

**Н. А. АДАМЕНКО**

**Г. В. АГАФОНОВА**

**ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ  
ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н. А. Адаменко

Г. В. Агафонова

## ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Учебное пособие*

Допущено Учебным объединением высших учебных заведений РФ по образованию в области материаловедения, технологии материалов и покрытий в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150100 Материаловедение и технологии материалов и магистерской программе «Полимерные антифрикционные материалы и технологии их получения»



Волгоград  
2013

УДК 678-419 (075)

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Технология переработки неметаллических материалов»  
Российского государственного технологического университета  
им. К. Э. Циолковского (МАТИ-РГТУ)

зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. *С. В. Бухаров*;

профессор кафедры общетехнических дисциплин ВГСПУ  
д-р техн. наук *А. М. Каунов*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Адаменко, Н. А.**

Триботехнические полимерные материалы: учеб. пособие /  
Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова ; ВолГТУ. – Волгоград, 2013. – 107 с.

ISBN 978-5-9948-1173-3

Изложены основные сведения о современных полимерных материалах, работающих в узлах трения, включая неметаллические конструкционные материалы, и видах наполнителей. Рассмотрены основные представления о трении полимеров и свойства наиболее распространенных отечественных и зарубежных антифрикционных полимерных композитов. Подробно рассмотрены антифрикционные материалы на основе фторопластов и технологии их получения. Даны методические указания по проведению лабораторных работ.

Предназначено для студентов направлений 150100.62, 150700.62 и 150400.62, магистров и исследователей в области материаловедения полимерных триботехнических материалов и может быть использовано при изучении дисциплины «Технология получения и свойства триботехнических полимерных материалов».

Ил. 16. Табл. 30. Библиогр.: 20 назв.

ISBN 978-5-9948-1173-3

© Волгоградский государственный  
технический университет, 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность и долговечность машин и механизмов во многом определяются качеством и эксплуатационными характеристиками узлов или элементов трения: подшипников, направляющих и т. д., т. е. любых кинематических пар, обеспечивающих возможность взаимного перемещения звеньев механизмов. Такое взаимное перемещение сопровождается трением и связанными с ним энергетическими потерями и износом трущихся поверхностей. Большинство машин (85–90 %) выходят из строя по причине износа деталей. Энергетические потери на трение лучших образцов оборудования составляют 30–35 %, а для сложного технологического оборудования до – 80–85 %. Затраты на мероприятия по предотвращению преждевременного износа исчисляются в развитых странах миллиардами долларов. Поэтому перед создателями техники всегда стоят задачи регулирования силы трения, в том числе за счет использования специальных материалов с повышенными фрикционными или антифрикционными свойствами.

Применение полимерных материалов в узлах трения машин (подшипники скольжения, сепараторы подшипников качения, лентопротяжные устройства, зубчатые зацепления и др.) позволяет не только заменить металлы и сплавы, но и повышает надежность и долговечность технических средств, снижая энергозатраты на их изготовление, эксплуатацию, а также улучшает экологическую обстановку при их использовании.

Проблемы трения, износа и смазки в машинах в процессе взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении изучает наука *трибология*. Она охватывает теоретические и экспериментальные исследования физических, химических, биологических и других явлений, связанных с трением.

Одной из важнейших проблем трибологии является повышение из-

носостойкости конструкционных материалов, составляющих трибосопряжения и узлы трения, именно поэтому наряду с улучшением антифрикционных характеристик снижение износа относится к приоритетным инженерным задачам.

*Трибоматериаловедение* – это раздел трибологии, изучающий связь между составом, строением, свойствами и закономерностями поведения материалов, а также их изменениями при трении и изнашивании.

*Триботехнология* – это направление в технологии машиностроения и трибологии, предметом исследования и разработки которой являются технологические методы инженерии поверхностей. В современной трибологии термин *инженерия поверхности* определяет быстро развивающуюся область технологий воздействия на поверхность, таких как нанесение покрытий, поверхностная обработка и модификация. Триботехнология охватывает две крупные области приложения трибологии:

- изучение процессов формообразования деталей узлов трения, обработки материалов разными методами во взаимосвязи с триботехническими характеристиками трибосопряжений;

- разработка технологических методов получения требуемых триботехнических характеристик поверхностей трения.

Задачи первой области – реализация процесса создания деталей с оптимизацией условий фрикционного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью путем рационального использования смазочно-охлаждающих технологических сред, назначение рациональных режимов резания и параметров геометрии инструмента, что позволяет управлять качеством поверхности трения, повышать износостойкость инструментов и снижать энергетические затраты.

Задачи второй области применения триботехнологии – управление триботехническими характеристиками поверхностей трения – решаются главным образом путем разработки специальных методов модифици-

рующей упрочняющей обработки. При этом модификация свойств поверхностных слоев трущихся деталей достигается модифицированием структуры или химического состава материалов. В этой области триботехнология тесно смыкается с трибоматериаловедением как по решаемым задачам повышения триботехнических характеристик, так и по используемым методам исследования.

Так, легковой автомобиль, имеющий массу 1000 кг, становится непригодным для ремонта, если потеря его массы от износа составит 1 кг, также подсчитано, что до списания трактора Т-130 на запасные части для ремонта и технического обслуживания нужно израсходовать столько же металла, сколько он весит сам –  $12 \cdot 10^3$  кг.

## **Глава 1**

### **ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

Проблемы трения и изнашивания привлекают большое внимание специалистов различных областей науки и техники не только в силу их многообразия, но и огромного практического значения во всех сферах материального производства.

Накопленные научные данные свидетельствуют, что процессы трения и изнашивания представляют совокупность последовательных переходов материала из одного состояния в другое. При одних условиях переходы определяются процессами упругой и пластической деформаций; при других проявляют более глубокие структурные и фазовые превращения в поверхностном и подповерхностном слоях материала.

В настоящее время стало очевидным, что вопросы повышения износостойкости деталей трибосопряжений должны рассматриваться в тесной кооперации конструкторских, технологических и триботехнических решений. В этой связи весьма значимыми становятся знания в области триботехнического материаловедения.

Создание новых триботехнических материалов базируется на реше-

нии взаимосвязанных задач трибологии, трибохимии, трибоматериаловедения. Основным направлением трибоматериаловедения является разработка многофункциональных материалов, адаптированных к определенным условиям эксплуатации, возникающим в конкретных трибосопряжениях современной техники. К числу таких материалов могут быть отнесены как традиционные металлы и их сплавы, полимеры, керамики, так и новые материалы с особыми триботехническими свойствами, в том числе материалы с «памятью», меняющие свои физико-механические свойства в зависимости от внешних воздействий (величина и характер нагрузок, температура, электрические и магнитные поля и др.).

Для всех классов композитов важным является оптимизация структуры, в частности, снижение размеров зерен до наноуровня, регулирование кинетики структурообразования с целью обеспечения заданных триботехнических и прочностных характеристик.

Концепции конструирования в современной технике часто требуют, чтобы проектируемый материал сочетал в себе противоречивые свойства, например, высокий коэффициент трения и низкую интенсивность изнашивания, высокую механическую прочность и значительную податливость, высокую прочность при низкой плотности и т. п. Для систем, работающих в экстремальных условиях, необходимы материалы с особыми свойствами (коррозионно-, температурно-, радиационно устойчивые).

Чтобы начать конструирование машины, нужно уметь многое: выбирать из нескольких возможных вариантов – аналогов конструктивного исполнения изделия (техническая система, машина, станок, механизм, узел трения, и др.) лучший по качеству (надежности, технологичности, дизайну и др.) и конкурентоспособности при минимальной стоимости. Все эти вопросы освещаются в различных дисциплинах с разных точек зрения. В данном учебном пособии указанные вопросы рассмотрены с точки зрения конструктора, материалововеда, технолога, эксплуатационника.

## 1.1. Триботехнические характеристики материалов

*Изнашивание* – процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопление его остаточной деформации, проявляющейся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

*Износ* – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах. Значение износа может выражаться в единицах длины, объема, массы и др.

