено в [31], современные ИК-Фурье спектрометры комплектуются приставками под набор задач потребителя.

Благодаря отмеченным достоинствам ИК-Фурье спектрометры вытесняют из исследовательской практики все остальные разновидности подобных приборов и широко используются в решении как научных, так и технологических задач.

Принципиально ИК-спектроскопия позволяет оценить способность объектов, совершающих колебательные движения, поглощать воздействующую на них энергию ИК-облучения. Эффект поглощения объекта, совершающего колебательное движение, наступает в условиях

резонанса, когда собственная частота объекта совпадает с внешней. Поскольку каждый из фрагментов вещества, а в нашем случае полимера, а точнее его макромолекул, от атомов до звеньев макромолекул, отражающих их химическое строение, характеризуется своей собственной частотой колебаний, то есть своей поглощающей способностью, то, фиксируя эту характеристику, можно определить, из каких кинетических единиц состоит исследуемое вещество и, следовательно, идентифицировать его. Некоторые полосы ИК-поглощения изменяются в зависимости от конформации цепи, поэтому ИК-спектроскопия позволяет определить степень кристалличности, отдельно определить наличие аморфной и кристаллической частей в аморфно-кристаллическом полимере [33]. Для характеристик положения полос поглощения в ИК-спектре используют либо длину волны (размерность мкм), либо так называемое волновое число (размерность см⁻¹). Между этими параметрами существует простое соотношение

$$[\text{см}^{-1}] = 10^4 [\text{мкм}^{-1}].$$

Спектр поглощения каждого вещества абсолютно индивидуален.

При интерпретации колебательных спектров полимеров и полимерных материалов устанавливается набор индивидуальных частот поглощения, по которым получают представление о составе и строении исследуемого объекта. В приложении 10 приведен перечень основных характеристических частот для большинства промышленных полимеров, а в приложении 11 — типовые спектры поглощения наиболее применяемых полимеров, которые можно использовать для целей идентификации путем сопоставления. Они построены для так называемой средней ИК-области (длина волны 2,5–25 мкм, волновое число 4000–400 см⁻¹) в координатах «волновое число (см⁻¹) – поглощение (%)»*.

4.2.2. Дериватография (термогравиметрия)

Метод дериватографии заключается в измерении потерь массы образцом ПМ в зависимости от величины и (или) скорости изменения температуры.

Для регистрации изменения массы используют высокочувствительные приборы, называемые дериватографами, главными элементами которых являются прецизионные весы с точностью измерения 0,01 мг

* ИК-Фурье спектры выполнены и представлены О.Г. Ясногородской, которой автор выражает глубокую признательность.

и высокоточное нагревательное устройство с программным регулятором температуры.

Термогравиметрию полимеров можно проводить в статическом режиме при заданной постоянной температуре и в режиме динамическом, когда температура изменяется с заданной скоростью.

Статический метод применяют, как правило, для оценки химических превращений в полимере во времени. Динамический метод используют значительно чаще, поскольку он позволяет оценить как структурные, так и химические изменения в полимере (переход из одного физического или фазового состояния в другое, деполимеризация, окисление), так и определить температуру начала и темп развития процессов деструкции.

Термогравиметрический анализ состоит, таким образом, в непрерывном фиксировании изменения массы нагреваемого образца TG (кривая потери массы) и состояния его теплосодержания, кривая DTA (рис. 4.2).

При оценке термостойкости сравнивают температуры начала потери массы (T_0), потери массы в количестве 5% (T_5); 10% (T_{10}); 20% (T_{20}); 50% (T_{50}). При сопоставлении сведений по термостойкости пластмасс необходимо обязательно учитывать значение потери массы, при котором выполнено то или иное определение данного параметра.

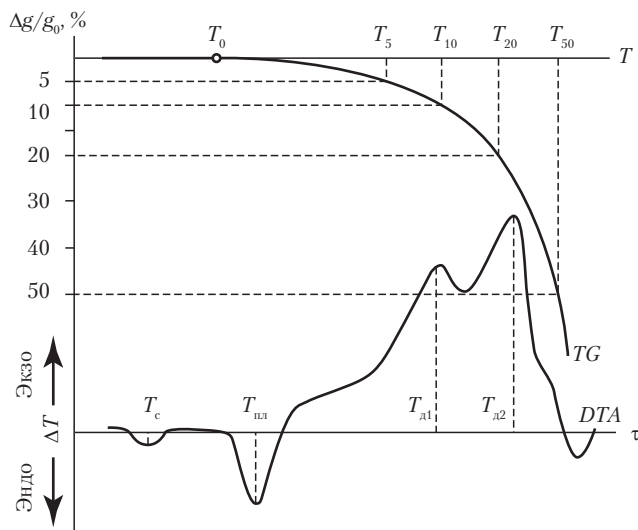


Рис. 4.2. Термогравиметрические кривые полимера

Кривая TG может использоваться для оценки кинетических параметров процесса деструкции полимера, например, по методу Фримена и Керолла [38].

Кривая DTA позволяет выявить структурно-химические особенности процесса нагревания полимерного материала, характеризующиеся эндо- или экзоэффектами. Эндоэффекты сопровождают физические процессы, связанные с поглощением энергии — стеклование, плавление, изменение кристаллической структуры. Экзоэффекты свидетельствуют о выделении энергии, происходящем при химических реакциях отверждения, окисления, деструкции макроцепей и их боковых фрагментов. Так, по кривой DTA , приведенной на рис. 4.2, можно установить, что в исследуемом полимере содержится аморфная фаза, переходящая из стеклообразного в высокоэластическое состояние при температуре T_c . При дальнейшем нагревании до температуры $T_{пл}$ полимер расплавляется, после чего в нем начинаются активные экзопроцессы, свидетельствующие о процессах окисления и термодеструкции. И что характерно, активность этих процессов (пики $T_{тл1}$ и $T_{тл2}$) совпадает с началом интенсивной потери массы (более 10%). Наличие нескольких пиков термодеструкции свидетельствует о степени сложности структурно-химической организации полимерного материала.

Таким образом, термогравиметрический анализ позволяет решать комплекс практических задач. К ним, прежде всего, относится задача идентификации ПМ, а также установление предельной температуры переработки пластмассы в изделия из расплава, оценка термостабильности расплава полимера, когда в нем не происходят химические изменения, выбор добавок для регулирования свойств полимера по их поведению при нагревании (добавки не должны претерпеть изменений при плавлении полимера).

4.2.3. Термосканирование

Метод предназначен для определения температуры и оценки фазовых переходов и других процессов, связанных с поглощением или выделением тепла. Теплосодержание вещества, отражаемое изменением температуры, регистрируемым прецизионными термopарами, размещенными в исследуемом образце и в эталоне из оксида алюминия, позволяет выполнить идентификацию ПМ: по температуре плавления, температуре стеклования, по наличию полиморфных переходов, по характеру проявления процесса плавления. Из перечисленных пара-

метров наиболее доказательным является температура плавления, поскольку:

- 1) у каждого гомополимера, гомосополимера, олигомера и сополимера свои индивидуальные температуры плавления;
- 2) введение добавок (кроме пластификаторов) в содержаниях до 2%, дисперсного наполнителя в содержании до 10–15% влияет на значение температуры плавления в узком ее интервале;
- 3) введение пластификаторов всегда существенно понижает температуру плавления: именно этот параметр является надежным идентификационным признаком при термосканировании.

Термограммы, приведенные на рис. 4.3, свидетельствуют о возможности уверенной идентификации различных полиолефинов, независимо от других уже установленных признаков или в их поддержку.

Характер теплового эндопика может отражать и молекулярную полидисперсность полимера. Чем шире молекулярно-массовое распределение полимера, тем более «размытым» выглядит эндопик плавления на термограмме (рис. 4.4) при совпадающем отсчетном значении температуры плавления.

4.2.4. Термомеханика [15]

Термомеханический анализ требует приготовления специальных образцов и, следовательно, такого количества идентифицируемого материала, которое иногда бывает сложно обеспечить, особенно если в распоряжении исследователя имеются лишь небольшие по массе и сложные по конфигурации детали. Однако во всех других случаях термомеханика позволяет получить надежные идентификационные сведения.

По ТМК устанавливают следующие идентификационные признаки: аморфность или кристалличность полимера; при наличии образцовой ТМК устанавливают присутствие пластификаторов и наполнителей, определяют характеристические температуры, оценивают различия между собой разных партий пластмасс одного вида или марки.

Корректно построенные ТМК — это графические изображения функции деформации пластмассового образца от температуры (аргумент) в условиях постоянного по величине и виду напряжения [39]. В этом случае ТМК отвечает требованиям формальной логики. Одновременно это означает, что при снятии ТМК должны соблюдаться ряд обязательных условий, а именно:

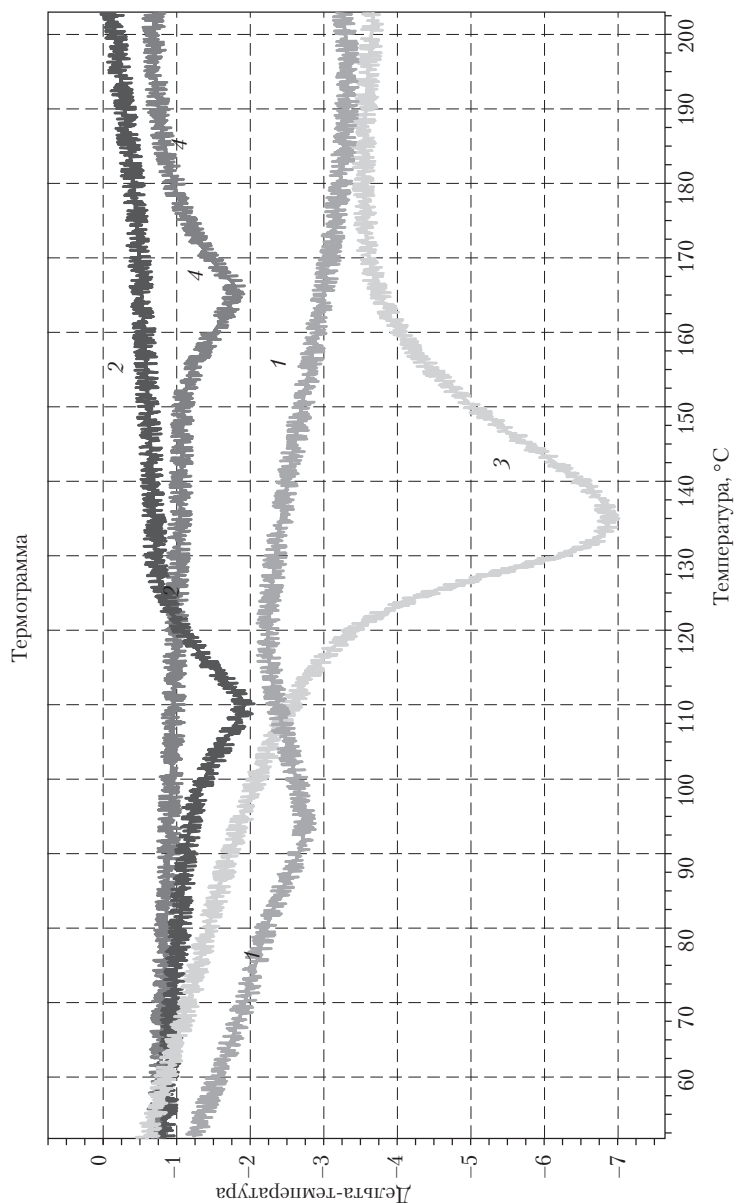


Рис. 4.3. Термограмма термопластов полиолефинового ряда:
1 — СЭВА (93 °C); 2 — ПЭВП (109 °C); 3 — ПЭВП (135 °C); 4 — ПП (165 °C)

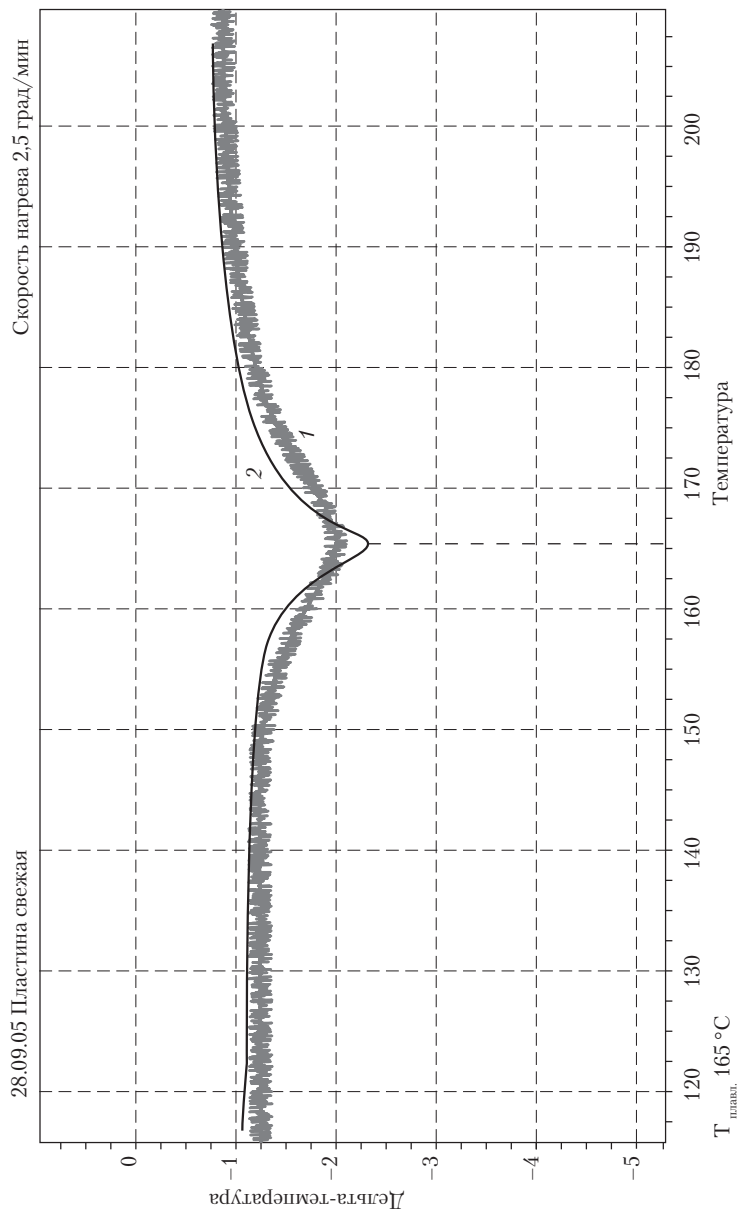


Рис. 4.4. Термограмма ПП с широкой (1) и более узкой (2) полидисперсностью

- а) неизменность химического и физического строения полимера;
- б) неизменность состава и морфологии композита;
- в) завершенность релаксационных процессов (отсюда нормированная скорость подъема температуры);
- г) постоянство вида и значения напряжения по всему объему образца.

Отметим, что при идентификационных действиях исследователь имеет дело с уже созданным ПМ, что означает соблюдение требований «а» и «б», а остальные условия должны соблюдаться прибором. Причем чаще других реализуются испытания в условиях одноосного сжатия, поскольку аппаратурно он наиболее простой.

Для оценки термомеханических свойств пластмасс при сжатии можно использовать консистометр Хеплера, твердомер с термокамерой и измененным узлом приложения нагрузки к образцу, несложные рычажные нагружающие устройства в комбинации с термокамерой. Деформация может замеряться упрощенно — индикатором часового типа или более сложным способом с применением индукционных датчиков.

Исторически метод термомеханического анализа был предложен теоретически и экспериментально обоснован Каргиным В.А. и Слонимским Г.Л. Ими были впервые получены и прокомментированы ТМК аморфных и кристаллических термопластов, проанализировано влияние ММ полимера, пластификатора, наполнителей и др. Эти сведения в той или иной интерпретации можно найти в учебниках и учебных пособиях по курсу «Физическая химия полимеров». Мы остановимся лишь на некоторых данных, имеющих отношение к идентификации, которые можно получить в результате термомеханического анализа.