*Износостойкость* – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания.

*Относительная износостойкость* – отношение интенсивности изнашивания одного материала к интенсивности изнашивания другого в одинаковых условиях (обычно один из материалов принимается за эталон). По определению М. М. Хрущова, относительная износостойкость  $s$  – это время (мин), в течение которого объемный износ образца составит 1 мм .

*Интенсивность изнашивания* – отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или к объему выполненной работы.

*Совместимость материалов при трении* – свойство материалов, сопряженных поверхностей предотвращать схватывание при трении; способность обеспечивать оптимальное состояние трибосистемы (элементов узлов трения) в заданном диапазоне условий работы по выбранным критериям.

*Прилегаемость материалов при трении* – свойство материала при трении увеличивать поверхность трения упругим и пластическим деформированием поверхностного слоя.

*Прирабатываемость* – способность трущихся тел в начальный период трения постепенно улучшать контактирование поверхностей за счет

их сглаживания, что при постоянных внешних условиях сопровождается снижением коэффициента трения, интенсивности изнашивания и уменьшением выделения тепла. Часто лучшей прирабатываемостью обладают менее износостойкие материалы, поэтому для улучшения прирабатываемости материалов с высокой износостойкостью рекомендуется наносить специальный прирабочный слой. Прирабатываемость является важной эксплуатационной характеристикой материала.

*Способность к поглощению твердых частиц* – свойство материала поглощать твердые частицы, чтобы уменьшить их царапающее или режущее действие. К таким материалам могут быть отнесены смазочные материалы.

## **1.2. Особенности трения полимеров**

Полимерные материалы весьма чувствительны к воздействию локальных температур, возникающих при трении, поэтому поиск путей повышения их термостойкости (предельной температуры, при которой начинаются химические превращения в полимере, приводящие к изменению его свойств) и торможения термоокислительной деструкции всегда остаются актуальными.

Химическая природа полимера оказывает существенное влияние на процессы деформации и разрушения поверхностей трения. В свою очередь, эти процессы вызывают активацию поверхностных слоев контактирующих деталей, определяющую интенсивность химических превращений и физико-химических взаимодействий истираемых материалов.

В металлополимерных парах трения кинетические зависимости образования вторичных структур (продуктов взаимодействия металла контртела и полимера) являются функцией роста плотности дефектов в зоне трения, т. е. зависят от нагрузки и скорости скольжения. Концентрация активного компонента в полимерном композите (при трении без смазки) контролирует образование вторичных структур.

Поверхностные слои полимера при трении находятся в сложном напряженном состоянии под действием значительных гидростатических давлений и сдвиговых напряжений, что определяет специфичность протекающих в них процессов. Механохимическая деструкция макромолекул в поверхностных слоях полимера приводит к разрыву связей, образованию свободных радикалов, которые обладают значительной активностью и могут инициировать адсорбционное пластифицирование как самого полимера, так и сопряженного с ним металла. В широком диапазоне режимов трения этот эффект может иметь как положительное, так и отрицательное значение.

Известно, что трение полимеров сопровождается реакциями окисления, деструкции и структурирования и другими процессами, приводящими к образованию на поверхности трения вторичных структур. Определяющую роль играет «трибохимическая смазка», заключающаяся во влиянии на трение полимерных композитов газообразных и низкомолекулярных продуктов трибодеструкции макромолекул.

Фрикционный перенос полимерного материала имеет место при тяжелых режимах трения металлополимерных пар. Частицы износа металлического контртела локализуются на поверхности трения полимерной детали, резко увеличивая износ контртела. Происходит дальнейшая миграция металлических частиц износа с одновременным их физико-химическим взаимодействием с продуктами распада макромолекул, что приводит к образованию активных пленок. При контакте расплавов полимеров с металлом наблюдается растворение поверхностных слоев металла. Воздействие продуктов механодеструкции молекулярных цепей полимеров – свободных макрорадикалов – на кристаллические блоки металла приводит к диспергированию и разрушению поверхности контртела.

Перенесенный материал может непосредственно участвовать в рабочем процессе, улучшать или ухудшать эксплуатационные характери-

ки машин, активно влияя на механизм трения. Полимерная пленка фрикционного переноса обладает повышенной склонностью к окислению, что способствует снижению силы трения. Перенос продуктов износа металлического контртела сопровождается рядом химических и физико-химических явлений в зоне трения с участием образовавшихся в полимере свободных радикалов. Структура оксидной пленки зависит от валентности металла: металлы с переменной валентностью обычно образуют многофазную оксидную пленку, имеющую слоистое строение в соответствии с возможными степенями окисления.

Информацию о составе продуктов фрикционного переноса в контакте металл–полимер дает метод масс-спектрометрии газов, образующихся при термическом разложении перенесенного слоя, и частиц износа. Совпадение масс-спектров летучих продуктов, образующихся при термо- и механодеструкции полимеров, свидетельствует об общих элементах этих механизмов разрушения. Ко всем полимерам, которые подвергаются термическому разложению до мономера, димера, тримера и других олигомерных молекул, образующихся в результате разрыва основной цепи, применим цепной механизм распада макромолекул.

Механизм образования перенесенного слоя на металлическом контртеле зависит от механизма разрушения полимерного материала, степени деструкции макромолекул, активности образующихся радикалов, подвижности молекулярных цепей. Трение полимеров сопровождается деструктивными и окислительными процессами с участием основной цепи и боковых ветвей макромолекулы полимера. Это приводит к образованию поверхностных слоев, по составу и структуре, как правило, отличающихся от исходного полимерного материала. Однако при исследовании изнашивания политетрафторэтилена (ПТФЭ, Ф-4), наполненного дисперсными силиконами, было выявлено, что химический состав пленки переноса идентичен составу композита.

Строение поверхностного слоя полимерной детали трения неоднородно, что обусловлено неравномерным распределением интенсивности трибохимических процессов по нормали к поверхности трения. Слой на поверхности трения полимерной детали из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) имеет низкое содержание окисленных групп, что обуславливает снижение полярной составляющей поверхностной энергии. В паре СВМПЭ-сталь на поверхности трения полимерной детали появляется незначительное количество окисленного железа в виде частиц износа размером до 30 нм и мелких сферических частиц (4 нм) кластерного типа. Это связано с взаимодействием «активных» частиц износа железа и продуктов окисления СВМПЭ. Карбоксильные группы могут выступать в качестве лигандов при взаимодействии с дисперсными частицами наполнителя, образуя кластерные материалы, что приводит к появлению на поверхности трения слоя менее окисленного полимера.

При трении полимерных материалов по металлу их интенсивная трибодеструкция может приводить к повышению износа металлического контртела. Это вызвано образованием продуктов трибодеструкции полимеров, являющихся поверхностно-активными веществами, которые способствуют диспергированию металла.

При исследованиях трения в парах полимер–металл было установлено, что в них износ металлических образцов резко ускоряется по сравнению с парами металл–металл. Для объяснения этих результатов приводится следующая модель. Микровыступы на поверхностях трения испытывают удары большой интенсивности. Из-за дискретности контакта накапливающаяся на микровыступах избыточная энергия рассеивается не сразу. В момент удара материал микровыступа переходит в наивысшее возбужденное состояние, называемое *трибоплазмой*, которое характеризуется высокой локальной температурой (более 1000 К) и сохраняется короткое время ( $<10^{-7}$  с). Такое состояние инициирует химические реакции в зоне контакта. В наполненных

полимерах наряду с процессами трибодеструкции активно протекают процессы структурирования, способствующие формированию такой структуры поверхностных слоев, которая обеспечивает высокую износостойкость, что было выявлено на полигетероариленах. Установлено, что главную роль при «сухом» трении играет явление фрикционного переноса. Данные о кинетике образования пленки переноса весьма малочисленны и разрозненны.

Для придания полимерному композиту высокой износостойкости при трении без смазочного материала реализуют следующие принципы:

- образование пластичной пленки переноса из окисленного поверхностного слоя полимерной детали;
- выделение из объема композита смазочных компонентов;
- активное участие компонентов композиционного материала в трибохимических реакциях, особенно на стадиях образования «вторичных» структур и сшивки фрагментов трибораспада макромолекул.

Идеальным является структурноанизотропный композит, у которого поверхностный слой, контактирующий с металлическим контртелом, выдерживает многократные деформации без разрушения. На сегодняшнем этапе развития полимерного материаловедения такие разработки отсутствуют. Тенденция к их созданию базируется на признании существенной роли трибохимических процессов в модифицировании поверхностей трения. Механизм модифицирования состоит в образовании износостойких «вторичных» структур, формировании пленки переноса, приспособляющейся к условиям нагружения и температурным воздействиям, обеспечении трибохимической смазки продуктами трибораспада композита. Для повышения трибоустойчивости целесообразно использовать в качестве матрицы композитов полимеры с максимальной молекулярной массой либо смеси полимеров с гибридными структурами, а также вводить в матрицу ингибиторы радикальных процессов, антиоксиданты, активные структурные модификаторы.

## Глава 2

### АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Применение пластмасс позволяет увеличить надежность и ресурс машин, улучшить их эксплуатационные, технико-экономические характеристики и технологичность, отказаться от дефицитных сплавов цветных металлов и снизить стоимость машин.

Пластмассы подразделяются на термопластичные и термореактивные. К *термопластичным* относятся пластмассы с линейной или разветвленной структурой полимеров, свойства которых обратимо изменяются при многократном нагревании и охлаждении. К *термореактивным* пластмассам относятся полимеры, в которых при термическом воздействии возникают реакции химического связывания цепных молекул друг с другом с образованием сетчатого строения. Такие пластмассы не могут переходить в пластичное состояние при повышении температуры без нарушения пространственных связей в структуре полимера.

Полимеры (термопластичные и термореактивные) могут использоваться в качестве антифрикционных материалов как в чистом виде, так и в виде композиционных материалов с различными наполнителями. В табл. 2.1 приведены коэффициенты трения основных полимеров и наполнителей, используемых для изготовления антифрикционных изделий. Существенное влияние на антифрикционные характеристики полимеров оказывают условия трения. Коэффициенты трения фторопласта-4 и некоторых других пластмасс при трении по стали 40Х и в одноименном сочетании при низких скоростях скольжения, исключая влияние фрикционного нагрева, представлены в табл. 2.2.

Из полимерных материалов изготавливают зубчатые колеса, шкивы, трущиеся элементы подшипников скольжения, кулачковых механизмов, направляющих, уплотнений, сепараторы шарикоподшипников, втулки шарниров и т. д. (табл. 2.3).

Таблица 2.1

**Коэффициенты трения по стали основных полимеров  
и их антифрикционных наполнителей**

Полимер	Коэффициент трения	Наполнитель	Коэффициент трения
ПА	0,10–0,20	Графит	0,04–0,06
ПТФЭ	0,1–0,15	MoS <sub>2</sub>	0,02–0,03
ПЭ	0,1–0,15	WS <sub>2</sub>	0,06
ПФ	0,15–0,20	MoSe <sub>2</sub>	0,02
ПК	0,30	WSe <sub>2</sub>	0,02
ПП	0,30–0,40	BN	0,07–0,40
ЭС	0,15–0,25	–	–
ФФС	0,15–0,25	–	–

Таблица 2.2

**Значения коэффициента трения, полученные при испытании по схеме  
перекрещивающихся цилиндров**

Пара трения	Сухое трение	Смазка	
		водой	маслом АУ
По капрону капрон	0,62	0,3–0,16	0,19–0,02
По текстолиту текстолит	0,31	0,29–0,12	0,18–0,11
По фторопласту-4 фторопласт-4	0,037	–	0,026
По стали 40Х			
органическое стекло	0,57–0,42	–	–
текстолит	0,51	0,31	0,21–0,18
капрон	0,46	0,30	0,22–0,08
нейлон	0,43	0,21	0,18
полиэтилен НД	0,137	0,137	0,115
фторопласт-4	0,049	–	0,027

Таблица 2.3

## Разновидности антифрикционных самосмазывающихся пластмасс

Марка материала	Основные компоненты	Метод переработки	Применение
	<i>Термопластичные материалы</i>		
П610-1-109	Полиамид П610, дисульфид молибдена, стекловолокно (30 %)	Литье под давлением	Подшипники, зубчатые колеса
ПА12-21-3	Полиамид П12, дисульфид молибдена	Экструзия	Профильные изделия, трубки
КСЦ	Полиамид ПА6, стеклонаполненный, медный порошок	Литье под давлением	Подшипники карданных шарниров
АТМ-1	Вторичный полиамид, графит, термоантрацит	То же	Втулки, шестерни, уплотнения
КСПЭ	Полиамид стеклонаполненный, полиэтилен, медный порошок	–	Тяжелонагруженные втулки при ударных нагрузках
1115 Н	Полиамид ПА6, никель	Литье под давлением в магнитном поле	Подшипники сухого трения при повышенной запыленности
Полиамид	Полиамид ПА66 и полиэтилен	Литье под давлением	Подшипники скольжения, шарниры
ПА66 ПЭ Фенилон ФА	Фенилон, полиимидное волокно	Прессование	Подшипники для абразивных сред при $T > 150^{\circ}\text{C}$
СФД-ДМ	Полиформальдегид с дисульфидом молибдена	Литье под давлением	Подшипники, уплотнения для вакуум-систем
Эстеран	Поликарбонат, наполнители	Прессование	Детали скольжения и качения
ИИАМJ5-69	Полиимид ПМ67, графит	То же	Тела качения и скольжения для ТУ 150°
Тесан	Поликарбонат, дисульфид молибдена	–	То же
ПАМ-50-67	Полиимид ПМ67, графит, нитрид бора	Прессование, механическая обработка	–
	<i>Материалы на основе фторопласта</i>		
АФГ-80ВС	Фторопласт-4, графит, кокс	Прессование	Подшипники, уплотнительные кольца
Ф-4К20	Фторопласт-4, кокс	То же	Уплотнители для вакуум-установок

Марка материала	Основные компоненты	Метод переработки	Применение
Ф-4С15В5	Фторопласт-4, измельченное стекловолокно, нитрид бора  <i>Терморезистивные материалы</i>	–	Подшипники, работающие при повышенных температурах и в агрессивных средах
АТМ-1	Новолачная ФФС, электродный графит, добавки	Прессование, карбонизация	Детали насосов, токо-съемники
Реолар 9	Резольная смола, графит, добавки	Прессование	Подшипники для высоких температур
АФ-3Т	Резольная фенолформальдегидная смола ФФС, нефтяной кокс	То же	Подшипники для агрессивных сред
АГЭН	Эпоксидно-новолачный сополимер, углеволокно, добавки	Горячее прессование	Подшипники стиральных машин
УГЭТ	Эпоксидная смола, углеволокна, тетраглицидиламин, наполнители	Намотка и горячее прессование	Подшипники для морской воды
ФАФФ-31Г	Резольная смола, отходы ДСП, графит	Прессование	Подшипники для экстремальных условий, скользяны
ЭНГ-25	Эпоксидно-новолачная смола, дисульфид молибдена, добавки	Трансферное прессование	Кулачки приборных механизмов
ЭДМА-5	Эпоксидная смола, наполнители	Холодное отверждение, мех. обработка	Антикачковые композиции, вакуум
ЭДМА-10	Эпоксидная смола, наполнители	То же	Зубчатые колеса, скользяны
АМС-1	Эпоксидкремнийорганическая смола, кокс, натрий бора	Прессование	Подшипники сухого трения
АМС-3	Эпоксидкремнийорганическая смола, графит	То же	Подшипники, работающие в керосине и при повышенных температурах

Антифрикционные материалы на основе термопластов (табл. 2.4, 2.5) отличается высокая технологичность, низкая себестоимость, хорошие демпфирующие свойства. Детали из термопластов изготавливают высокопроиз-

водительными методами – литьем под давлением и экструзией; крупногабаритные детали – центробежным литьем, ротационным формованием, анионной полимеризацией мономера непосредственно в форме, нанесением антифрикционных покрытий из расплавов, порошков, дисперсий.