Итак, образец, в виде цилиндра диаметром d и высотой $h = (1 \div 1,5) d$ или призмы с плоскопараллельными торцами, установлен в измерительном узле прибора (рис. 4.5), и нагружен усилием, создающим напряжение сжатия $\sigma = \text{const}$. Нагреватели прибора поднимают в измерительном узле температуру с заданной скоростью. Наблюдение за развитием деформации позволяет получить ТМК полимерного материала.

4.2.4.1. Кристаллические термопласты

Представим, как будет выглядеть ТМК вещества H_2O . Поместим мысленно в термокриокамеру прибора образец замороженной воды требуемой геометрической формы и нагрузим его определенным усилием сжатия. При температуре ниже 0°C , то есть в криогенных условиях,

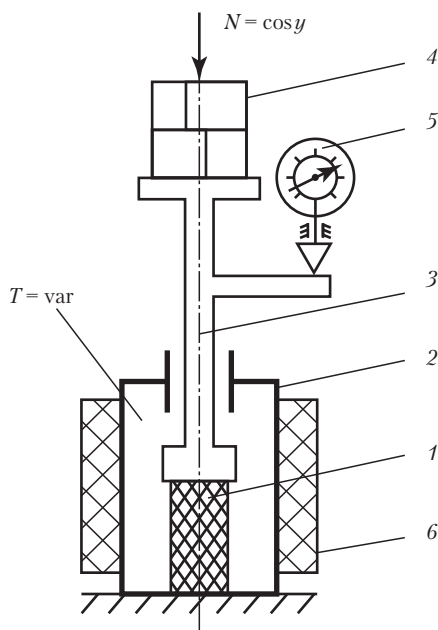


Рис. 4.5. Схема прибора для термомеханических испытаний:
 1 — образец ПМ; 2 — корпус; 3 — нагружающее устройство; 4 — груз;
 5 — индикатор для измерения деформации; 6 — нагреватель

вода, как известно, находится в кристаллическом состоянии в виде льда. При повышении температуры это состояние сохраняется до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, по достижении которого начинается интенсивное изменение размеров образца, вызванное его плавлением.

При $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ деформация образца льда развивается, как справедливо отметил Цельсий, без изменения температуры. Таким образом, ТМК полностью кристаллического мономера, воды, имеет вид вертикальной прямой, исходящей из нуля технической температурной шкалы (рис. 4.6, кривая 1). Заметим, однако, что прецизионные исследования свойств воды показали наличие в ней на атомном уровне структурных ассоциатов (димеры, тримеры, тетрамеры), в связи с чем ее «температура плавления» уже не является абстрактной точкой, а представляет собой некий, хотя и очень узкий, но тем не менее интервал на температурной шкале.

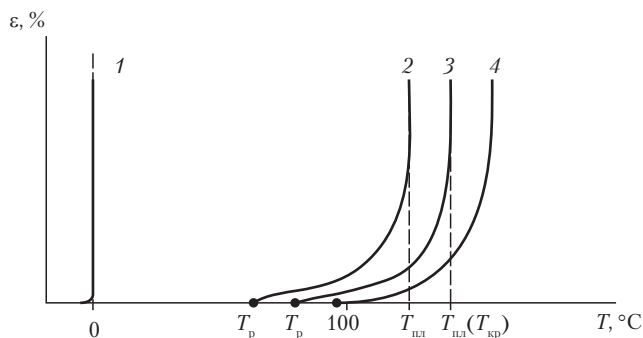


Рис. 4.6. ТМК кристаллических веществ:
1 — H₂O; 2 — ПЭНП; 3 — ПЭВП; 4 — ПП

Для веществ с цепным строением макромолекул температурный интервал перехода из кристаллического состояния в аморфное имеет значительную ширину (десятки градусов). Сегментальная подвижность начинается при температуре размягчения (T_p , рис. 4.6, кривые 2, 3) и завершается переходом в вязкотекучее полностью аморфное состояние при температуре плавления ($T_{пл}$). Если процесс вести в обратном направлении, охлаждая расплав, то при $T_{пл}$ начнется процесс кристаллизации. Поэтому $T_{пл}$ адекватна температуре кристаллизации $T_{кр}$.

Химическое строение молекул определяет значение температур размягчения и плавления, скорость перехода из кристаллического состояния в аморфное. Полиэтилен высокой плотности размягчается под нагрузкой при 70–75 °C и расплавляется при 130–136 °C. ПЭНП, имеющий меньшую степень кристалличности, размягчается при 65 °C и расплавляется при 105–110 °C (рис. 4.6, кривые 2, 3). Таким образом, для ПЭНП интервал $\Delta T = T_{пл} - T_p$ составляет 40–45 °C, а для полимера того же химического строения, но с более развитой надмолекулярной организацией $T_{пл} - T_p$ равно 60–65 °C.

Изменение химического строения полиолефина заменой одного из атомов водорода повторяющегося звена группой CH_3 (полипропилен) приводит к возрастанию T_p и $T_{пл}$ (рис. 4.6, кривая 4). Также отметим, что, например, у гетероцепного термопласта полиамида размягчение под нагрузкой происходит при 65–70 °C, а полное расплавление — при 230 °C, то есть значение ΔT достигает 165 °C. Есть все основания считать, что на величину ΔT оказывают также влияние ММ и ММР.

4.2.4.2. Аморфные термопласты

По характеру термомеханических кривых термопласты аморфные существенно отличаются от кристаллических. Эти отличия являются идентификационными признаками. Проанализируем появление этих признаков, используя уже приведенные ранее в главе 1 ТМК (рис. 1.15). На ТМК аморфных термопластов наблюдается область высокоэластического состояния в виде так называемого «плато» (рис. 4.7, в-с). Попутно заметим, что экспериментально выявление «плато» не столь простое дело, поскольку модуль высокоэластичности ($E_{вз}$) по крайней мере в 100 раз меньше модуля упругости полимера в твердом состоянии. Если не учитывать эту особенность и проводить испытания при нагрузках, вычисленных по свойствам твердого полимера, то переход его в высокоэластику можно просто не заметить. Если же начальную нагрузку определять по $E_{вз}$, то развивающиеся в функции температуры деформации сжатия окажутся по модулю меньше изменения размеров образца в результате теплового расширения, и ход кривой ТМК в этом случае примет аномальный характер.

Итак, на ТМК аморфных термопластов выделяются следующие критические температуры: температура размягчения T_p , при которой в процессе испытания начинается деформация, температура перехода в высокоэластическое состояние $T_{вз}$, температура начала плавления $T_{нпл}$ и температура плавления $T_{пл}$. Химическое и физическое строение термопласта определяет значение интервалов $\Delta T_2 = T_{вз} - T_p$ и $\Delta T_3 = T_{пл} - T_{нпл}$. По смыслу ΔT_3 близко к ΔT_1 , наблюдаемого у кристаллических полимеров. С интервалом ΔT_2 дело обстоит сложнее, поскольку в этом промежутке находится значение температуры, принимаемое в качестве критериального. Это температура стеклования T_g .

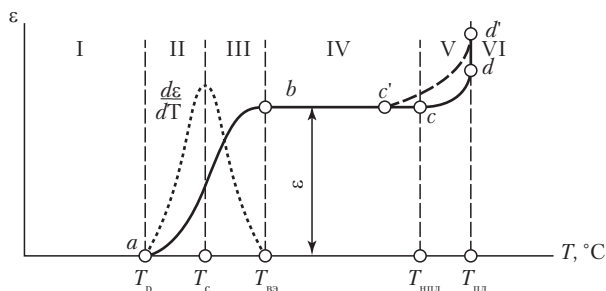


Рис. 4.7. ТМК аморфного термопласта

Определение T_c , разделяющей области стеклообразного и высокоэластического состояния до сих пор является дискуссионным. По Каргину и Слонимскому T_c является величиной условной, отделяемой от температуры размягчения неким температурным интервалом, при котором изменение деформации достигает условного малого значения [18, т. 1, с. 53]. Принятая «условность» существенно усложняет определение T_c . По Александрову и Лазуркину на кривой (участок ab) наличествует некий прямолинейный участок, экстраполяция которого до пересечения с осью температуры и даст значение T_c [18, т. 1, с. 54]. Таким образом, предполагается, что в каком-то температурном интервале деформация при $\sigma = \text{const}$ развивается по линейному, а не степенному закону. Определенную курьезность данному соображению придает то обстоятельство, что его авторы во всех остальных вариантах оценки деформационного поведения полимеров отстаивают его сложный полифункциональный релаксационный характер, описываемый экспоненциальными уравнениями, соответствующими многочленным феноменологическим моделям.

Наш немалый опыт свидетельствует, что при деформационном переходе от твердого к высокоэластическому состоянию участка пропорциональности $\epsilon - T$ нет. Возможно, формальной причиной отмеченной ошибки является наличие на линии ab фрагмента сопряжения криволинейных участков с разным знаком кривизны, который особенно при мелком масштабе отображения температуры по абсциссе приобретает кажущуюся линейность.

Таким образом, широко используемые в настоящее время приемы определения T_c по термомеханическим кривым вряд ли можно считать безоговорочно научно обоснованными.

Параметром, позволяющим установить величину T_c , является скорость развития деформации на участке ab . Учитывая линейный характер изменения температуры во времени (τ) можно считать, что $d\epsilon/dT = d\epsilon/d\tau$. Тогда продифференцировав кривую ab , получим графическую зависимость скорости деформации [15, 40] (рис. 4.7, пунктирная линия):

$$\gamma = d\epsilon/d\tau = d\epsilon/dT. \quad (4.1)$$

Температура, при которой $\gamma = \text{max}$, является температурой, отделяющей область преимущественно стеклообразного состояния от области преимущественно высокоэластического состояния. Эта температура приобретает конкретное физическое содержание и может обоснованно считаться температурой стеклования (T_c) полимера.

Заметим, что при тщательной подготовке образца, соблюдении требований, указанных выше в пунктах *a–г* (с. 142), экспериментатор получает надежные и воспроизводимые значения этой концептуальной характеристики.

Таким образом, по термомеханической кривой можно выделить следующие физические состояния аморфного материала:

- стеклообразное — при $T < T_p$ (участок I);
- преимущественно стеклообразное — при $T_p < T < T_c$ (участок II);
- преимущественно высокоэластическое — при $T_{вэ} > T > T_c$ (участок III);
- высокоэластическое — при $T_{вэ} < T < T_{н.пл}$ (участок IV);
- эластопластическое — при $4_{н.пл} < T < T_{пл}$ (участок V);
- пластическое (состояние расплава) — при $T_{н.пл} > T > T_{пл}$ (участок VI).

Такое подробное членение ТМК позволяет решать ряд идентификационных и практических вопросов. Температура размягчения определяет предельную температуру, при которой полимерное изделие, нагруженное напряжением σ , сохранит жесткость и геометрическую форму. Кроме того, по величине T_p назначают температуру оснастки при получении изделий из расплава и температуру самого изделия, при которой его извлечение из оснастки не будет сопровождаться появлением геометрических дефектов. Отметим, что это рассуждение справедливо и для кристаллических термопластов.

По значениям $T_{вэ}$ и $T_{н.пл}$ определяют температуру нагрева заготовки при получении изделий методом формования, а значение ε позволяет оценить допустимую степень вытяжки заготовки.

Величина интервала $\Delta T_3 = T_{пл} - T_{н.пл}$ дает информацию для выбора длительности выдерживания полимера при $T_{пл}$ для исключения так называемых «непроплавов» (геликов).

4.2.4.3. Аморфные густосетчатые полимеры

Напомним, что это термореактивные полимеры, получаемые отверждением реакционноспособных олигомеров. Химическая реакция отверждения приводит к образованию в полимере пространственной сетки, состоящей из сравнительно низкомолекулярных цепей, соединенных узлами (отвердители), функциональность которых не менее 3.

ТМК таких реактопластов (рис. 4.8) отличаются некоторыми особенностями. Главная из них — отсутствие традиционного «плато» по-

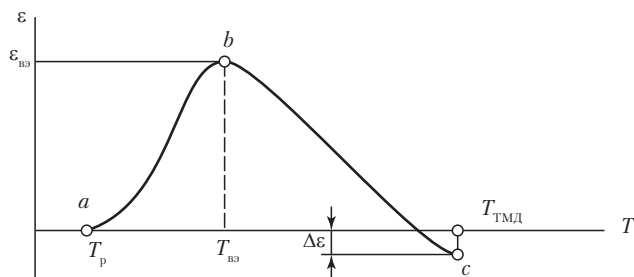


Рис. 4.8. ТМК густосетчатого полимера

сле перехода в высокоэластическое состояние ($T > T_{вз}$) и завершение термомеханической кривой не плавлением, как в случае термопластов, а разрушением в результате термомеханической деструкции ($T_{ТМД}$).

Несколько непривычным на ТМК реактопластов является положение участка bc . С одной стороны, его прямолинейность свидетельствует о физическом сходстве с «плато» ТМК аморфных термопластов. С другой стороны, непараллельность абсциссе нуждается в объяснении.

В соответствии с кинетической теорией высокоэластичности при $T > T_{вз}$ сетчатые полимеры приобретают свойство несжимаемых жидкостей, являющихся продуктами конденсации газов. Фрагменты цепей пространственной сетки находятся в колебательном движении, которое можно считать адекватным колебательным движением атомов в сконденсированных газах. Частота межмолекулярных взаимодействий цепей определяет упругость колебательной системы. С увеличением температуры растет частота актов межмолекулярного взаимодействия и, соответственно, возрастает упругость системы, выражаемая модулем высокоэластичности. То есть если при нагревании стеклообразного полимера его модуль упругости уменьшается, то при переходе полимера в высокоэластическое состояние наблюдается обратное явление. С ростом температуры жесткость высокоэластичного сетчатого полимера пропорционально растет.

На термомеханических кривых это выражается в инверсии деформации при $T > T_{вз}$. Ранее сжатый или растянутый образец как бы восстанавливает исходный размер. Графически это проявляется в том, что линия «плато» (участок bc) оказывается расположенной под углом

$\pi/4$ рад. Положение точки с относительно оси деформации ε может быть и ниже нулевого значения (на графике рис. 4.8 это значение $\Delta\varepsilon$). По модулю $\Delta\varepsilon$ может и превышать деформацию сжатия образца, вызванную усилием, приложенным к нему при подготовке эксперимента.

Поскольку частота межмолекулярных взаимодействий зависит не только от температуры, но и от кинетических возможностей цепей, то есть их молекулярной массы, то оказывается возможным *в первом приближении* численно оценить важнейший топологический параметр пространственной сетки — молекулярную массу межузлового фрагмента цепи (M_c). По формуле Уолла [33]

$$M_c = 3\rho RT/E_{вз}, \quad (4.2)$$

где ρ — плотность полимера, т/м³; T — температура, К; R — газовая постоянная, кДж/(моль·К); $E_{вз}$ — модуль высокоэластичности, Па.

$$E_{вз} = \sigma/\varepsilon_{вз}, \text{ Па}, \quad (4.3)$$

где $\sigma = N/S$, Па. (N — усилие, приложенное к образцу, Н; S — площадь сечения образца, м²).

Заметим, что значения T и $\varepsilon_{вз}$ берутся по положению точки b , определяющей завершение перехода образца из стеклообразного в полностью высокоэластичное состояние.

Собственно уравнение (4.2) формально подтверждает высказанные выше пояснения к высокоэластичному состоянию отвержденных олигомеров. Действительно, если мы испытываем образец реактопласта, в котором завершён процесс формирования необратимой пространственной сетки, то значение M_c должно быть величиной постоянной. А это значит, что изменение температуры T должно сопровождаться адекватным изменением значения $\varepsilon_{вз}$. Если увеличивается температура, то должна возрасти и жесткость материала в высокоэластике, то есть значение ε должно уменьшаться. Оно и уменьшается, если правильно выбрана нагрузка на образец.

Ориентировочное значение усилия, сжимающего образец (сила N), определяем по возможному значению модуля высокоэластичности, которое, как отмечалось ранее, примерно на два порядка меньше модуля упругости застеклованного полимера (E). Тогда

$$N = \sigma S = E_{вз} \varepsilon_{вз} S = 0,01 E_{вз} S, \text{ Н}, \quad (4.4)$$

где $\varepsilon_{вз}$ — высокоэластическая деформация (относительная). Ее допустимое значение для реактопластов составляет $\varepsilon_{вз} = 0,05\text{--}0,1$.