Таблица 2.4

**Антифрикционные свойства материалов**

Материал	Полимер	Наполнитель	Температура металлического контролера, К	Интенсивность линейного износа, $J_h \cdot 10^{-9}$	Коэффициент трения $f$
Самип-10	Поликарбонат	Твердые смазки	373	225	0,30
М-223	Алифатический полиамид П-610	Фторлон-40	373	64	0,88
Маслянит-11	То же	Графит, пластичная смазка	423	9	0,24
Термар-Т	ПЕК	Углеродная ткань (слои ткани параллельны поверхности трения)	423	3,2	0,235
АТМ-2	Капрон	Термоантрацит	373	2,8	0,305
АМС-5	Эпоксидный+ полиалюмофенилсилоксановый	Углеродная ткань (слои ткани перпендикулярны поверхности трения)	423	2,7	0,145
ФГ-1	Ароматический полиамид	20 % коллоидного графита С-1	423	1,9	0,14
То же	То же	20 % графит	423	1,5	0,14
Графелон-20Т	Термостойкой полимер	Волокнистый наполнитель	423	1,4	0,065
Графелон-20	То же	То же	423	1,0	0,085

Таблица 2.5

**Параметры трения и изнашивания антифрикционных полимерных материалов**

Марка материала	Номинальное контактное давление, МПа	Скорость скольжения, м/с	Интенсивность изнашивания $J_h \cdot 10^{-9}$	Коэффициент трения, $f$
АМС-1	1,0	0,5	0,1	0,20
	5,0	0,5	1,0	0,08
	15,0	0,5	2,7	0,03
АМС-3	1,0	0,5	0,2	0,25
	5,0	0,5	2,2	0,1
АТМ-1	4,9	4,3	1,2	0,16
АФ-3Т	1,0	1,0	0,7	0,18
	4,0	1,0	2,5	0,09
Реолар-9	0,2	2,0	1,0	0,08
Тесан	0,2	2,0	0,7	0,06
Эстеран	0,2	2,0	0,5	0,08
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	5,4	–
	4,0	0,287	1,0	0,15
Ф-4С15	1,5	0,25	1,8	–
Ф-4К20	1,5	0,25	0,6	–
АФГ-80ВС	4,0	0,287	5,0	–
СФД-ДМ	0,8	0,3	27,0	0,18–0,26
ПА 66ПЭ	0,8	0,3	5,7	–
	18	0,12	100,0	0,08
ЭНГ-25	1,0	0,5	8,3	0,23
	18	0,12	120	–
КСПЭ	1,0	0,5	4,4	0,18
	18	0,12	170,0	–
КСЦ	1,0	0,5	1,7	0,14
	18	0,12	110,0	–
ЭДМА-5	2,0	0,06	10,0	0,22
	0,4	0,06	3,0	0,23
ЭДМА-10	2,0	0,06	20,0	0,24
	0,4	0,06	2,8	0,40
П15Н Фенилон ПА АГЭН	0,65	1,0	0,5	0,28–0,32
	2,0	1,0	0,6	–
	0,65	1,0	12,0	0,10–0,15

Термореактивные полимеры обрабатываются преимущественно методами компрессионного и литьевого прессования, они более прочны и термостойки. Порошкообразные термореактивные композиции наносят на трущиеся поверхности деталей в виде тонких покрытий. Свойства антифрикционных материалов на основе термореактивных полимеров приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

**Основные физико-механические показатели наполненных термореактивных пресс-композиций**

Показатель	Фенолоформальдегидная смола		Мочевиноформальдегидная смола	Меламиноформальдегидная смола
	Древесная мука	Минеральный порошок	Целлюлозное волокно	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1300–1500	1500–1900	1500–1600	1500–1600
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	37–65	15–60	50–95	55–85
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	140–250	100–220	190–250	170–300
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	60–95	55–85	50–95	55–85
Модуль упругости, МПа	$(0,5-1,4) \cdot 10^4$	$(1,0-2,0) \cdot 10^4$	$(0,6-0,7) \cdot 10^4$	$(0,8-1,0) \cdot 10^4$
Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	0,14–0,36	0,13–0,50	0,13–0,50	0,20–0,35

**2.1. Наполнители триботехнического назначения**

Традиционно в качестве наполнителей антифрикционных полимерных композитов применяют твердые смазочные материалы, обеспечивающие в процессе эксплуатации на поверхностях трения структуру термотропных жидких кристаллов. Как правило, такие наполнители изначально имеют слоистую структуру или приобретают ее в процессе трения. Из широкого спектра наполнителей в практике триботехнического материаловедения

дения наиболее часто используют сульфиды ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{PbS}$ ), селениды ( $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ), теллуриды ( $\text{MoTe}_2$ ,  $\text{WTe}_2$ ,  $\text{NbTe}_2$ ), оксиды переходных металлов ( $\text{PbO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ), графит, нитрид бора ( $\text{BN}$ ), бронзу, тальк, каолин, фторопласты и др.

Халькогениды тугоплавких металлов (соединения металлов с халькогенами – серой, селеном, теллуrom) обладают наименьшим коэффициентом трения, высокой температурной стойкостью, химической стойкостью в ряде агрессивных сред, хорошими смазочными свойствами, что позволяет применять их в качестве твердых смазок в антифрикционных материалах. В табл. 2.7 приведены некоторые свойства халькогенидов металлов.

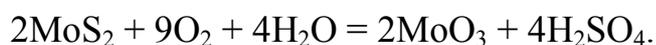
Таблица 2.7

**Свойства халькогенидов металлов**

Соединение	Плотность, $\text{Мг/м}^3$	Коэффициент трения, $f$	Предельно допустимая температура эксплуатации, $^{\circ}\text{C}$
$\text{Cu}_8\text{S}$	5,60	0,18	–
$\text{MoS}_2$	4,80–5,16	0,02–0,30	400
$\text{PbS}_2$	7,50–7,59	0,37	500
$\text{WS}_2$	7,50–7,63	0,03–1,60	500
$\text{MoSe}_2$	6,90	0,03–0,22	400
$\text{WTe}_2$	–	0,22	500

Наиболее широкое применение среди халькогенидов металлов в качестве антифрикционной смазки получил *дисульфид молибдена* – порошок свинцово-серого цвета с твердостью 20 HV, высокой несущей способностью (предельно допустимое давление в контакте  $\leq 2800$  МПа). На воздухе  $\text{MoS}_2$  сохраняет смазочные свойства в диапазоне от криогенных температур до  $400^{\circ}\text{C}$ , а в неокислительной среде – и при значительно более высоких температурах. Основным недостатком  $\text{MoS}_2$  является его химическая нестабильность во влажной атмосфере сопровождающаяся окислением

уже при температуре 80–100 °С. При трении композитов, содержащих MoS<sub>2</sub>, в атмосфере повышенной влажности реакция окисления происходит с образованием оксида молибдена и серной кислоты, способных вызвать как абразивный (MoO<sub>3</sub>), так и коррозионный (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) износ контртела:



Кроме того, для MoS<sub>2</sub> характерен «стоп-эффект», т. е. повышение коэффициента трения в начальный период эксплуатации композита, связанное с локализацией на участках фактического контакта MoO<sub>3</sub>. Последний гидрофилен и в периоды остановок узла трения поглощает из воздуха влагу, что неблагоприятно сказывается на трении MoS<sub>2</sub>. Полное обезвоживание покрытия из MoO<sub>3</sub>, осуществленное его термообработкой в вакууме при температуре 800 °С, либо бомбардировкой электронами, ионами и нейтральными атомами, привело к снижению коэффициента трения до минимальных значений – 0,01.