Значение N можно также определить по величине твердости по Бринеллю

$$N = (0,01 - 0,005)HB \cdot S, \text{ Н.} \quad (4.5)$$

Если значение силы N превышает номинальное, то ТМК на участке bc может принять некорректное положение, делающее неприменимым уравнение (4.2).

В свете новых экспериментальных результатов и уточненных представлений о роли отвердителей в структурообразовании сетчатых полимеров значение M_c в формуле Уолла приобретает смысл показателя, отражающего обобщенную кинетическую способность пространственной сетки, обозначаемую соответствующим коэффициентом K_c :

$$K_c = 3D\rho RT/E_{\text{вз}}, \quad (4.6)$$

где D — константа, равная отношению молекулярных масс химически активных карбо- или гетероцепных фрагментов олигомера к отвердителю, $D > 1$.

Значение температуры термомеханической деструкции ($T_{\text{тмд}}$) зависит от величины механического напряжения, приложенного к образцу. Поскольку оно снижает, в соответствии с термофлуктуационной теорией, активационный барьер разрыва макроцепей, то с ростом N значение $T_{\text{тмд}}$ понижается.

Если величина приложенного к образцу усилия невелика, то в начальной стадии испытания, когда полимерный материал находится в стеклообразном состоянии, его тепловое расширение может не только компенсировать, но и превысить исходную деформацию сжатия. При этом ТМК сдвигается относительно абсциссы (рис. 4.9). Значение T_p определяется по положению точки a , в которой изменяется вид деформации (расширение изменяется на сжатие).

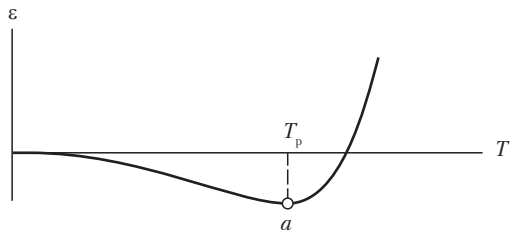


Рис. 4.9. Влияние теплового расширения на ход ТМК густосетчатого полимера

4.2.4.4. Дисперсно-наполненные реактопласты

По морфологическим признакам наполнители, как известно, подразделяются на дисперсные и волокнистые, которые могут быть либо рублеными, либо ткаными. Соответственно волокнистые наполнители в той или иной степени армируют полимерную матрицу и влияют на деформационное поведение материала.

Поэтому и методика термомеханического анализа дисперсных и армированных пластиков неодинакова.

Дисперсно-наполненные пластмассы испытываются методически аналогично ненаполненным материалам. Содержание наполнителя оказывает антибатное влияние на значение деформации. Чем больше наполнителя, тем меньше в материале полимера и тем меньше значение деформации на ТМК (рис. 4.10, а).

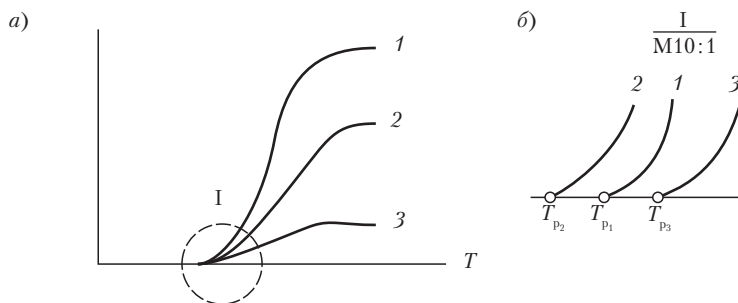


Рис. 4.10. ТМК дисперсно-наполненных пластмасс. Содержание наполнителя: 1 — 0%; 2 — 30%; 3 — 60%

При введении в полимер наполнителя вокруг дисперсных частиц образуется так называемый граничный или межфазный слой, свойства которого могут существенно отличаться от свойств матрицы. Взаимодействие химических особенностей наполнителя и матрицы проявляется в особенностях граничного слоя, который может быть либо более эластичным (тиксотропным), либо более жестким по отношению к полимеру связующего. Чем больше содержание в композите «полимера граничного слоя», тем рельефнее проявляется его влияние на свойства композита. Как правило, влияние граничного слоя наблюдается при содержании наполнителя более 30%. На ТМК оно проявляется в смещении по температурной шкале значения T_p . Если граничный слой жестче матрицы, то $T_{p1} > T_{p2}$; в противном случае $T_{p1} < T_{p2}$ (рис. 4.10).

Безусловно, влияние граничного слоя должно проявляться и в значении температуры стеклования. Однако при существенном содержании наполнителя установить достоверность смещения T_g по дифференциальной кривой скорости развития высокоэластической деформации оказывается затруднительно вследствие малости значения этой самой деформации.

При армировании пластмасс содержание волокнистого или тканого наполнителя может достигать 85%. В такой ситуации проводить термомеханический анализ в условиях сжатия или растяжения не имеет смысла, поскольку возникающие при подъеме температуры деформации не превышают по величине значений теплового расширения композита. Поэтому термдеформационный анализ армированных пластмасс проводят в условиях изгибных напряжений. Полученные таким способом результаты можно использовать только как сравнительные в пределах данного класса полимерных материалов.

Таким образом, оценка термомеханических свойств помогает решать, как идентификационные, так и прикладные проблемы в области технологии полимерных материалов, включая рецептурные, технологические и эксплуатационные задачи.

Аппаратурная простота метода расширяет возможности его использования, в том числе в условиях предприятий полимерной промышленности, как для контроля материалов, так и для определения свойств изделий.

Определенный эксплуатационный недостаток термомеханического метода состоит в длительности эксперимента, которая определяется по условию завершения релаксационных процессов, происходящих при нагреве полимера, что в свою очередь лимитирует скорость нагрева, которая не должна превышать 2 град/мин. Таким образом, если предельная температура нагрева установлена величиной 300 °С, при этом начальная температура ~20 °С, то длительность эксперимента составит 140 мин.

4.2.5. Капиллярная вискозиметрия

С помощью этого метода оценивают текучесть термопластичных ПМ. Сущность метода заключается в следующем (рис. 4.11). Гранулированный или порошковый ПМ загружается в камеру корпуса 1, в нижней части которой располагается шайба 2 со стандартным капилляром $\varnothing 2,095 \pm 0,015$ мм. Корпус нагрет нагревателем 5 до определенной температуры, при которой ПМ расплавляется. Под действием пуансона 3,

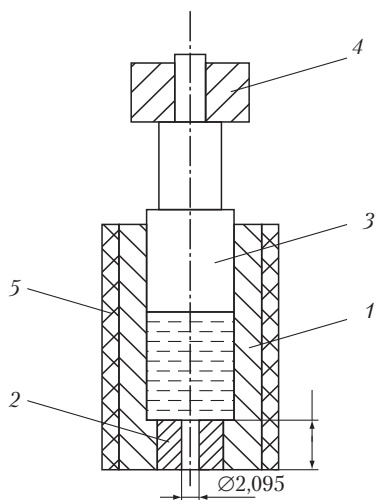


Рис. 4.11. Принципиальная схема капиллярного вискозиметра.
Пояснения в тексте

нагруженного также определенным усилием (груз 4), расплав продавливается через капилляр в виде экструдата. Включают секундомер и по прошествии некоторого отрезка времени, обычно 10–20 с, отрезают выдавившийся экструдат. Далее взвешивают этот отрезок и, зная время его выдавливания, рассчитывают показатель текучести расплава ПТР. Ранее, а также в переводных изданиях этот показатель назывался *индекс расплава*.

Условия определения ПТР стандартизованы и приведены в табл. 4.3, анализ которой показывает, что метод ПТР пригоден в том случае, когда вид идентифицируемого ПМ уже установлен. Однако этот метод в ряде случаев позволяет уточнить марку полимера, поскольку каждая из них, как правило, предназначена для определенного вида переработки (литье под давлением, экструзия пленок, экструзия труб, листов и т. д.) и имеет свой ПТР, отличающийся от других.

Например, в маркировке ПЭНП (ПЭВД), как известно, указывается давление при полимеризации (первая цифра), две последующие цифры обозначают метод производства базовой марки (автоклавный или трубчатый реактор); четвертая цифра указывает на способ усреднения

Таблица 4.3. Условия определения ПТР полимерных материалов

Полимер	Условия определения ПТР	
	нагрузка, Н	температура, °С
Полиэтилен высокой плотности (ГОСТ 16338–85)	50,0	190
Полиэтилен низкой плотности (ГОСТ 16337-77)	21,6	190
Полипропилен (ГОСТ 26996-86)	21,6	230
Полистирол (ГОСТ 20282-86)	50,0	200
Ударопрочный полистирол (ГОСТ 28250-89)	50,0	200
АБС-пластик (ТУ 6-05-1587-84)	216,0	210
Сополимеры стирола марок МС, МСН (ГОСТ 122271-76)	100,0	200
Полиамид ПА-6 (ТУ 6-05-4-88)	21,6	235
Полиамид ПА-610 (ГОСТ 10589-87)	21,6	236
Полиамид ПА-12 (ОСТ 6-05-425-86)	21,6	235
Поликарбонат (ТУ 6-05-1668-80)	21,6	280
Полиформальдегид, сополимеры формальдегида (ТУ 6-05-1543-87)	21,6	190
Полиэтилентерефталат (ГОСТ Р 51695-2000)	—	—
Полибутилентерефталат (ТУ 6-05-211-1051-83)	21,6	250
Полиметилметакрилат (ОСТ 6-01-38-81)	125,0	190
Полисульфон (ТУ 6-05-1069-84)	21,6	300
Полиарилат (ТУ 6-58-3644-89)	—	—

полимера, пятая — на группу плотности ПЭНП. Для нас важно, что цифры, расположенные после тире, указывают на значение ПТР, увеличенное в 10 раз.

Например, обозначение 10703-020 показывает, что это базовая марка ПЭНП (1), полученная автоклавным синтезом (07), усредненная холодным смешением (0) и с плотностью третьей группы (3). ПТР этой марки — 2 г/10 мин. Таким образом, оценив методом горения что идентифицируемый ПМ — полиэтилен, мы по значению ПТР можем уточнить, какой он — литевой или экструзионный (табл. 4.4).

Для оценки ПТР используются отечественные стандартизованные приборы ИИРТ-1, ИИРТ-2 и т. д. Отечественному методу оценки ПТР соответствует Европейский стандарт *ISO 1133–76*, американский *ASTM D 1238–73*, стандарт ФРГ *DIN 537355*.

Таблица 4.4. Основные марки ПТР и методы переработки промышленных термопластов

Термопласт	Марка	ПТР, г/10 мин	Метод переработки
ПЭНП, ГОСТ 16337	10004-002	0,2	Прессование
	10404-003	0,3	Экструзия
	15303-003	0,3	Экструзия
	17803-015	1,5	Экструзия, выдувание
	11203-022	2,2	Выдувание
	15903-020	2,0	Литье, выдувание
ПЭВП, ГОСТ 16338	11503-070	7,0	Литье
	21506-000	0	Прессование
	20208-002	0,2	Прессование
	20608-012	1,2	Экструзия
ПП, ГОСТ 26996	21008-075	5,0–10	Литье
	21003	0,2–0,3	Экструзия
	21015	1,5	Экструзия, выдувание
	21060	4,0–8,0	Литье
ПС, ГОСТ 20282	21180	15–20	Формование волокон
	ПСС	1,3–3,0	Литье, экструзия
	(суспензионный) ПСЭ-1	0,5–1,9	Прессование, литье,
	(эмульсионный) ПСМ-111	3–5	экструзия Литье
УПС, ГОСТ 28250	(блочный) УПС 1002	2,4–3,6	Литье, экструзия
	УПМ 0612Л	3–8	Литье
	САН	1,4–4	Литье, экструзия
	МСН	> 6,0	Литье
	АБС-2020	5–10	Литье, экструзия
Поликарбонат	ПК-1	1,0–3,5	Экструзия, прессование
	ПК-2	3,6–7,0	
	ПК-3	7,1–12,0	Литье
Полисульфон	ПСФ	1,5–5,0	Экструзия, литье
Полиамиды	ПА-12	1–5	Литье, экструзия
	ПА-6	23	Литье, формование волокон
	ПА-66	4,5	Литье, экструзия
ПЭТФ	А, Б, В, литьевой	0,3–12,5	Литье, раздув, экструзия
ПБТФ		> 0,5	Литье
Полиформальдегид	СФД, СФД-А	8,5	Литье
	СФД-Б	22	Литье
	СТД-А	9	Литье

Послесловие

***Указание Снейфу:** Самый необходимый предмет и самая важная информация наиболее труднодоступны.*

А. Блох

Работая над книгой более года, анализируя монографии и материалы периодических изданий, подробно знакомясь с публикациями в сети Интернет, автор убедился в правильности сформулированной им исходной ситуации: рекомендации механиков по выбору пластмасс грешат недостаточным знанием полимеров, рекомендации химиков-полимерщиков — недостаточными знаниями в области механики технических устройств.

Главы этой книги, а именно 1, 2 и 3, посвящены инженерному выбору ПМ и являются на сегодняшний момент явлением, единственным в своем роде. Причина «единственности» заключается в том, что автору довелось трудиться инженером-конструктором и преподавать в вузе как технические дисциплины, среди которых «Теория механизмов и машин», «Детали машин», «Подъемно-транспортные машины», так и дисциплины полимерно-технологического цикла — «Прикладная физика ПМ», «Переработка и применение пластмасс», «Композиционные и конструкционные пластмассы» и др. Автору довелось организовать в одном из вузов Санкт-Петербурга кафедру «Оборудование и робототехника переработки пластмасс». Более 30 лет он трудится на кафедре «Химической технологии пластических масс», которой и руководит. Все это и определило возможность комплексной оценки выбираемых полимерных материалов с полимероведческих позиций, учитывая положения классической механики механизмов и разъемных соединений.

Последней каплей, переполнившей терпение автора, и заставившей его взяться за перо, стал случай с его зонтом. Это был замечательный зонт. Большой его купол не складывался под напором ветра и легко противостоял ему. Легким нажатием на кнопку, расположенную на дивной почти деревянной ручке, зонт распрямлялся, защищая вла-

дельца от ливня. Автор гордился своим зонтом. Гордился до того момента, когда после нажатия на кнопку купол не только раскрылся, но и, отделившись от красавицы-ручки, отлетел в сторону. Как выяснилось, изделие претерпело невосстановимые изменения, причина которого заключалась в крохотной детальке из пластмассы, в которую ввертывался стальной винтик-саморез диаметром три миллиметра. Развалившаяся деталька не подлежала склеиванию или сварке, замена на новую оказалась невозможна. Точнее, возможной, но только с новым изделием. Таким образом, удобное и, заметим, недешевое изделие пришло в негодность из-за крохотного резьбового соединения «стальной саморез–пластмассовая бобышка».

Технический анализ показал удивительные вещи. Материалы для резьбовых соединений рекомендуются без учета основного условия их самоторможения; при выборе профиля резьбы не обращается внимания на возможность образования в полимере концентраторов напряжений; шкивы ременных передач трением рекомендуется изготавливать из антифрикционного полиамида, а зубчатые колеса — из фрикционного волокнита; прессовые соединения проектируются без должного учета как процессов релаксации напряжения, так и температурных эффектов, и т. д. И становятся понятнее случаи, когда антифрикционные вкладыши выпадают из металлических гнезд: механические передачи с применением пластиков не набирают расчетного ресурса, соединения металлопластиковых труб горячего водоснабжения утрачивают герметичность и начинают протекать. Дело не в пластиках. Причины неудачных конструкций из пластмасс надо искать в неполной оценке как свойств этих чрезвычайно полезных материалов, так и конкретных инженерных условий их эксплуатации. Пластмассы сложнее привычных металлов, но и отдача от них может быть значительно больше получаемой в настоящее время.

Все конструктивные замечания по книге будут с признательностью приняты и учтены автором.

Заслуженный деятель науки РФ,
д. т. н., профессор В.К. Крыжановский

Литература

1. Мирзоев Р.Г., Кугушев И.Д., Брагинский В.А. и др. Основы конструирования и расчета деталей из пластмасс и технической оснастки для их изготовления: учебное пособие для студентов вузов. — Л. : Машиностроение, 1972. — 416 с.
2. Альшиц И.Я., Анисимов Н.Ф., Благов Б.Н. Проектирование деталей из пластмасс: справочник. — М. : Машиностроение, 1969. — 248 с.
3. Конструкционные пластмассы. Свойства и применение/ И. Хуго и др., пер. с чешского. — М. : Машиностроение, 1970. — 336 с.
4. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий: Справочное издание. — Л. : Химия, 1987. — 416 с.
5. Изделия из пластмасс. Справочное руководство по выбору, применению и переработке/ С.Г. Баянский, М.Л. Кацевман, Е.Б. Файнштейн; при участии и под общ. ред. А.Я. Малкина и М.Л. Кербера. — М. : Радиопласт, 1992. — 201 с.
6. Полимерные композиционные материалы: Структура, свойства, технология: учеб. пособие/ М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головин и др.; под ред. А.А. Берлина — СПб. : Профессия, 2008. — 560 с.
7. Технология пластических масс; — 3-е изд. под ред. В.В. Коршака. — М. : Химия, 1995. — 560 с.
8. Макаров Г.В., Коптернамусов В.Б. Промышленные термопласты. — М. : Химия, 2003. — 208 с.
9. Николаев А.Ф., Крыжановский В.К., Лавров Н.А. и др. Технология полимерных материалов/ под ред. В.К. Крыжановского. — СПб. : Профессия, 2008. — 535 с.
10. Новиков В.У. Полимерные материалы для строительства: справочник. — М.: Высш. шк., 1995. — 448 с.
11. Аскадский А.А. Деформация полимеров. — М. : Химия, 1973. — 448 с.

12. Кулезнев В.Н., Шершнев В.А. Химия и физика полимеров: учеб. для хим.-техн. вузов. — М.: Высш. шк., 1988. — 312 с.
13. Белый В.А., Свиридёнок А.И., Щербаков С.В. Зубчатые передачи из пластмасс. — Минск: Наука и техника, 1965. — 248 с.
14. Николаев А.Ф. Технология пластических масс. — Л.: Химия, 1977. — 368 с.
15. Крыжановский В.К., Бурлов В.В. Прикладная физика полимерных материалов. — СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2001. — 261 с.
16. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. — Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. — 608 с.
17. Волский Н.И., Мягков В.Д., Бежанов Б.Н., Бушунов В.Т., Гук И.Т., Шаблинский Н.А. Теория механизмов и машин и детали машин. — М.-Л.: «Машиностроение», 1964. — 820 с.
18. Огибалов П.М., Малинин Н.И. и др. Конструкционные полимеры: Методы экспериментального исследования; под ред. П.М. Огибалова. — М.: Моск. гос. универ., 1972. — Кн. 1 и 2.
19. Маркс К. Капитал. — М.: Госполитиздат, 1949. — Т. 1. С. 378–379.
20. Комаров Г.В. Соединение деталей из полимерных материалов: Учеб. пособие. — СПб.: Профессия, 2006. — 592 с.
21. Земляков И.П. Прочность деталей из пластмасс. — М.: Машиностроение, 1972. — 158 с.
22. Матюшин Е.Г., Телепнёв М.Д., Луцко А.Н., Федотов В.В., Марцуневич Н.А. Теория механизмов и машин: пособие по проектированию. — СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2006. — 112 с.
23. Кушнарченко В.М., Ковалевский В.П., Чирков Ю.А. Основы проектирования передаточных механизмов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. — Оренбург: ОГУ, 2003. — 248 с.
24. Детали машин: учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1984. — 496 с.
25. Основы конструирования и детали машин. Лекционный курс/ МГТУ им. Н.А. Баумана, кафедра РК-3. (Интернет ресурс: <http://hoster.bmstu.ru/~rk3/okdm/lect/lect.htm>)

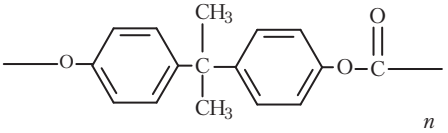
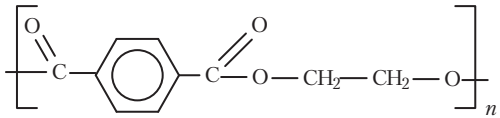
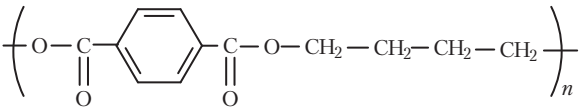
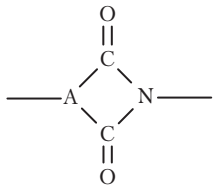
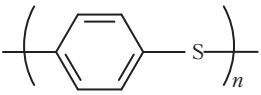
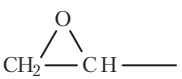
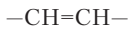
26. Айнбиндер С.Б. Тюнина Э.Л. Введение в теорию трения полимеров. — Рига: Знание, 1978. — 224 с.
27. Триботехнические свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс: обзор информ / Госстандарт; ВНИИЦГССД; под ред. Г.В. Сагалаева, Н.Л. Шембель. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 64 с.
28. Крыжановский В.К. Износостойкие реактопласты. — Л.: Химия, 1984. — 120 с.
29. Бахарева В.Е., Рубин М.Б. Подшипники в судовой технике. Справочник. — Л.: Судостроение, 1987. — 344 с.
30. Кузнецов А.А., Семенова Г.К., Свидченко Е.А. Конструкционные термопласты как основа для самосмазывающихся ПКМ антифрикционного назначения // Вопросы материаловедения. — 2009, № 1(57). С. 116–126.
31. Анализ полимерных композиционных материалов [Текст.: Учеб. пособие/ Б.И. Лирова, Е.В. Русинова] — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2008. — 187 с.
32. Погодина Е.С. Органолептическая и визуальная идентификация полимерных материалов. — Нижний Новгород: Изд-во «Симплекс», 2002. — 31 с.
33. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров/ пер с англ. под ред. А.Я. Малкина. — М.: Химия, 1976. — 416 с.
34. Кулезнев В.Н. Смеси полимеров. — М.: Химия, 1980. — 344 с.
35. Справочник по литевым термопластическим материалам. Свойства, примеры применения, переработка, торговые марки, изготовители / Справочник на CD. Версия 1.3. Инженерная фирма АБ Универсал. Сост.: Барвинский И.А., Барвинская И.Е. — 2004.
36. Тарутин Л.И., Позднякова Ф.О. Спектральный анализ полимеров. — Л.: Химия, 1986. — 248с.
37. Торопцева А.М., Белгородская К.В., Бондаренко В.М. Лабораторный практикум по химии и технологии высокомолекулярных соединений; под ред. проф. А.Ф. Николаева. — Л.: Химия, 1972. — 416 с.
38. Годовский Ю.К. Теплофизические методы исследования полимеров. — М.: Химия, 1976. — 213 с.

39. Тагер А.А. Физикохимия полимеров. — М.: Химия, 1978. — 544 с.
40. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие. — 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Профессия, 2005. — 248 с.
41. 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.

Приложение 1. Основные физико-химические свойства промышленных полимеров

Полимер	Формула
ПЭНП (ПЭВП)	$(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$
ПЭВП (ПЭНД)	$-\text{“}-$
СВМПЭ	$-\text{“}-$
ПП	$(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-)_n$
ПТФЭ	$(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$
ПС	$[-\text{CH}_2-\text{C}(\text{C}_6\text{H}_5)\text{H}-]_n-$
ПВХ (Винипласт)	$[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$
ПММА	$(-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)-)_n \text{COOCH}_3$
ПФА	$(-\text{CH}_2-\text{O}-)_n$
ПА-6	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{N} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C} \\ \\ \text{O} \end{array} \right)_n$
ПФО	$\left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_3 \\ \\ \text{O} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$
ПСФ	$\left(\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O} \right)_n$
Фенилон	$\left(\text{H}_2\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CO}- \right)_n$

Физическое строение*	Плотность, т/м ³	Молекулярная масса, у.е.10 ³	Температура плавления, °С	Температура размягчения, °С
а-к	0,91	20–500 (20–40)	105–115	60–65
к	0,94–0,97	70–3000 (30–700)	125–132	80–90
к	0,94–0,96	(5–8)10 ³		
а-к	0,90–0,91	40–200	165–175	80–90
к, а	2,1–2,2	100–500	–	230–240
а	1,04–1,06	80–100		
а	1,38–1,40	40–150	165–170	80–90
а	1,18–1,19	30–50	160	85–95
к	1,41–1,43	30–70	173–180	90–100
к	1,12	8–40	160–170	70–80
а-к	1,15	25–700	173–180	150
а-к	1,25	30–60	300	220
	1,35	–	360–430	240
а-к				

Полимер	Формула
ПК	
ПЭТФ	
ПБТФ	
ПИ	
ПФС	
Термореактивные (неотвержденные)	
ЭС	
НПЭФ	

Физическое строение*	Плотность, т/м ³	Молекулярная масса, у.е.10 ³	Температура плавления, °С	Температура размягчения, °С
а	1,2	28–200	220–230; кристаллическая фаза — 268	115–130
а-к	1,38–1,4	15–30	265–270	80–150
а-к	1,31	15–45	225–270	80–90
а-к	1,43	22–260	—	300–400
	1,29–1,44	30–60	300–380	220
а	1,2–1,25	0,36–1,08	–10+70	—
а	1,25	0,3–5,0	—	—

Полимер	Формула
ФФС (новолачные)	
ФФС (резольные)	

Примечание: * а — аморфный; к — кристаллический; а-к — аморфно-кристаллический.

Физическое строение*	Плотность, т/м ³	Молекулярная масса, у.е.10 ³	Температура плавления, °С	Температура размягчения, °С
----------------------	-----------------------------	---	---------------------------	-----------------------------

а	1,32	0,6–1,3	100–120	—
---	------	---------	---------	---

а	1,32	0,4–1,0	110–130	—
---	------	---------	---------	---

Приложение 2. Механические свойства термопластов общего назначения

Пластмасса	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости, ГПа		Ударная вязкость, кДж/м ²		Твердость по Бринеллю, МПа
			при растяжении	при изгибе	с надрезом	без надреза	
ПЭНП	7–17	50–600	0,09–0,01	0,09–0,13	Не разр.	Не разр.	14–23
ПЭВП	13–30	5–1000	0,55–0,65	0,65–0,75	Не разр.	Не разр.	44–52
СЭП	10–30	600–900	0,12–0,34	0,15–0,33	100	Не разр.	13
ПП	24–39	10–800	0,8–1,18	1,2–1,7	3,5–80	30–80	40–70
ПВХ	40–120	5–100	2,6–3	—	2–10	40–80	10–160
ПТФЭ	14–35	250–500	0,5–0,8	0,7	Не разр.	Не разр.	30–40
ПТФХЭ	26–45	20–200	1,3–1,6	1,15–1,4	20–160	Не разр.	100–130
ПС	30–48	1,5–4	—	2,7	1,4–2	17–28	140–160
ПСУП	15–32	12–45	—	1–2,5	2,5–35	4–65	120–150
САН	50–85	3–5	3	3	1,4–2,3	16–24	16–24
САМ	—	2	—	2	—	—	—
АБС	32–65	12–70	1,5–2,6	1,5–2,8	5–25	8–100	10–200
ПВА	20–50	10–20	1,3–2,3	1,3–2,3	—	5–8	20–50
ПВБ	22–60	15–180	—	2–2,2	—	80–125	100–110

ПВФ	60-70	5-11	—	3,3-4	—	15-30	190
ПВЭ	70-80	5-10	—	3,3-4	—	15-30	170
ПВС	60-140	5-6	—	5,5	—	4-6	—
ПММА	55-115	1,5-23	2,7-4,2	—	1,6-18	2-30	10-300
ПТ	20-55	5-300	—	0,9-1,3	3,5-70	24-140	40-110
АПЭ	25-50	7-20	2-2,5	1-2	—	—	—
АБЦЭ	17-40	20-40	0,9-1,9	0,5-1,2	—	—	—

Приложение 3. Механические свойства конструкционных термопластов

Пластмасса	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Модуль упругости, ГПа		Ударная вязкость, кДж/м ²		Твердость по Бринеллю, МПа
			при растяжении	при изгибе	с надрезом	без надреза	
ПА-6	50–65	150–300	1,6–2,4	1,5–2,3	5–10	Не разр.	100–110
ПА-6 блочн.	90–95	6–20	2,3–2,4	1,8–2	4–6	Не разр.	130–150
ПА-6НС*	120–150	2–7	5–8,5	5–8	5–10	30–50	130–150
ПА-610	50–60	100–200	1,5–1,7	1,5–1,7	5–10	Не разр.	110–150
ПА-610НС	120–140	2–5	8–8,5	7–10	9–10	35–50	150–250
ПА-66	83–92	40–150	3–3,2	—	5,5–16	Не разр.	110–180
ПА-66НС	160–250	2–4	8–16	6–8	7–8	20–30	110–180
ПА-66/6	60–70	80–100	1,5–1,6	1–1,5	3,5	Не разр.	100–120
ПА-12	45–55	200–260	1,2–1,6	1,2–1,4	5–20	Не разр.	80–105
ПА-12НС	90–110	5–6	3,6	—	8–9	20–30	80–105
ПФ	60–70	20–75	3	2,6–3	6–8	50–130	110–140
ПФНС	90–120	—	8–10	7–10	—	—	—
ПК	60–65	80–120	2,4	—	20–30	Не разр.	100–110
ПКНС	100–120	9–10	8	—	9–10	50	140
ПСФ	55–70	10–25	2,5–2,7	—	6–6,5	Не разр.	100–120
ПСФНС	100–103	2–3	6–10	—	6,5–10	22–25	140–150
ПЭТФ	50–70	5–50	2,8–3	2,8–3	2–3	22–90	115–130
ПЭТФНС	110–120	2–4	10–11	—	—	—	—
ПБТ	55–60	30–120	2,2–2,7	2–2,6	2–4,5	100–120	100–110
ПБТНС	100–120	7–8	9–10	7–8,7	4–6	20–35	100–150
ФН	100–140	4–6,5	3–3,3	—	—	4–50	180–220
ПИ	40–140	0,4–100	2,2–3,5	3–3,6	5–120	5–120	85–330
ПФО	100–195	5–37	2	2	—	15–70	100–200

* НС — наполненный стекловолокном.