*Графит* – широко используемый наполнитель антифрикционного назначения, характеризуется высокой термостойкостью. Температура его плавления равна 3800 °С, а пластичным он становится при 2000 °С. Главным недостатком этого наполнителя являются низкие триботехнические характеристики в вакууме. Коэффициент трения как природного, так и пиролитического графита в вакууме более чем в 2 раза превышает коэффициент трения этих материалов на воздухе, что обусловлено десорбцией паров влаги и газов и высокой адгезией частиц графита друг к другу. В табл. 2.8 приведены значения коэффициента трения графитов и нитрида бора на воздухе и в вакууме.

При эксплуатации полимерных композиций, содержащих графит, в области низких температур (от -20 до -70 °С) наблюдается повышение коэффициента трения в 2 раза, что связано с возрастанием энергии связей, действующих между гексагональными сетками по мере уменьшения теп-

ловых колебаний в молекулах. В этом случае нарушается легкое скольжение слоистых структур графита на поверхностях трения.

Таблица 2.8

**Коэффициенты трения графита и нитрида бора по стали**

Материал	Коэффициент трения		Давление среды, МПа
	на воздухе	в вакууме	
Графит: природный пиролитический	0,19 0,18	0,44 0,50	0,6
Нитрид бора	0,25	0,70	0,2

В практике триботехнического материаловедения в качестве твердосмазочного наполнителя широко используется *нитрид бора* (табл. 2.8, 2.9). В основном применяют  $\alpha$ -модификацию BN, имеющую гексагональную решетку.

Таблица 2.9

**Теплофизические характеристики и плотность наполнителей**

Наполнитель	Плотность, Мг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость при 293–298 К, кДж/кг·К	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
Каолин	2,58	0,836–0,920	0,150–1,970
Тальк	2,40	0,872	2,100
Слюда	2,90	0,879–0,863	0,682–2,510
Диоксид титана	3,80	0,710	0,600
Нитрид бора	1,80–2,00	1,100	2,700
Дисульфид молибдена	4800	0,700	2,800
Аэросил	2650	1,124	1,080
Бронза	2500–2600	0,530	3,800
Сажа	165	–	0,166
Углеродное волокно	1760	–	22,000
Арамидное волокно	1428	1,360	0,040

Выбор наполнителя для термопластов определяется не только трибо-техническими, но и теплофизическими характеристиками твердых смазок, поскольку основными требованиями, предъявляемыми к наполнителям, являются термическая, химическая стабильность при температуре переработки полимера и высокая теплопроводность. В табл. 2.9 приведены теплофизические характеристики некоторых наполнителей.

*Металлические наполнители* применяются в виде тонких сыпучих порошков с размером частиц от 10 до 150 мкм. Частицы металлических порошков имеют различную форму: дендритную – медь, сферическую – свинец, осколочную – никель. Форма и размеры частиц металлического наполнителя определяют качество наполненных композиций. Так, фторопласт, наполненный порошком меди с частицами дендритной формы, имеет высокие прочностные характеристики, а металлическим порошком с частицами сферической формы – высокую износостойкость. Кроме того, металлические порошки при введении во фторопласт повышают теплопроводность композиций, уменьшают ползучесть, значительно увеличивают твердость и прочность при сжатии.

*Порошкообразный кварцевый наполнитель* состоит из двуокиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ) – 99,95 % с примесями  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ . Кварцевое стекло обладает очень высокой химической стойкостью к действию концентрированных минеральных кислот при высоких температурах. Исключение составляют только плавиковая и фосфорная кислоты. В качестве наполнителя чаще всего применяют пылевидный кварц маршаллит с насыпным весом 0,96–1,00  $\text{Мг/м}^3$  и удельным весом 2,6–2,65 ( $\text{Мг/м}^3$ ).

Для повышения твердости, прочности при сжатии и снижения усадки наполненных фторопластов, кроме кварца, применяются стеклопорошок, ситаллы. *Стеклопорошок* получается путем дробления и размола стекла щелочного и бесщелочного состава с удельным весом 2,5–2,6  $\text{Мг/м}^3$ . Наибольшей химической стойкостью обладает щелочное стекло, которое ре-

комендуется для получения композиций, предназначенных для работы в агрессивных средах.

*Ситаллы* или *стеклокристаллические материалы* последнее время все шире применяются в качестве наполнителей для термопластмасс. Ситаллы получают из термостойкого стекла при полной или частичной его кристаллизации, они имеют поликристаллическую структуру с размером частиц, не превышающей 2 мкм. Ситаллы обладают высокой химической стойкостью к действию большинства концентрированных кислот, частично щелочей, высокими диэлектрическими характеристиками, термостойкостью. Наполненные ситаллами термопласты обладают повышенной износостойкостью, прочностью при сжатии, твердостью.

Важными критериями выбора наполнителя являются форма и размеры частиц, их полидисперсность и характер упаковки. Оптимальной геометрической формой наполнителей триботехнического назначения являются чешуйки (*каолин, слюда, графит, тальк*). В общем случае при введении в полимер 20–30 % наполнителя с такой формой частиц увеличиваются жесткость (в 4–5 раз), теплопроводность (в 5–10 раз), твердость (в среднем на 10 %) и износостойкость (в сотни раз) композитов.

Из *волоконистых армирующих наполнителей* наибольшее распространение получили рубленое стекловолокно, асбестовое и графитовые волокна.

*Стекловолокно*, используемое в качестве армирующего наполнителя, имеет ряд преимуществ перед другими материалами – высокую прочность при растяжении, огнестойкость, атмосферостойкость, высокую химическую стойкость, низкую растяжимость и стабильность размеров. В качестве наполнителя применяют однонаправленное стеклянное волокно бесщелочного состава, изготавливаемое из алюмоборосиликатного стекла. Диаметр волокна не превышает 10 мкм. Кроме стеклянного волокна, используют рубленые стеклонити, скрученные из первичных нитей, в свою очередь состоящих из элементарных волокон диамет-

ром  $6 \pm 0,5$  мкм. Стекловолоконный наполнитель обладает высокой механической прочностью, возрастающей с уменьшением диаметра волокна, малой гигроскопичностью, высокими диэлектрическими свойствами.

Введение стекловолоконного наполнителя в сотни раз повышает износостойкость наполненных термопластов, снижает коэффициент линейного термического расширения, усадку, повышает стойкость к деформации под нагрузкой.

*Асбестовые наполнители* – волокнистые материалы природного происхождения, состоящие в основном из силикатов магния. Для наполнения полимеров, работающих в контакте со щелочами, применяют хризотилвый асбест и амфиболовый асбест в условиях действия кислот. Асбестовый наполнитель повышает сопротивление деформации под нагрузкой материала, снижает усадку, повышает износостойкость.

*Графитовые и карбонизованные волокна*, получаемые пиролизом естественных и синтетических органических волокон при температурах 700 – 900 и 2700–3000 °С; волокна диаметром от 5 до 50 мкм с содержанием углерода свыше 98 % относятся к графитовым, а волокна с содержанием углерода от 91 до 98 % – к карбонизованным (углеродистым); графитовые и углеродистые волокна обладают высокой термостойкостью, неплавкостью, химической инертностью, малым удельным весом и достаточно высокой теплопроводностью.

К *тканым наполнителям*, применяемым для армирования фторопластов, относятся стеклоткани, графитовые, базальтовые ткани др.

*Стеклоткани* вырабатываются из стеклянных нитей бесщелочного состава (для получения высокопрочных изделий) и щелочного состава (для получения изделий с высокой химической стойкостью). На основе фторуглеродных смол и стеклянных графитовых тканей получают слоистые материалы, обладающие высокой механической прочностью, химической стойкостью, малой усадкой и хорошими антифрикционными свойствами.