Приложение 4. Механические свойства теплостойких конструкционных термопластов

Полимер	Тип	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Предел прочности при изгибе, МПа	Модуль упругости, ГПа		Ударная вязкость по Изоду с надрезом, Дж/м
					при растяжении	при изгибе	
ПСФ	Базовый	70	75	106–109	2,5	2,7	69
	С 30% стекл.	101–108	1,5–3	140–154	7,4	7,6	59–75
	Базовый	80	0,4–100	110	2,2–3,5	3–8	55–120
	С 40% стекл.	130	1	60	—	7,3	35
	С 65% стекл.	160	1	350	—	21	800
	С графитом и минер. наполн.	40	1	90	—	5,3	14
ПЭИ	С ПТФЭ и минер. наполн.	35	1	50	—	2,7	14
	Базовый	105	60–80	118–117	3	2,7–3,3	50–53
ПЭС	С 30% стекл.	165	3	230–237	9	8,3–9	100–107
	Базовый	84–86	50–60	129	2,4–2,5	2,6	—
ПИСФ	С 30% стекл.	140–145	3	190–192	—	2,4	—
	Базовый	70	—	—	4,8	—	—
	Базовый	80–90	100	—	3,2	4	40
	С 30% стекл.	166–176	3	—	8,6	9–10	98
	С 30% углерод. вол.	220	5	—	11,6	21	—
ПЭЭК	Базовый	76	1–3	—	2,2–2,7	3,8–4,2	25–70
	С 40% стекл.	66–135	0,9–4	—	5,3–7,9	12,6	60–80
	Со стекл.	76–96	0,7	—	7,7	13–17	26–53
	и минер. наполн.	—	0,5–3	—	17,5–26	17,1– 23	43–64
	С 30% углерод. вол.	—	—	—	—	—	—
АПЭ (ЖКП)	С 30% стекл.	200	2,2	250	—	15	135
	С 50% стекл.	190	1,3	245	—	20	95
	С 25% стекл.	170	1,8	225	—	19	90
	+ 25% минер. наполн.	—	—	—	—	—	—

Приложение 5. Свойства листовых стеклопластиков на основе эпоксидных связующих

Показатели	Марка стеклопластика					
	ЭФ-32-301	ЭТО	СТВЭ	СТЭФ	СТЭФ-Р	СТЭР-1-30
ρ , кг/м ³	1600–1700	1800–2000	1600–1700	1600–1800	1600	1700–1800
T_m , °C	240	330	180	180–200	180	230
$T_{\text{раб}}$, °C	От –60 до +155	—	—	—	—	—
σ_b , МПа	408/220*	580/600*	—	300/150*	250/200*	300
$\sigma_{ск}$, МПа	260/190*	420–520	—	—	—	300
$\sigma_{\text{н}}$, МПа	415/330*	700–730	150	250	—	400
E , ГПа	22,0/16,3*	3,12–3,10	—	—	—	25,0
G , ГПа	35,3/35,0*	—	—	—	—	—
a , кДж/м ²	142/118*	—	48	145	—	195
$\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/К	6,2	7,5	—	—	—	—
C , кДж/(кг·К)	1,5–1,71	3,13	—	—	—	—
λ , Вт/(м·К)	0,29	0,33	—	0,21–0,28	—	—
a_T , м ² /с	21,7	—	—	—	—	—
ρs , Ом	—	10 ¹⁴	—	1·10 ¹³	1·10 ¹³	2·10 ¹²
ρv , Ом·см	—	5·10 ¹³	1·10 ¹⁴	1·10 ¹³	1·10 ¹³	6·10 ¹³
ε	4,5	—	—	6	—	5,4
$\text{tg } \delta$	0,027	0,009	0,09	0,005	—	0,18
$E_{\text{нп}}$, МВ/м	—	—	—	25	12	25
Водопогло- щение, %	0,28	0,05	—	0,8–1,0	0,8	0,05
Бензопог- лощение, %	0,07	—	—	—	—	—
Маслопогло- щение, %	0,55	—	—	—	4	0,28
Керосино- стойкость, %	0,38	—	—	—	—	—

* Числитель — по основе, знаменатель — по утку.

Приложение 6. Свойства листовых стеклопластиков на основе кремнийорганических соединений

Показатели	Марка стеклопластика				
	СКМ-1	СКМФ-29	СТК-41	СТК-41/ЭП	СТК-71
ρ , кг/м ³	1770	1900	1600–1800	1600	1600–1800
T_m , °C	200–2150	250–300	225	250	225
$T_{\text{раб}}$, °C	–60...+200	–60...+350	—	—	—
σ_b , МПа	250	200–300	200	180/120*	100
$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	160	300–350	—	—	—
σ_n , МПа	140	200–300	110	200	—
E , ГПа	21,7	—	—	—	—
a , кДж/м ²	57/53*	195–240	—	72	—
НВ, МПа	245	—	—	—	—
$\varepsilon_{\text{отн}}$, %	—	—	0,5–1,0	—	—
λ , Вт/(м·К)	—	—	0,21–0,28	0,21–0,28	—
ρ_s , Ом	$1,2 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$	—
ρ_v , Ом·см	$5 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$
ε	4,16–4,83	3,6–4,5	—	5–7	—
$\text{tg } \delta$	0,005	0,003	0,2	0,04	0,005
$E_{\text{пр}}$, МПа	11	10	10–12	18	10
Водопоглощение, %	0,5	—	2,0	1,0	0,35

* Числитель — по основе, знаменатель — по утку.

Приложение 7. Основные свойства некоторых углепластиков

Показатели	Марка углепластика					
	КМУ-3л	КМУ-3	КМУ-2л	КМУ-2у	КМУ-1	КМУ-4
	Марка волокна					
	Лента	Жгут	Лента	Жгут	Жгут	Жгут
	ЛУ-2	ЛУ-2	ЛУ-2	ВМН-4	8МН-1	ВМН-4
Матрица						
	Эпоксифенольная	Полиамидная	Эпокситрифенольная			
ρ , кг/м ³	1400	—	1300	1400	1500	1500
$\sigma_{\text{в}}$, МПа*	650	1100	380	900	740	1020
E , ГПа*	120	180	80	140	160	180
$\tau_{\text{сдв}}$, МПа	400	450	300	400	250	400
$\sigma_{\text{н}}$, МПа	29	45	26	30	30	30
$\alpha \cdot 10^6$, 1/°С*	0–0,5	0–0,5	0–0,5	0–0,5	0–0,5	0–0,5
C , кДж/(кг·К)*	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
То же**	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032	1,032
λ , Вт/(м·К)*	0,508	0,508	0,508	0,508	0,508	0,508
То же**	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520	0,520
$aT \cdot 10^7$, м ³ /с*	3,0–2,88	3,0–2,88	3,0–2,88	3,0–2,88	3,0–2,88	3,0–2,88
ρv , Ом·см*	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^2$ – $1 \cdot 10^5$

* Вдоль волокон, ** Поперек волокон.

Приложение 8. Свойства гибридных эпоксидных композитов в зависимости от состава волокна

Вариант	Композит	$V_{об}$, % в нитях				ρ , кг/м ³	E , ГПа	Прочность, МПа				a , кДж/м ²
		стекловолокна	органоволокна	карбоволокна	бороволокна			σ_p	$\sigma_{сж}$	σ_n	$\tau_{сдв}$	
А	Карбостекло- волокнит	17	—	30*	—	1520	85	—	320	460	—	180
		33	—	17*	—	1620	77	—	300	410	—	170
		46	—	4*	—	1760	65	—	240	730	—	240
Б	Борокарбосте- кловолокнит	11,5	—	10,4	78,1	1840	215	—	840	1640	63	—
		10,6	—	32,9	56,5	1710	190	—	830	1660	54	—
		11,1	—	42,7	46,2	1720	202	—	740	1650	44	—
В	Карбооргано- волокнит	—	14	40*	—	1400	175	—	520	980	—	150
		22	28*	—	1350	165	—	530	820	—	260	—
Г	Боростекло- текстолит	16,5	—	—	83,5	1800	152	72	1240	1090	—	—
		19,3	—	—	80,7	1700	118	87	ИЗО	730	—	—
		13,5	—	—	64,5	1730	87	120	1040	980	—	—
Д	Карбооргано- текстолит	—	100	0	—	1350	77	1,66	0,29	—	49	—
		—	50	50	—	1510	108	1,22	0,69	—	56	—
		—	25	75	—	1560	120	1,28	0,94	—	76	—
		—	0	100	—	1600	145	1,57	1,01	—	91	—

* Объемное содержание волокна ($V_{об}$) в композите.

Приложение 9. Конструкционные термопласты с улучшенными свойствами

1. Полиамид 46 (ПА-46)

Плотность	г/см ³	1,18	Термостабилизирован, может использоваться при температурах до 130 °С, износоустойчив, повышенная размерная стабильность, отличная перерабатываемость из расплава
$T_{пл}$	°С	259	
$T_{ст}$	°С	75	
σ_p	МПа	100	
E_p	МПа	1200	
ε_p	%	40–280	
Водопоглощение за 24 ч	%	3,7	

2. Жидкокристаллический полимер (ЖКП) — *Zenite*

Плотность	г/см ³	1,62	Температура эксплуатации до 240 °С, очень низкая вязкость расплава, высокая стойкость к окислению и химикатам, повышенная размерная стабильность, допускает прецизионное литье под давлением. Применяется в аэрокосмической техники, электротехнике и электронике
$T_{пл}$	°С	330–350	
$T_{ст}$	°С	225–265	
σ_p	МПа	110–150	
E_p	МПа	(13–17)·10 ³	
ε_p	%	1,1–1,9	
β	1/°С	0,6·10 ⁻⁵	
Водопоглощение за 24 ч	%	–	

3. Полисульфон (ПФС)

Плотность	г/см ³	1,24	Высокая химическая стойкость и теплостойкость, стойкость к многократной стерилизации паром, допущен к эндопротезированию, высокая гидролитическая и размерная стабильность. Заменяет цветные металлы. Легкость в переработке
$T_{пл}$	°С	350–390	
$T_{ст}$	°С	174–180	
σ_p	МПа	70–80	
E_p	МПа	2500	
ε_p	%	50–100	
β	1/°С	5,7·10 ⁻⁵	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,3–1,0	

4. Полиэфирсульфон (ПЭС)

Плотность	г/см ³	1,37	Высокая прочность, химическая и теплостойкость. Огнестоек. Прозрачен. Допущен к контакту с пищевыми продуктами. Длительно эксплуатируется при 200 °С
$T_{пл}$	°С	340–400	
$T_{ст}$	°С	220	
σ_p	МПа	85	
E_p	МПа	2600	
ε_p	%	25	
β	1/°С	4,9·10 ⁻⁵	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,4–0,6	

5. Полифениленсульфон (ПФС)

Плотность	г/см ³	1,29	Высокая гидролитическая стойкость, прочность при ударных нагрузках, допущен к изготовлению медицинского инструмента, сантехнического оборудования; высокая теплостойкость, размерная стабильность. Легкость в переработке. Радиационностоек. Самозатухающий
$T_{пл}$	°C	350–380	
$T_{ст}$	°C	220	
σ_p	МПа	70	
E_p	МПа	2300	
ϵ_p	%	60–120	
β	1/°C	$5,6 \cdot 10^{-5}$	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,4	

6. Полифениленсульфид (ПФСД)

Плотность	г/см ³	1,61	Высокая химическая и гидролитическая стойкость, размерная стабильность, негорючесть; применяется в химической, автомобильной промышленности, авиа- и приборостроении, в электротехнике
$T_{пл}$	°C	320–330	
$T_{ст}$	°C	260	
σ_p	МПа	160	
E_p	МПа	13000	
ϵ_p	%	1,6–1,8	
β	1/°C	$5,4 \cdot 10^{-5}$	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,4–0,6	

7. Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК)

Плотность	г/см ³	1,3	Высокая химическая стойкость, сохранение деформационно-прочностных свойств до 200 °C, долговременная стойкость к окислению. Высокая усталостная прочность, технологичность в переработке из расплава. Может применяться для крепежа, деталей передач и трансмиссий, сепараторов подшипников качения, деталей подшипников скольжения
$T_{пл}$	°C	340	
$T_{ст}$	°C	150	
σ_p	МПа	90–100	
E_p	МПа	3600	
ϵ_p	%	10–30	
β	1/°C	$4,3 \cdot 10^{-5}$	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,1–0,2	

8. Полиэфиркетонкетон (ПЭКК), литьевой

Плотность	г/см ³	1,3	Способен длительно эксплуатироваться при 250 °C. Высокая усталостная прочность. Может применяться в зубчатых передачах и в разнообразных подшипниках
$T_{пл}$	°C	307–390	
$T_{ст}$	°C	155–175	
σ_p	МПа	90–120	
E_p	МПа	до 5000	
ϵ_p	%	12–80	
β	1/°C	$(4–8) \cdot 10^{-5}$	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,2–0,3	

9. Полиариламид (ПАРА) + 50%СВ

Плотность	г/см ³	1,4–1,6	Сочетает жесткость и высокое качество поверхности. Высокая текучесть расплава и формуемость, в том числе тонкостенных изделий, металлизуется. Минимальная ползучесть; размерная стабильность. Идеален для изделий конструкционного назначения
$T_{пл}$	°C	235	
$T_{ст}$	°C	85	
σ_p	МПа	170–220	
E_p	МПа	11000	
ε_p	%	1,8–2,0	
β	1/°C	–	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,2	

10. Полифаламид (ПФАМ) + (33 – 45)%СВ

Плотность	г/см ³	1,45	Температура постоянной эксплуатации до 135 °C. Сохраняет свойства в условиях высокой влажности. Стоек к гликолям и их смесям; высокая размерная стабильность и усталостная прочность. Успешно заменяет алюминий во всех видах его применения. Используется для сепараторов подшипников
$T_{пл}$	°C	313–315	
$T_{ст}$	°C	100–123	
σ_p	МПа	200–250	
E_p	МПа	(11–15)·10 ³	
ε_p	%	2–3	
β	1/°C	(8–12)·10 ⁻⁵	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,1–0,4	

11. Полиэфиримид (ПЭИ)

Плотность	г/см ³	1,27	Температура постоянной эксплуатации до 170 °C, наибольшая теплостойкость до 210 °C. Химически стоек. Применяется в пищевой и медицинской промышленности, в электротехнике, приборостроении (корпуса электромашин, кожухи, клапаны, элементы передач)
$T_{пл}$	°C	280–310	
$T_{ст}$	°C	170–200	
σ_p	МПа	105	
E_p	МПа	3000	
ε_p	%	10	
β	1/°C	4,5·10 ⁻⁵	
Водопоглощение за 24 ч	%	0,25–1,3	

12. Полистирол синдиотактический (СПС)

$T_{пл}$	°C	260–270	Кристаллизующийся термопласт. Особенности: термическая стойкость, устойчив к автомобильным топливам, смазкам, спиртам, антифризам, щелочам, кислотам. Сохраняет лучшие технологические и декоративные свойства ПС. Имеет высокую размерную стабильность
$T_{ст}$	°C	100	

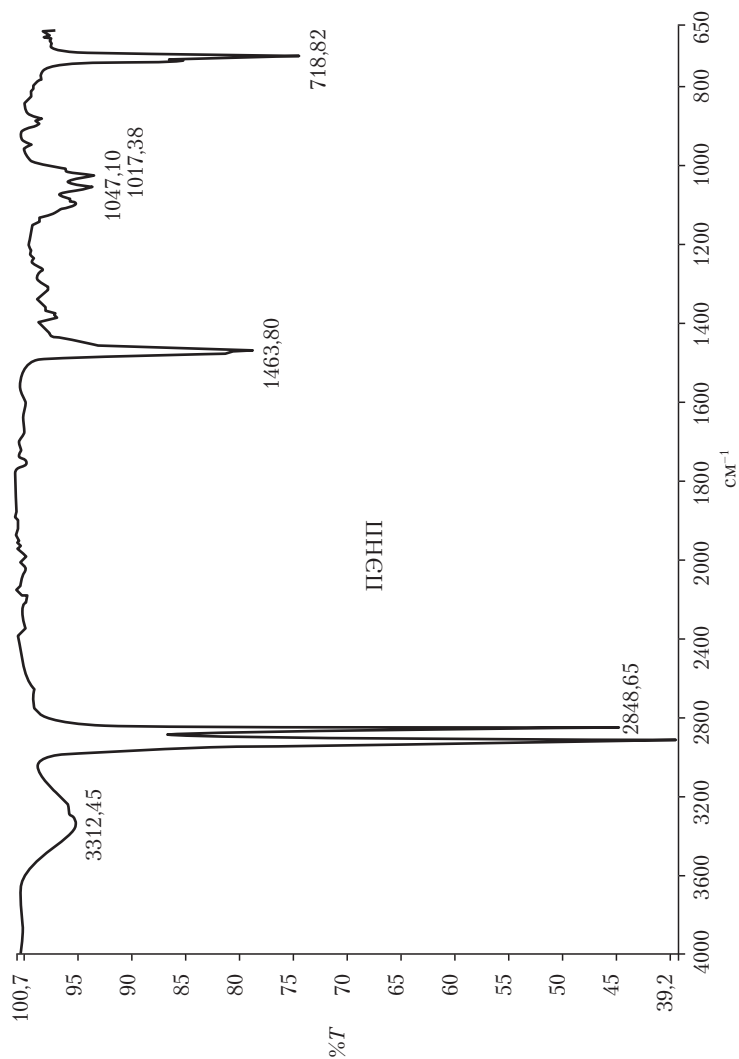
щения функциональных групп [33]