В качестве армирующих *наполнителей каркасного типа* возможно применение беспорядочно смятой металлической фольги толщиной 20 мкм или мелкой металлической сетки. Так, наполнение фторопласта в этом случае выполняется следующим образом: фольга из соответствующего металла (медь, нержавеющая сталь, алюминий), покрытая слоем фторопласта и термообработанная, сминается, спрессовывается и снова спекается. Металлическая фольга обеспечивает хороший теплоотвод и высокие механические характеристики, фторопласт – высокие антифрикционные свойства. Аналогичным образом получается материал на основе фторопласта и металлической сетки.

Большой интерес представляют *комбинированные наполнители*, состоящие из указанных выше наполнителей, взятых в различных соотношениях и позволяющие улучшить комплекс свойств наполненных фторопластов. Так, износостойкость наполненных фторопластов увеличивается более чем в 500 раз, теплопроводность в 5–10 раз, сопротивление деформации при сжатии в 3–4 раза, твердость на 10 % и т. д. При выборе наполнителей необходимо учитывать условия эксплуатации полимерных композиционных материалов (ПКМ): для целей химического машиностроения целесообразно применять графит, стеклопорошок и волокно, ситалл, керамику, асбест; для электроизоляционных деталей – слюду, кварцевый порошок, стеклочешуйки, стеклопенку; для пар трения, работающих без смазки – графит, дисульфид молибдена в сочетании с армирующими наполнителями (волокнистыми наполнителями).

Механизмы усиления наполненных термопластов различны, и их нельзя объяснить с какой-либо одной точки зрения. Необходимо учитывать влияние на свойства композита не только перечисленных критериев, но и химической природы наполнителя и полимера, их сродства друг к другу, фазового состояния полимера, адгезии полимера к частицам наполнителя, физико-химических процессов формирования наполненной систе-

мы и т. д. При увеличении степени наполнения или уменьшения размеров частиц наполнителя повышается роль поверхностных явлений на границах раздела фаз, так как все большая часть полимера переходит в состояние межфазного поверхностного слоя, свойства которого определяются молекулярно-поверхностными явлениями. Если объемная концентрация наполнителя достаточно велика, то полимер, адсорбированный в виде пленки на поверхности частиц, сам образует пространственную сетку, пронизывающую весь объем материала. При этом частицы наполнителя являются как бы дополнительными узлами пространственной сетки полимера. Усиливающее действие наполнителей можно связать с их ориентирующим действием и переходом полимера в состояние поверхностной пленки. Прочность таких пленок будет увеличиваться пропорционально уменьшению толщины слоя при уменьшении количества дефектов в пленке.

Характер взаимодействия с поверхностью и адгезия зависят не только от химической природы полимера и наполнителя, но и от степени регулярности цепи и молекулярной упорядоченности полимера в надмолекулярных структурах. Наиболее интересными с точки зрения влияния на последние являются структурно-активные наполнители, отличающиеся предельно малыми размерами частиц. Среди них наиболее часто в практике триботехнического материаловедения используется аэросил ( $\text{SiO}_2$ ). *Аэросил* в качестве наполнителя вызывает тиксотропный и усиливающий эффекты, повышает устойчивость композиций к расслаиванию и слипанию. Недостатком его является чрезмерное повышение вязкости и ухудшение текучести полимерных композиций.

В целом в наполненных системах твердые смазочные материалы выполняют две функции: являются компонентами композиционного материала и элементами трибосистемы, обеспечивающими низкое трение. Это обуславливает противоречивые требования к ним: с одной стороны, наполнители должны иметь хорошую адгезию к полимерному связующему, т. е.

вступать в физико-химическое взаимодействие с полимером, с другой – обеспечивать фрикционное взаимодействие с контртелом и возможность скольжения структурных слоев.

В настоящее время интенсивно разрабатывается новое направление повышения трибологических свойств полимеров – направленно модифицировать их надмолекулярную структуру. Удобным средством решения этой проблемы представляются *ультрадисперсные соединения* (УДС).

Важнейшей особенностью УДС является метастабильный характер энергонасыщенных ультрадисперсных частиц, получаемых в сильно неравновесных условиях, что обуславливает их энергичное физико-химическое взаимодействие с компонентами среды, в которой формируются частицы. Поэтому на поверхности металлических УДС всегда присутствуют оксиды, карбиды, нитриды и другие менее активные продукты взаимодействия металла с внешней средой. УДС характеризуются значительной долей «поверхностных» атомов (проценты и даже десятки процентов), которая растет при увеличении степени дисперсности. УДС представляют собой переходное состояние конденсированных веществ – макроскопические ансамбли микроскопических частиц (металлов, диэлектриков, полупроводников), с размерами порядка 1–100 нм. Основные физические свойства УДС существенно отличаются от свойств материалов в обычном состоянии. Системам с компонентами в ультрадисперсном состоянии присущи необычные свойства, не встречающиеся в массивных кристаллах.

Появление подобных свойств связано с размерными эффектами УДС. Размерные эффекты реализуются, когда размер частиц становится соизмеримым с характерным корреляционным масштабом того или иного физического явления или характерной длиной какого-либо процесса переноса (размер домена, длина свободного пробега электрона и др.) В ультрадисперсных частицах ярко проявляются все особенности поверхностных состояний, и разделение свойств на «объемные» и «поверхно-

стные» теряет смысл.

Ультрадисперсные порошки представляют собой свободнодисперсную систему, в которой вклад поверхностной энергии определяет характеристическую функцию ее состояния, а нанометровый размер частиц соизмерим или меньше сферолитных образований в полимерном связующем. УДС, имея высокую дефектность кристаллической решетки и малый размер частиц, отличаются наличием на поверхности большого числа некомпенсированных связей и, следовательно, большой реакционной способностью.

УДС, как правило, синтезируют с использованием высоких технологий – механохимии, плазмохимического и детонационного синтеза. Технология плазмохимического синтеза заключается в следующем. При получении УДС класса сиалонов твердые исходные компоненты (кремний, металлы и их оксиды) вводят в поток азотной ВЧ-плазмы, имеющей в зоне подачи порошков среднемассовую температуру 5600–6200 К. Для быстрого снижения температуры потока до температуры устойчивого существования азотсодержащих соединений кремния (~2300 К), а также для увеличения концентрации активного азота в зону реакции вводят аммиак. В результате полного испарения твердого исходного сырья синтез проходит в парогазовой среде, а продукты конденсируются в виде ультрадисперсных порошков. Продукты синтеза представляют собой отдельные частицы, либо их агрегаты. Характеристики УДС приведены в табл. 2.10.

## **2.2. Антифрикционные термопластичные материалы**

В качестве антифрикционных термопластичных материалов наиболее широко используют полиимиды, полиамиды, фторопласты, полиарилаты и другие полимеры, обладающие низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью и работающие в широком интервале температур.

**Характеристики ультрадисперсных неорганических соединений по типу  
сиалонов, полученных плазмохимическим синтезом**

Наполнитель	Средний размер частиц, нм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Элементный состав, %	Насыпная масса, кг/м <sup>3</sup>	Форма частиц
				Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
β-сиалон	50	40+5	44,5±1,5 Si 14,5±1,0 Al 9,5±1,5 O 30,5±1,5 N	$\frac{120}{3340}$	Частицы нерегулярной формы, округленные
Оксинитрид иттрия-кремния	50	35+5	53,5± 1,5 Si 7,7±0,3Y 4,0 ± 0,5 O 34,5 ± 0,5 N	$\frac{110}{3350}$	Частицы образуют сложные цепочки, агрегаты. Некоторые частицы имеют сферическую форму
Оксинитрид бора-кремния	45	40+3	5S,0±1,0 Si 5,3±0,2 B 3,0±0,5 O 33,5±1,0 N	$\frac{100}{3100}$	

### 2.2.1. Материалы на основе полиамидов

В качестве антифрикционных термопластичных материалов (табл. 2.4, 2.11) наиболее широко используют *полиамиды* (капрон, П68, П6, П12 и др.), обладающие низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью и работающие при температуре от -40 °С до +80 °С. К недостаткам полиамидов следует отнести их относительно высокое водо- и маслопоглощение. Деталям из полиамидов свойственна хорошая сопротивляемость воздействию циклических нагрузок, возможность работы без смазки в паре с закаленной сталью. Коэффициент трения полиамидов по стали без смазки 0,1 – 0,2; со смазкой маслом – в пределах 0,05–0,10.