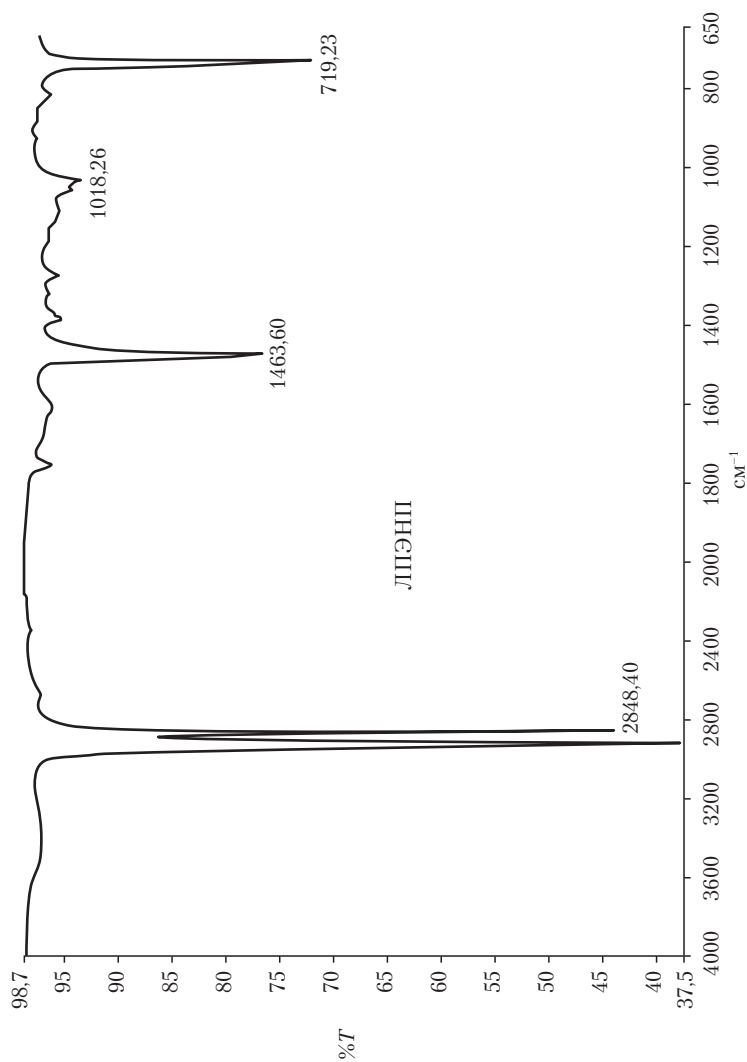
[illegible]

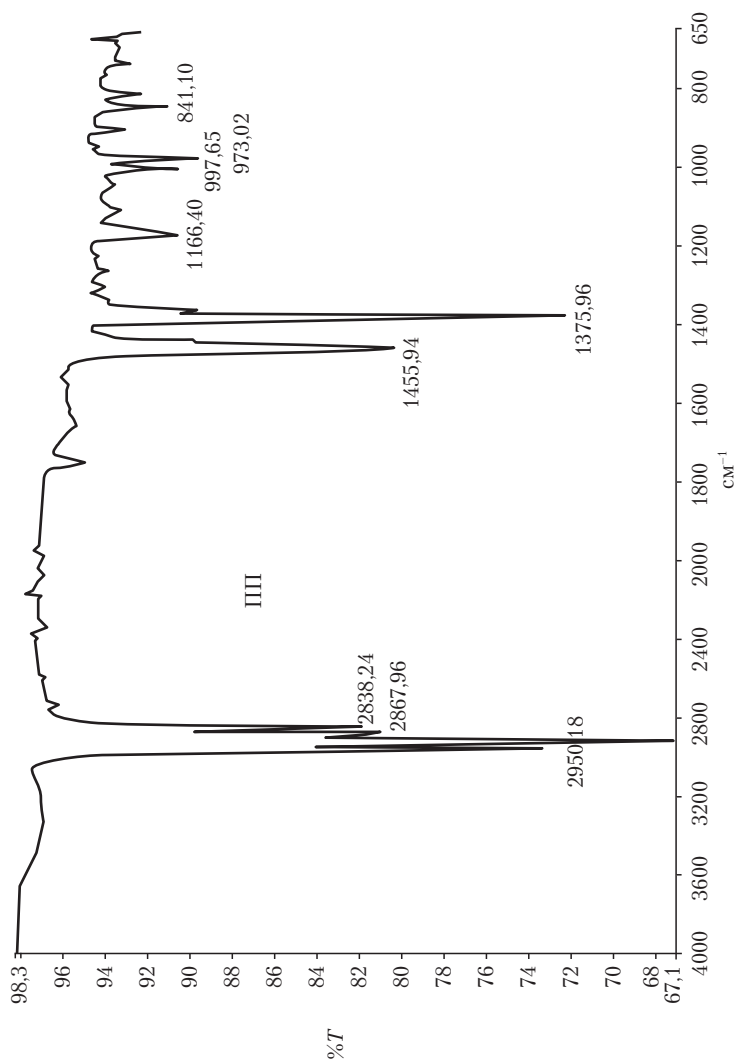
[illegible]

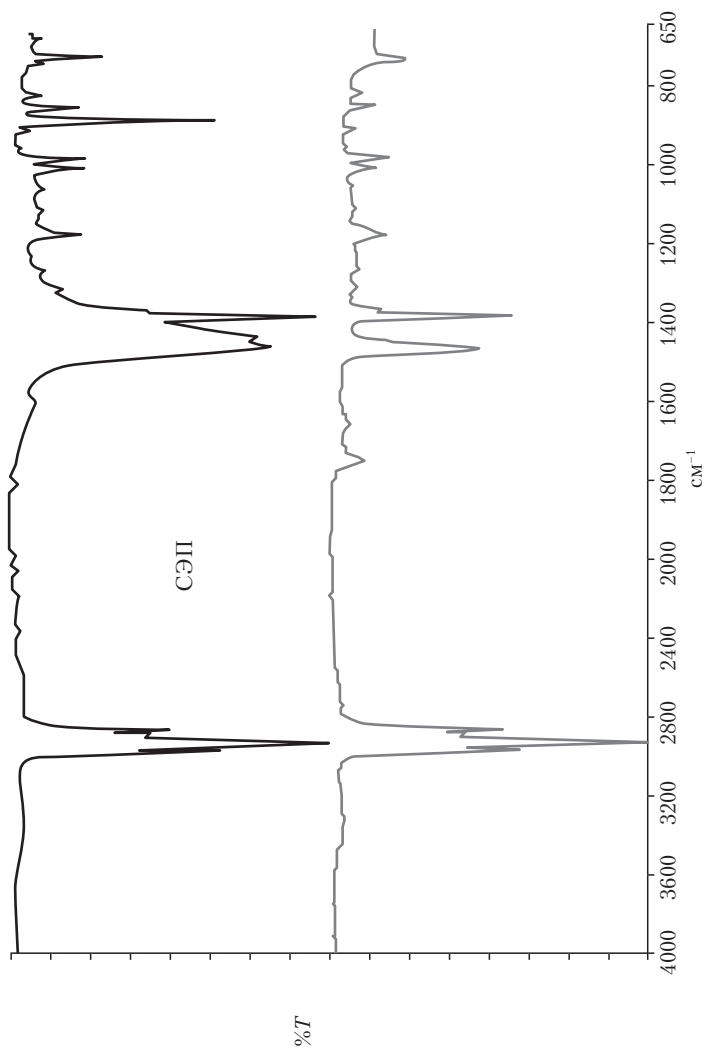
Группы			Волновое число · 10 ⁻² , см ⁻¹															
			33	25	20	166	143	125	11,1	10	9,1	8,3	7,7	7,1	6,6	6,3	5,9	
Амино- группы	–NH ₂	свободная																
		связанная																
	>NH	свободная																
		связанная																
	–N<																	
	NH ₄ ⁺																	
	Аминный гомогенводород																	
Аминокислоты																		
Амидные группы	–CONH ₂																	
	–CONH–																	
	–CON																	
	–OCONH–																	
Кольца с азотом	Пиридины																	
	Триазины																	
Другие азотосодер- жащие группы	–C=N																	
	–N=C																	
	–NCO																	
	–NCS																	
	–NO ₂																	
	–ONO																	
	–ONO ₂																	
Галогенные группы	–CF ₃																	
	–F																	
	–Cl																	
	–Br																	
	–I																	
Фосфорные группы	P–H																	
	P–OH																	
	P–O–C																	
	P=O																	
	P=S																	
Кремний- содержащие группы	Si–H																	
	Si–C																	
	Si–O–C																	

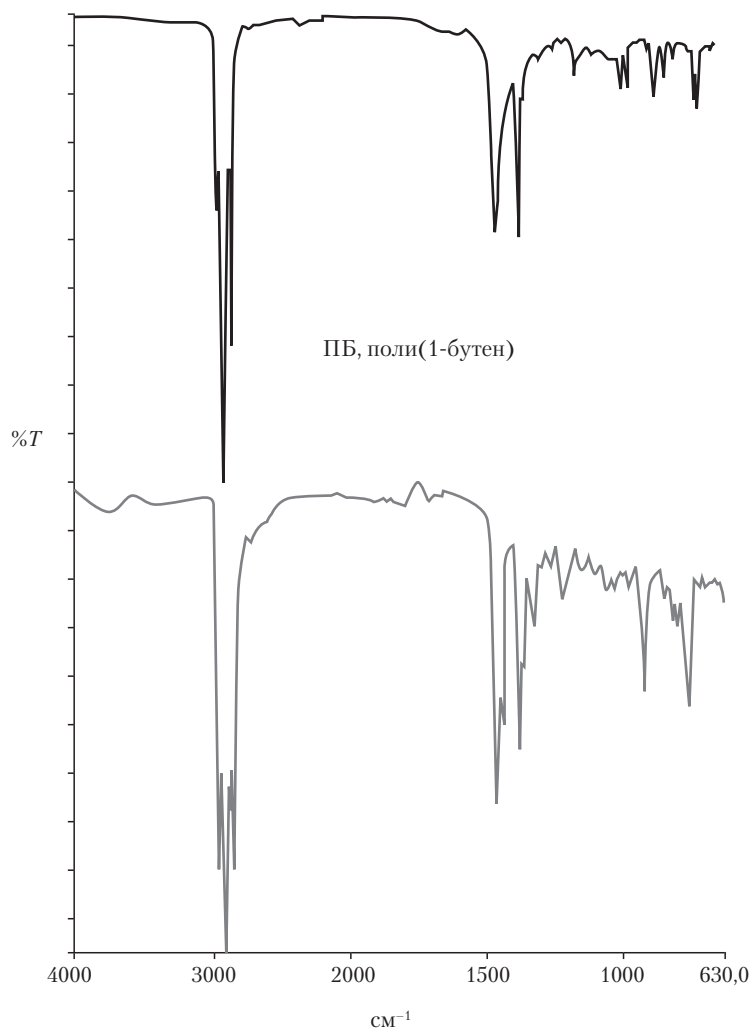
Приложение 11. ИК-Фурье спектры полимеров