Для повышения механических свойств полиамиды армируют волокнистыми и другими материалами, а для улучшения антифрикционных свойств в них вводят различные твердосмазочные графитоподобные компоненты.

## Характеристики материалов на основе полиамида

Марка материала	Состав	Плотность, $\rho$ , Мг/м <sup>3</sup>	Прочность $\sigma_b$ , МПа	Ударная вязкость КС, кДж/м <sup>2</sup>	Твердость НВ, МПа	Предельная рабочая температура, °С
ПА 6-1-203	ПА, графит	1,15	60-72	18-50	130	-60–165
ЛАМ-1	ПА, графит, алюминиевая пудра	1,18	53	20	200	-60–165
ПА12-11-13	ПА, MoS <sub>2</sub>	1,03	49	3-7	85	-60–165
ПА66ПЭ	ПА, полиэтилен	1,13	70	4	100	-40–80
ПА610-1-103	ПА, графит	1,12	55	50-80	–	до 120
ПА610-1	стекловолокно, MoS <sub>2</sub>	1,35	125	20-50	–	до 120
САМ-3	ПА, добавки	1,30	55	40-50	130	до 100
САМ-5	ПА, графит, добавки	1,16	47	35-51	95	до 100
ПНС610-Т10	ПА, тальк	1,16	50-60	50-80	–	до 120
МАСЛЯНИТ КСПЭ	ПА, стекловолокно, полиэтилен, медь	–	–	30	80	-50–200

В качестве последних применяют графит, дисульфид молибдена, тальк, термоантрацит, а в качестве армирующего наполнителя – мелконарубленное стекловолокно или измельченное углеродное волокно.

Температурный коэффициент линейного расширения и водопоглощение наполненных полиамидов в 1,5 – 4,0 раза меньше, коэффициент трения без смазки в 1,2 – 2,0 раза больше, а интенсивность изнашивания в 2–5 раз ниже, чем у ненаполненных полиамидов. Полиамиды применяют также в качестве тонкослойных покрытий металлических деталей.

*Ароматические полиамиды типа фенилон* применяются для изготов-

ления деталей узлов трения как в чистом виде, так и в виде композиционных материалов, наполненных фторопластом, графитом, дисульфидом молибдена и другими твердыми смазочными материалами. Детали из ароматических полиамидов отличаются высокой прочностью и теплостойкостью (табл. 2.5), их изготавливают методами компрессионного и литьевого прессования. Выпускаемый промышленностью ароматический полиамид фенилон стоек против многих химических веществ, масел, бензина. Детали из фенилона можно эксплуатировать при температурах от  $-50$  до  $+200$  °С. Наполнение фенилона твердыми смазочными материалами значительно улучшает его триботехнические свойства (рис. 2.1). Оптимальное содержание наполнителя, обеспечивающее достаточно высокие механические свойства, износостойкость и низкий коэффициент трения фенилона, составляет 10–25 %.

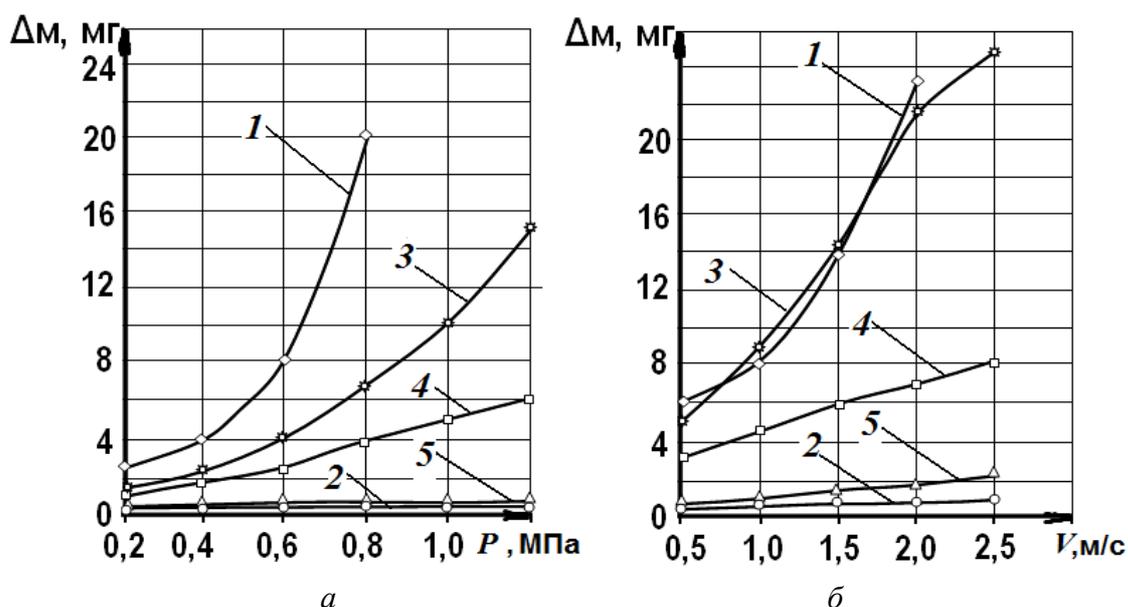


Рис. 2.1. Зависимость износа фенилона (1) и композитов на его основе от давления (а) ( $V=0,4$  м/с) и скорости скольжения (б) ( $P=0,6$  МПа):  
2– фенилон+графит; 3– фенилон+  $\text{MoS}_2$ ; 4– фенилон + BN; 5– фенилон +Φ-4

Модификация фенилона ультрадисперсными наполнителями – оксинитридом иттрия-кремния и  $\beta$ -сиалоном (табл. 2.12) позволяет повысить износостойкость на 20–100 % при одновременном снижении на 11–23 % статического и на 3–16 % динамического коэффициентов трения. Введение

в фенилон ультрадисперсных наполнителей в количестве 0,5–1,0 мас.% позволяет достигать такого же эффекта, как при его наполнении 30 % графита при сохранении и даже некотором повышении физико-механических характеристик. Аналогичные результаты также получаются при наполнении фенилона наночастицами (белая сажа и аэросил) на основе SiO<sub>2</sub> и углеродными нанотрубками.

Таблица 2.12

**Физико-механические и триботехнические свойства ПКМ на основе фенилона, наполненного ультрадисперсными наполнителями**

Наполнитель	Объемное содержание наполнителя V, %	Модуль упругости E, МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Ударная вязкость, КС кДж/м <sup>2</sup>	Износ, мг	Коэффициент трения, f
–	–	2850	231	25,0	7,3	0,45
β-сиалон	0,2	2720	237	23,2	3,0	0,39
	1	2925	245	22,9	2,8	0,34
	5	3000	242	17,0	4,0	0,35
	7,5	3000	235	14,0	4,46	0,38
	10	3154	254	13,0	4,64	0,41
Оксинитрид Y–Si	0,2	2940	237	17,0	4,0	0,38
	1	2999	242	18,1	3,5	0,38
	5	3040	245	11,2	4,5	0,41
	7,5	3040	245	13,1	4,7	0,42
	10	3160	255	10,7	5,0	0,42

Фенилон используют для изготовления подшипников скольжения, подпятников, уплотнений, зубчатых колес, сепараторов шарикоподшипников, деталей клапанов, кулачков и т. д.