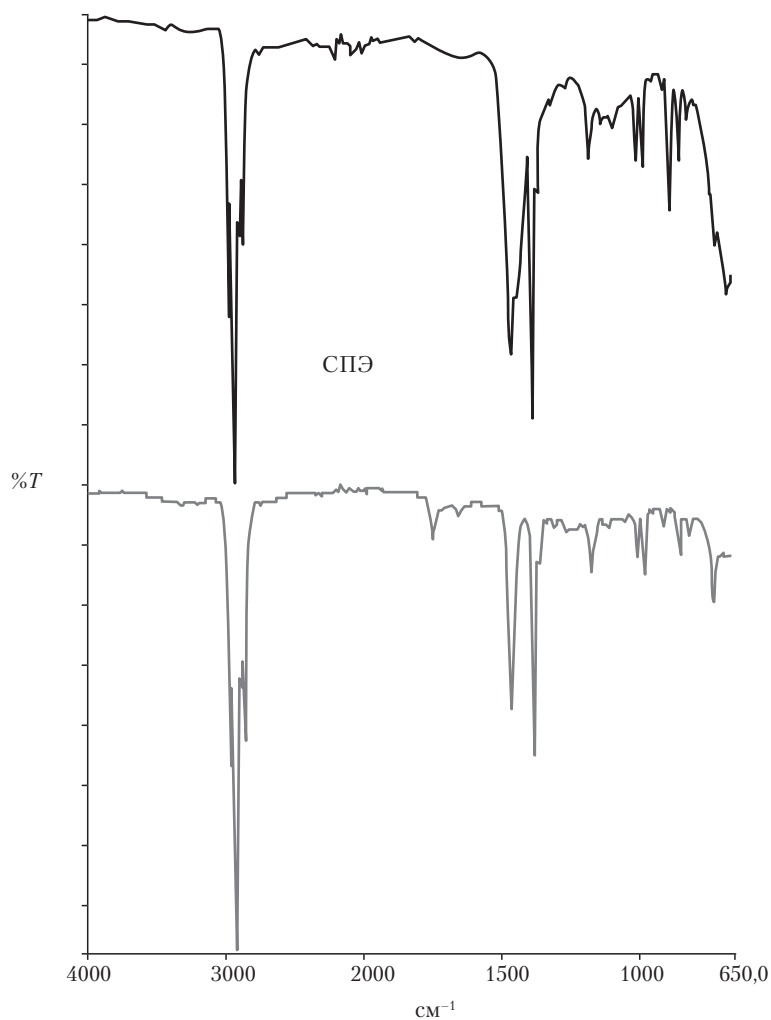


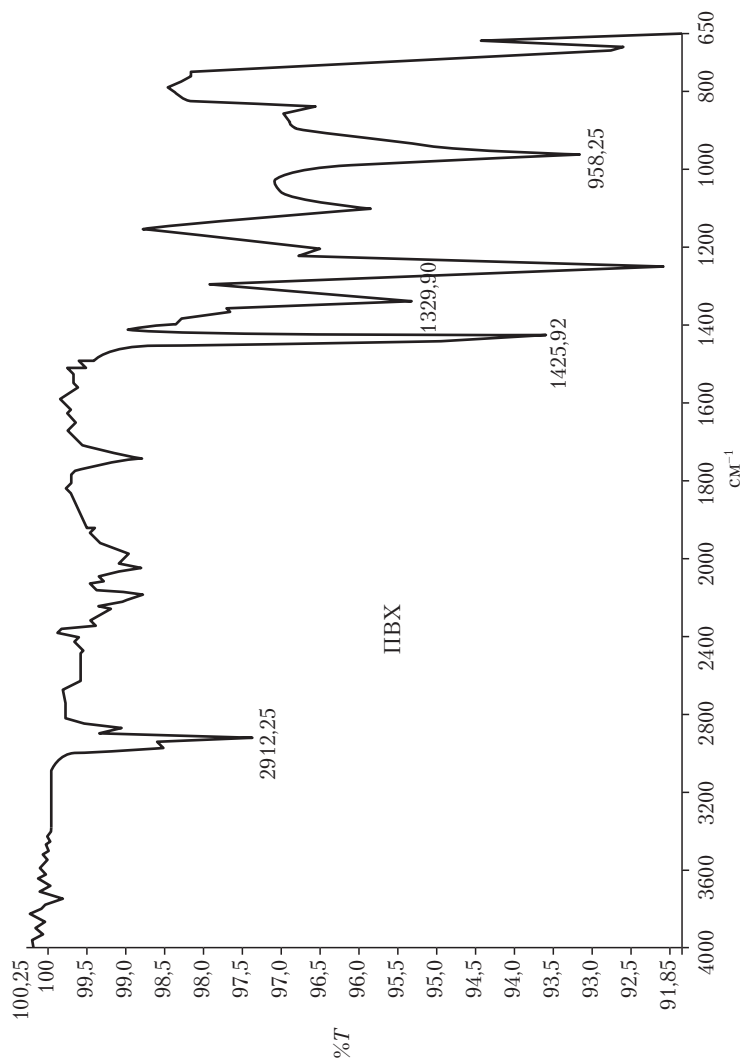


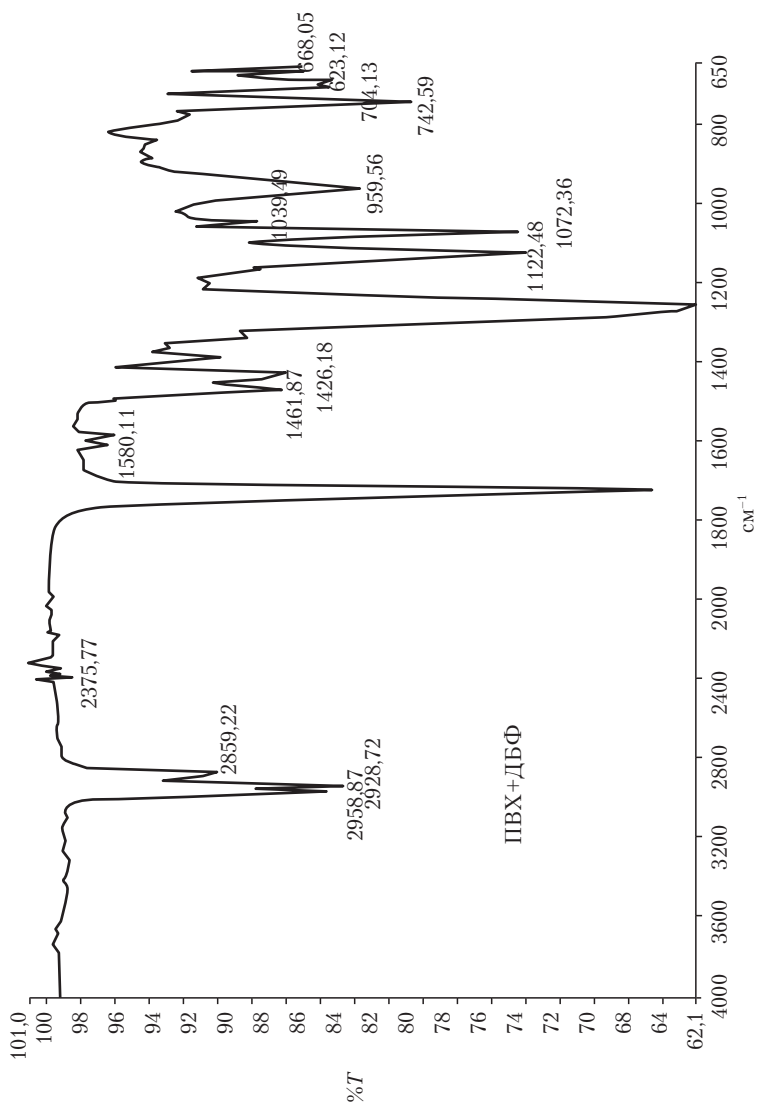


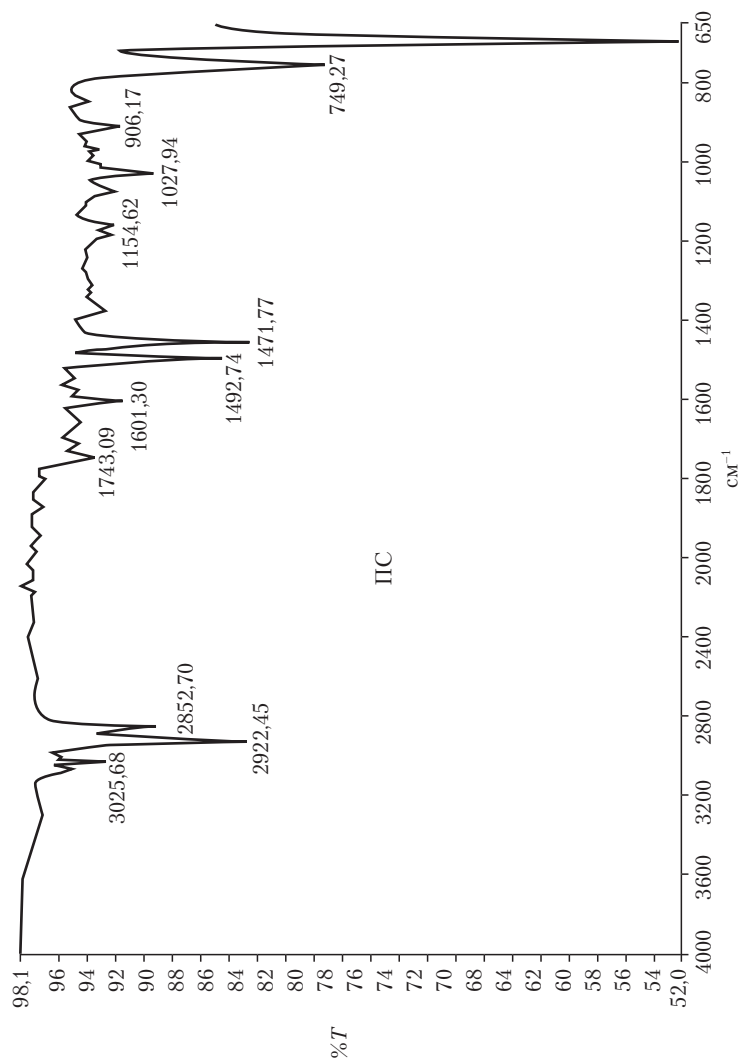


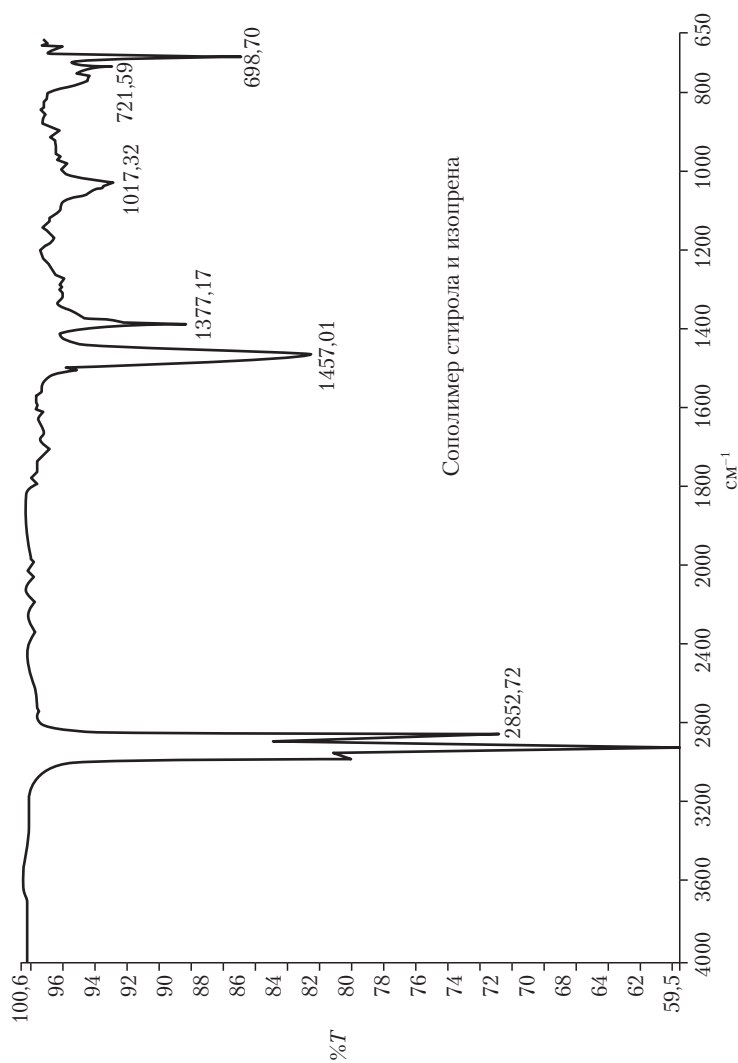


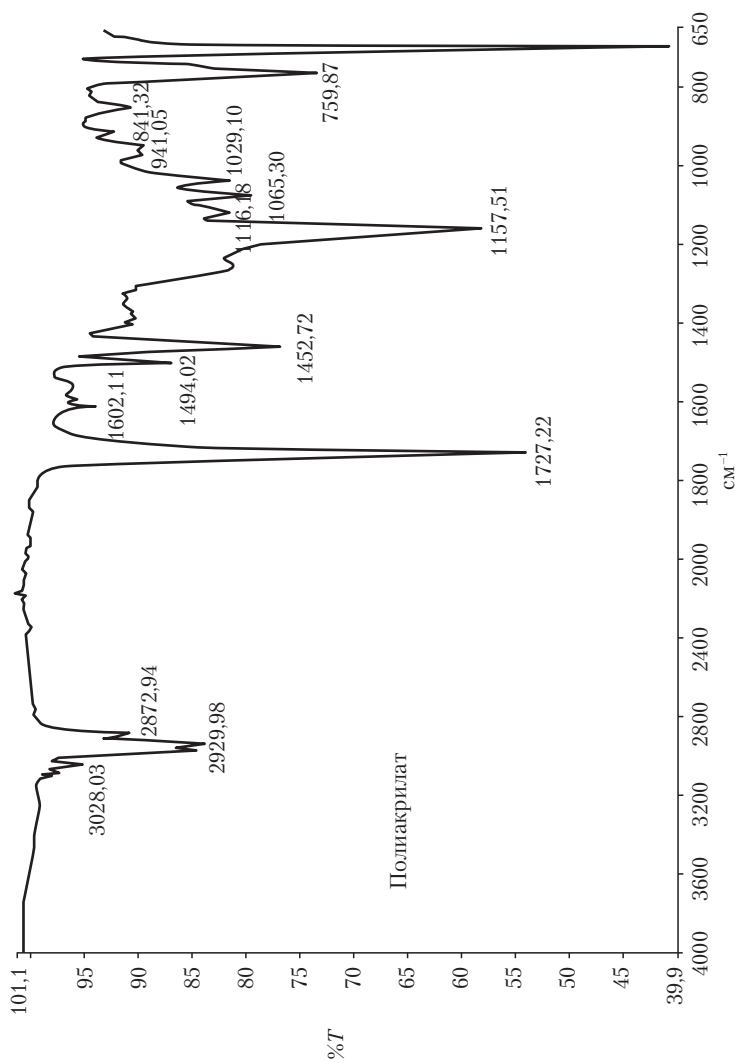


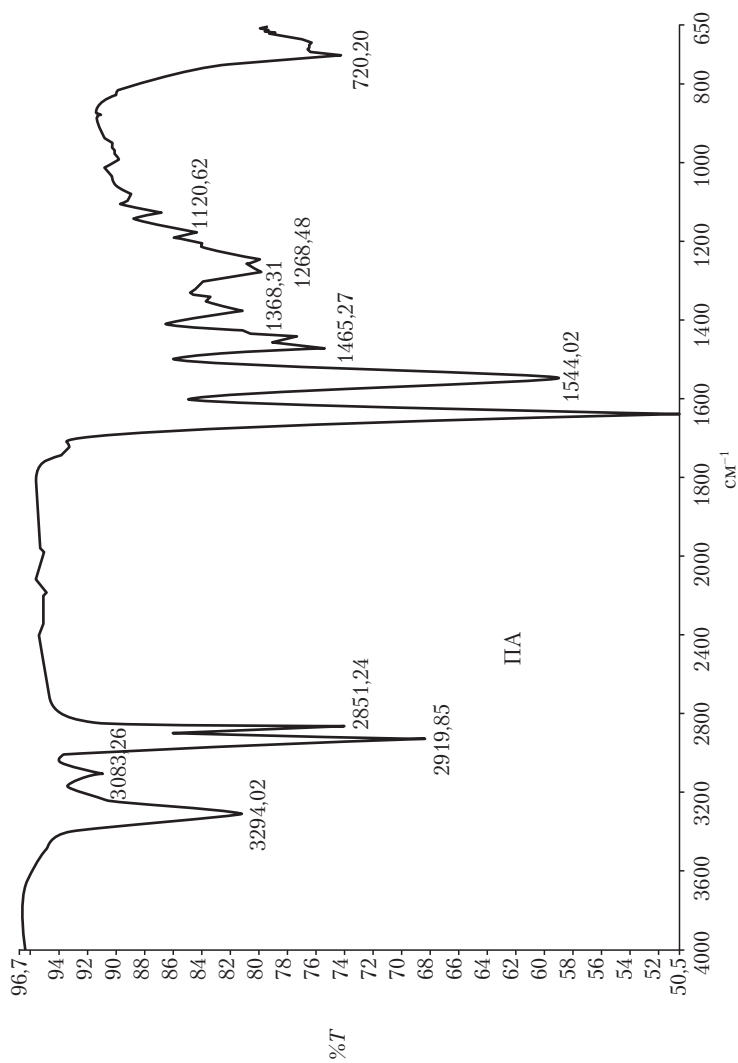


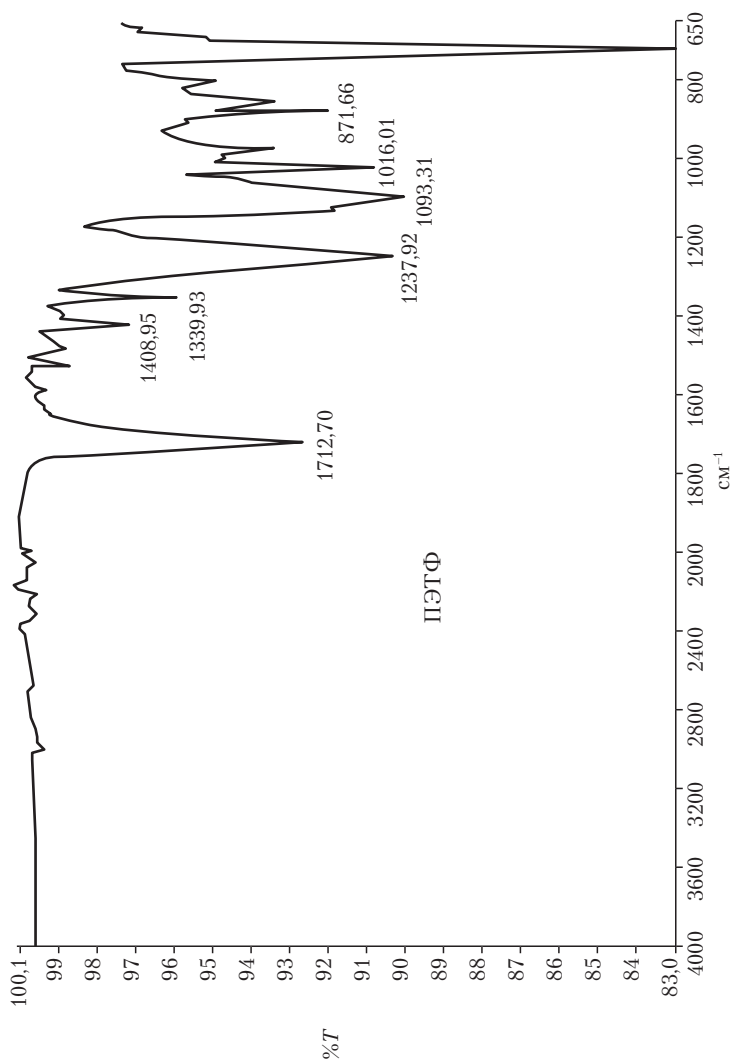


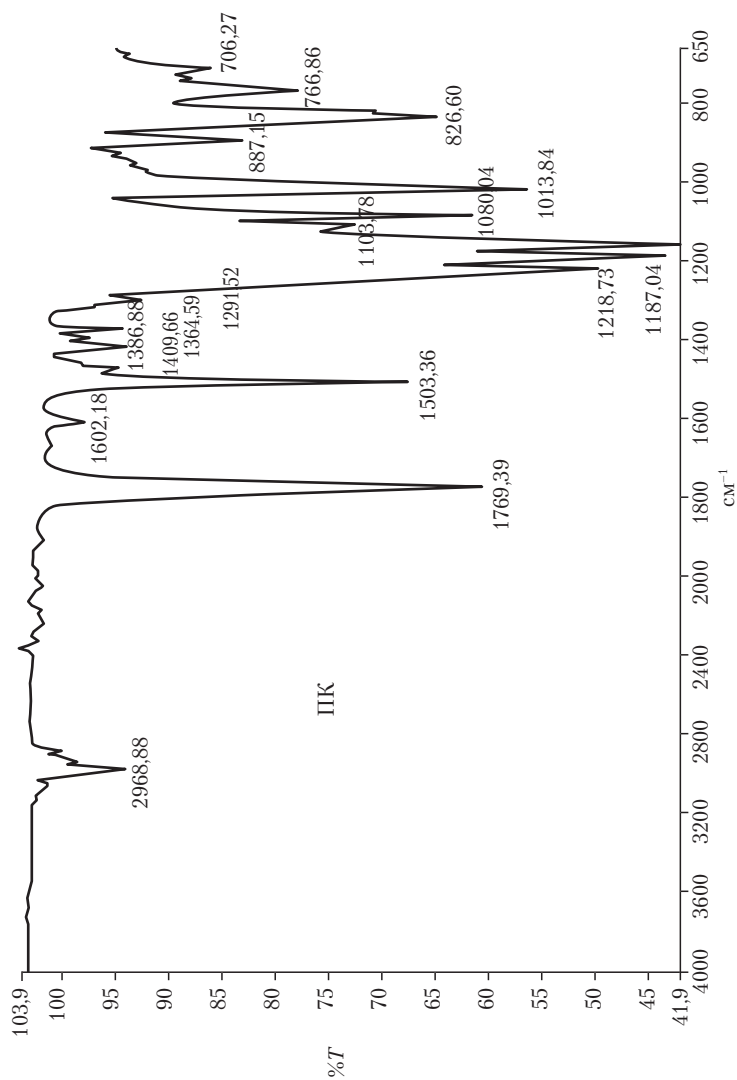


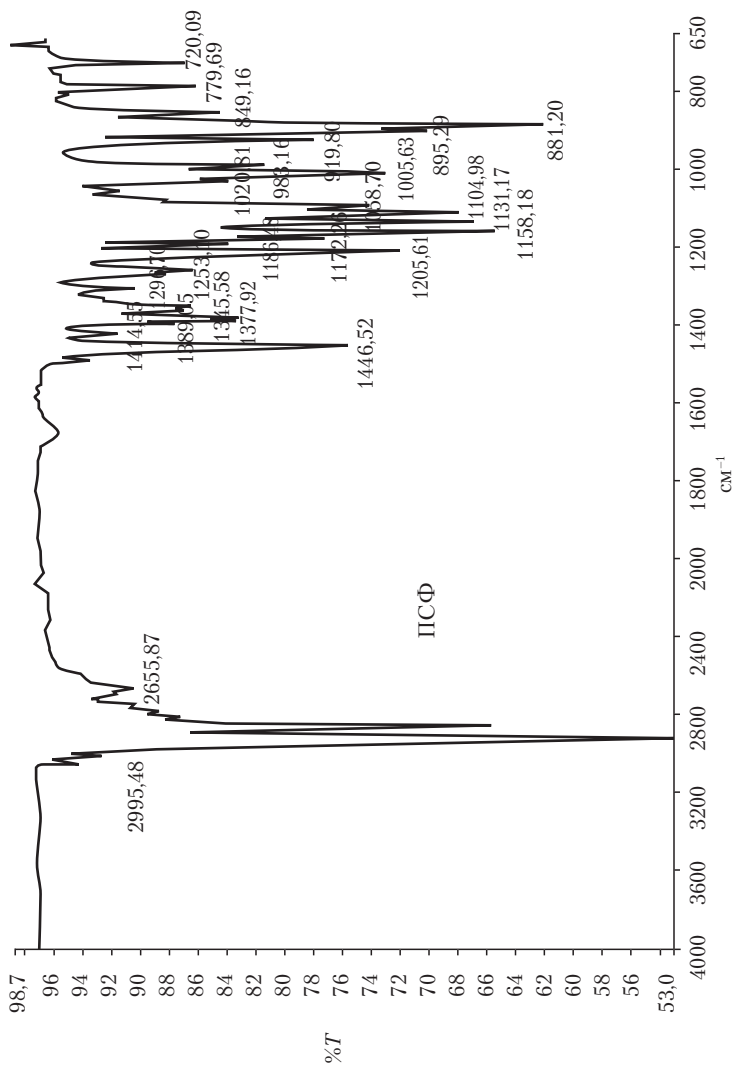












Приложение 12. Методы испытаний, определение свойств пластмасс

№	Наименование стандарта	Код ОКС	Номер стандарта
1	Пластмассы. Методы определения стойкости к горению	83.080	ГОСТ 28157–89
2	Материалы полимерные. Метод определения дымообразования	83.080	ГОСТ 24632–81
3	Пластмассы. Метод определения кислородного индекса	83.080	ГОСТ 21793–76
4	Пластмассы. Метод определения воспламеняемости	83.080	ГОСТ 21207–81 (СТ СЭВ 2900–81)
5	Пластмассы. Метод определения поведения пластмасс при контакте с раскаленным стержнем	83.080	ГОСТ 10456–80
6	Пластмассы. Методы определения стойкости к горению	83.080	ГОСТ 28157–89
7	Пластмассы. Методы определения кислородного индекса	83.080	ГОСТ 21793–76
8	Пластмассы. Методы определения воспламеняемости		ГОСТ 21207–81
9	Пластмассы. Методы определения поведения пластмасс при контакте с раскаленным стержнем	83.080	ГОСТ 10456–80
10	Материалы полимерные для космических аппаратов. Требования к проведению радиационных испытаний	83.080	ГОСТ Р 25645.332–94
11	Материалы полимерные для космической техники. Требования к испытаниям на стойкость к воздействию вакуумного ультрафиолетового излучения	83.080	ГОСТ Р 25645.338–96
12	Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов	19.040	ГОСТ 9.718–93
13	Материалы полимерные. Метод определения защитной эффективности антиоксидантов	19.040	ГОСТ 9.717–91
14	Материалы полимерные. Метод определения массовой доли химически и физически связанной воды	19.040	ГОСТ 9.719–94

№	Наименование стандарта	Код ОКС	Номер стандарта
15	Материалы полимерные. Методы испытаний на старение при воздействии влажного тепла, водяного и соляного тумана	19.040	ГОСТ 9.715–86
16	Материалы полимерные. Методы испытаний на стойкость к воздействию температуры	19.040	ГОСТ 9.706–81*
17	Материалы полимерные. Методы испытаний на стойкость к радиационному старению (с изменениями п. 1, 2)	19.020	ГОСТ 9.716–91
18	Материалы полимерные. Методы определения изменения содержания пластификатора при старении	19.040	ГОСТ 9.707–81
19	Материалы полимерные. Методы радиационных испытаний	83.080	ГОСТ 25645.323–88
20	Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение	19.040	ГОСТ 9.902–81
21	Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на коррозионную агрессивность (с изменением п. 1)	19.040	ГОСТ 9.902–81
22	Материалы термопластические. Метод определения прочности термосклеивания	83.080.20	ГОСТ 27319–87
23	Пластмассы электропроводящие. Метод определения удельного объемного электрического сопротивления при постоянном напряжении	83.080	ГОСТ 20214–74
24	Пластмассы. Изготовление образцов для испытаний из термопластов. Общие требования	83.080.20	ГОСТ 12019–66
25	Пластмассы. Изготовление образцов литьем под давлением и прессованием для оптических испытаний термопластов	83.080.20	ГОСТ 19679–74
26	Пластмассы. Качественная оценка выпотевания красителей	83.080	ГОСТ Р 50487–93 (ИСО 183–76)
27	Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с изменением п. 1)	83.080	ГОСТ 11262–80 (СТ СЭВ 1199–78)

№	Наименование стандарта	Код ОКС	Номер стандарта
28	Пластмассы. Метод испытания на сжатие	83.080	ГОСТ 4651–82
29	Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб (с изменениями п. 1, 2, 3)	83.080	ГОСТ 4648–71
30	Пластмассы. Метод определения вязкости разбавленных растворов полимеров	83.080	ГОСТ 18249–72
31	Пластмассы. Метод определения механических динамических свойств с помощью крутильных колебаний	83.080	ГОСТ 20812–83
32	Пластмассы. Метод определения миграции пластификаторов	83.080	ГОСТ 14926–81
33	Пластмассы. Метод определения пластично-вязких свойств и кинетики отверждения реактопластов	83.080	ГОСТ 15882–84
34	Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов	83.080	ГОСТ 11645–73
35	Пластмассы. Метод определения ползучести при растяжении	83.080	ГОСТ 18197–82
36	Пластмассы. Метод определения прочности на срез	83.080	ГОСТ 17302–71
37	Пластмассы. Метод определения содержания воды	83.080	ГОСТ 11736–78
38	Пластмассы. Метод определения содержания нелетучих и летучих веществ в эпоксидных смолах и композициях	83.080	ГОСТ 22456–77
39	Пластмассы. Метод определения сопротивления раскалыванию	83.080	ГОСТ 13537–68
40	Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения	83.080	ГОСТ 15173–70
41	Пластмассы. Метод определения стойкости полиэтилена к растрескиванию под напряжением (с изменением п. 1)	83.080	ГОСТ 13518–68
42	Пластмассы. Метод определения сыпучести	83.080	ГОСТ 25139–93 (ИСО 6186–80)

№	Наименование стандарта	Код ОКС	Номер стандарта
43	Пластмассы. Метод определения температуры плавления	83.080	ГОСТ 21553–76
44	Пластмассы. Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика (с изменением п. 1)	83.080	ГОСТ 15088–83 (СТ СЭВ 3760–82)
45	Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при сдавливании образца, сложенного петлей	83.080	ГОСТ 16783–71
46	Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при ударе	83.080	ГОСТ 16782–92 (ИСО 974–80)
47	Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду	83.080	ГОСТ 19109–84
48	Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи (с изменением п. 1)	83.080	ГОСТ 4647–80
49	Пластмассы. Метод определения усадки	83.080	ГОСТ 18616–80
50	Пластмассы. Метод определения электростатических свойств	83.080	ГОСТ 16185–82
51	Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования	83.080	ГОСТ 14359–69
52	Пластмассы. Методы определения водопоглощения	83.080	ГОСТ 4650–80
53	Пластмассы. Методы определения гигиенических показателей	83.080	ГОСТ 22648–77
54	Пластмассы. Методы определения золы	83.080	ГОСТ 15973–82
55	Пластмассы. Методы определения коэффициента пропускания и мутности	83.080	ГОСТ 15875–80
56	Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе	83.080	ГОСТ 9550–81
57	Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы) (с изменением п. 1)	83.080	ГОСТ 15139–69 (СТ СЭВ 891–78)
58	Пластмассы. Методы определения показателя преломления	83.080	ГОСТ 19927–74
59	Пластмассы. Методы определения содержания свободного аммиака и аммиачных соединений	83.080	ГОСТ 11233–65
60	Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред	83.080	ГОСТ 12020–72

№	Наименование стандарта	Код ОКС	Номер стандарта
61	Пластмассы. Общие требования к изготовлению образцов способом механической обработки	83.080	ГОСТ 26277–84
62	Пластмассы. Условия кондиционирования и испытаний образцов (проб) (с изменениями п. 1, 2)	83.080	ГОСТ 12423–66 (СТ СЭВ 885–78)
63	Полимеры. Метод определения вязкости ротационным вискозиметром при определении скорости сдвига	83.080	ГОСТ 25276–82

Крыжановский Виктор Константинович

Инженерный выбор и идентификация пластмасс

ISBN 978-5-91703-012-8



Редактор *Е. Попова*
Верстка *В. Земских*
Дизайн обложки *Р. Бабкиной*
Корректор *О. 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 15.10.09. Формат 60×88¹/₁₆. Усл. п. л. 13

Тираж 2000 экз. (1 завод — 1000 экз.) Заказ №

Отпечатано с готовых диапозитивов в ГУП «Типография «Наука»
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

Швейцер Ф.А.

Коррозия пластмасс и резин

Пер. с англ. под ред.
С.В. Резниченко,
Ю.Л. Морозова
600 с. Тв. пер., ил., табл.

В книге подробно рассмотрено коррозионное воздействие на термопласты, реактопласты и эластомерные полимерные материалы. Книга предназначена для специалистов, заинтересованных в коррозионной стойкости и работоспособности этих материалов.

После общего введения в состав, свойства и применение полимеров, в издание основное внимание уделяется последствиям химической коррозии, вызванной изменениями температуры, влажности и влиянием других коррозионных сред. Рассмотрена способность конкретных материалов выдерживать воздействие солнца, атмосферных явлений и озона, а также их химическая стойкость в типичных приложениях. В книгу также включены таблицы совместимости для каждого из материалов и сравнительные таблицы коррозионной стойкости отдельных эластомеров.

В издании охвачен широкий спектр полимеров, в том числе полиуретаны, полиэфиры, природные волокна, фенолы, синтетические каучуки. Описаны последствия химической коррозии, такие как набухание, окрашивание, деполимеризация и растрескивание. Подробнее



<http://ft-publishing.ru/>



интернет-магазин
plastic-books.ru

(812) 655-08-37

Каллистер У.Д., мл.

Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамики, полимеры)

Пер. с англ. под ред.
А.Я. Малкина
1000 с. Тв. пер., ил., табл.



В издании на совершенно доступном уровне, но на основании абсолютно точных физических посылок излагаются особенности структуры и свойств трех основных классов материалов, используемых в современной жизни — металлов, полимеров и керамики.

Книга прежде всего адресована студентам и преподавателям, однако огромный справочный материал, содержащийся в книге, делает ее настольной и для действующего инженера.

В российском высшем образовании обычно свойства различных материалов рассматриваются отдельно — металловедение и наука о полимерах практически не соприкасаются друг с другом, а применение различных материалов — вообще предмет отдельных дисциплин. В данной книге использован другой подход, здесь особенности строения и комплекс свойств различных материалов рассматриваются в сравнении. Это особенно оправдано тем, что сегодня по объему производства полимерные материалы практически сравнялись с выпуском металлов, и в ряде случаев керамики составляют им достойную конкуренцию.

[Подробнее](#)



<http://ft-publishing.ru/>



интернет-магазин
plastic-books.ru

(812) 655-08-37

Михайлин Ю.А.

Конструкционные полимерные композиционные материалы

822 с. Тв. пер., ил., табл.

В книге приведена информация о принципах создания, составах, структуре, свойствах, ассортименте конструкционных полимерных композиционных материалов, в основном использующих в качестве наполнителей непрерывные минеральные, полимерные, углеродные волокна и текстильные формы из них (нити, ленты, ткани). Рассмотрены армированные термореактивные и термопластичные стекло-, органо-, углепластики (ВПКМ), поливолоконистые (гибридные) ВПКМ, многослойные металл-полимерные (супергибридные) материалы. Особое внимание уделено применению конструкционных ВПКМ различных типов, экономическим вопросам разработки и применения ВПКМ.

Книга адресована специалистам, связанным с разработкой, совершенствованием и переработкой в изделия ВПКМ в различных областях техники, студентам, магистрам, аспирантам, и может быть использована преподавателями факультетов повышения квалификации инженерного состава отраслевых производств. [Подробнее](#)

<http://ft-publishing.ru/>



интернет-магазин
plastic-books.ru

(812) 655-08-37

Михайлин Ю.А.

Специальные полимерные композиционные материалы

660 с. Тв. пер., ил., табл.

В книге приведена информация о принципах создания, составах, структуре, свойствах, об ассортименте некоторых типов полимерных композиционных материалов (ПКМ) функционального (специального) назначения: интеллектуальных ПКМ (самодиагностирующихся и адаптирующихся ИПКМ, компонентах ИПКМ, обеспечивающих функциональные свойства и создаваемых с использованием достижений микросенсорики, микромеханики, микропроцессорной техники, достижений микро- и нанотехнологий); радиоэкранирующих и радиопоглощающих ПКМ (магнитодиэлектрических, токопроводящих материалов технологии *Stealth*); полимерных материалах для защиты от высокоскоростного инденторного воздействия (броневые материалы и конструкции); теплозащитных (абляционных) полимерных материалах (сублимирующихся, аблирующих через стадии плавления, аблирующих по смешанному механизму).

Книга адресована специалистам полимерных предприятий: материаловедам, технологам, конструкторам, исследователям, связанным с разработкой, совершенствованием и переработкой полимерных материалов специального назначения.

[Подробнее](#)



<http://ft-publishing.ru/>



интернет-магазин
plastic-books.ru

(812) 655-08-37