## 2.2.2. Материалы на основе полиимидов

Полиимиды отличаются высокой термической и термоокислительной устойчивостью. Они начинают разлагаться на воздухе только в области температур 350 – 450 °С, а в вакууме или инертной среде – при 500 °С. Полиимиды относятся к самым радиационнотойким материалам, что в сочетании с малой летучестью делает их перспективными для применения в узлах трения, работающих в вакууме. Изделия из полиимидов могут длительно эксплуатироваться при температуре 200 – 260 °С. Например, полиимид ПМ-69 сохраняет 90 % прочности при изгибе после 500 ч работы при 250 °С и после 100 ч работы при 300 °С. Ценным свойством полиимидов является высокое сопротивление ползучести, особенно при высоких температурах. Возможность применения полиимидов для изготовления деталей высокой точности обеспечивается их малой усадкой (0,7–1,0 %) при прессовании и спекании и небольшим (0,2–0,3 %) водопоглощением.

В чистом виде полиимиды обладают плохими антифрикционными свойствами (коэффициент трения 0,6–0,7), которые резко улучшаются при введении твердосмазочных наполнителей – коэффициент трения снижается в 5–10 раз. На рис. 2.2 приведены зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от контактного давления для композиционных материалов ПАМ15-69 и ПАМ50-69 при температуре 180 °С. Коэффициенты трения с увеличением нагрузки снижаются, достигая минимума при давлении 7–8 МПа, затем незначительно увеличиваются. Интенсивность изнашивания монотонно повышается с увеличением контактного давления, повышение скорости скольжения также вызывает увеличение интенсивности изнашивания. Коэффициент трения материалов на основе полиимидов с увеличением скорости скольжения снижается.

В табл. 2.13 приведены составы и основные свойства самосмазывающихся композиционных материалов на основе полиимидов. Коэффициент трения этих материалов с увеличением скорости скольжения снижа-

ется. Детали узлов трения получают горячим прессованием. Для изготовления пористых изделий, например подшипников, к полиимиду добавляют полиформальдегид. При температуре до 340 °С наиболее эффективно работают композиции, содержащие 45 % графитированного волокна (коэффициент трения снижается до 0,05 – 0,10) при допустимом контактном давлении 350 МПа.

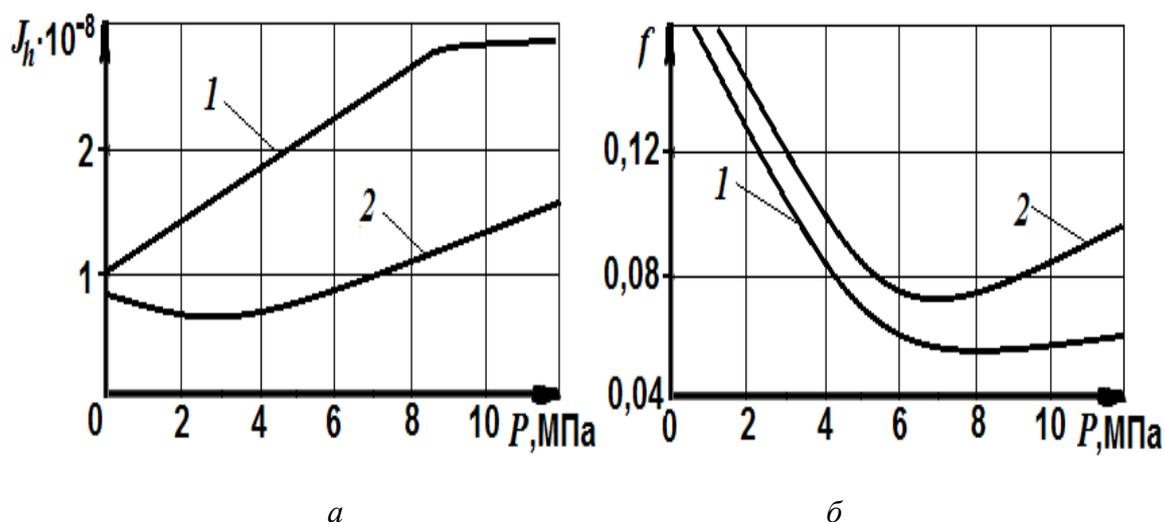


Рис. 2.2. Зависимость интенсивности изнашивания (а) и коэффициента трения (б) от величины контактного давления для различных композиционных материалов: 1 – ПАМ 15-69; 2 – ПАМ 50-69

Подшипники, изготовленные из наполненного полиимида с хаотично ориентированными графитированными волокнами, надежно работают при давлении до 28,5 МПа и имеют износостойкость при 50 и 315 °С соответственно в 7 и 1,5 раза большую, чем в случае ориентации графитовых волокон вдоль направления скольжения.

Для работы в области криогенных температур применяют полиимиды, наполненные бронзой. Фирма «Баден» (США) разработала самосмазывающиеся шарикоподшипники, работоспособные в интервале температур -50 +260 °С при частоте вращения до 800 с<sup>-1</sup>. Сепаратор этих подшипников изготавливают из пористых полиимидных материалов SP-8 и SP-811.

## Характеристики материалов на основе полиимида

Марка материала	Состав	Плотность $\rho$ , Мг/м <sup>3</sup>	Прочность, $\sigma_v$ , МПа	Ударная вязкость КС, кДж/м <sup>2</sup>	Твердость НВ, МПа	Предельная рабочая температура, °С
Полиар-2	ПМ-67, MoS <sub>2</sub>	1,3	–	50	140	-196–300
Тесан-38	ПМ-69, MoS <sub>2</sub>	1,3	–	30	140	-196–250
ПМ-67-ДИ-3	ПМ-67, MoS <sub>2</sub>	1,43	90–130	20–70	210–310	-196–250
ПМ-69-ДМ-3	ПМ-67, MoS <sub>2</sub>	1,45	85–120	30–50	210–280	до 250
ПМ-67-Г10	ПМ-67, графит	1,45	70–98	8–30	230–330	до 250
ПМ-69-Г5	ПМ-69, графит	1,47	70–90	20–40	220–330	до 250
ПАМ 15-67	ПМ-67, графит	1,42	80–100	16–30	300	-196–250
ПАМ 15-69	ПМ-69, графит	1,42	65–80	7,8	330	-196–250
ПАМ 50-67	ПМ-7, графит, нитрид бора	1,62	44–45	1,5–5,0	270–300	-196–250
ПАМ 50-69	ПМ-69, графит, нитрид бора	1,5–1,6	30–38	5,0	300	-196–250

Недостатком материалов на основе полиимидов является большая скорость газовой выделенной, что в некоторых случаях ограничивает их использование в вакуумной технике, а также хрупкость, предъявляющая особые требования к технологии обработки деталей. Кроме того, эти материалы имеют высокую стоимость. Поэтому их применяют лишь для изготовления ответственных деталей подвижных сопряжений, работающих в экстремальных условиях.

## 2.2.3. Материалы на основе поликарбоната

Композиционные материалы на основе поликарбоната относятся к перспективным для деталей узлов трения благодаря высоким механиче-

ской прочности и ударной вязкости, малой ползучести, стабильности свойств и размеров деталей в широком интервале температур, стойкости к атмосферным воздействиям. Эти материалы устойчивы к ультрафиолетовому излучению и резким перепадам температур, но имеют ограниченную стойкость к действию ионизирующего излучения. Поликарбонат стоек к атмосферным воздействиям, воды, водных растворов минеральных кислот и солей, окислителей, масел, в то же время он растворяется в ряде углеводородов (ацетон, толуол и др.), набухает в бензине.

Материалы на основе поликарбоната применяют для деталей уплотнений, клапанов и других элементов, работающих в вакууме, в инертной газовой и других средах при температурах  $-50 - 110^{\circ}\text{C}$ . Освоено производство антифрикционного поликарбоната – дифлона, наполненного 25 % по массе стекловолокном (дифлон СТН), наполненного фторопластом (дифлон ДАК 8) и BN (дифлон ДАК-12-3BN). У этих материалов сохраняются высокие физико-механические и диэлектрические свойства поликарбоната и одновременно в 1,5–2,0 раза улучшаются антифрикционные свойства. В табл. 2.14 приведены состав и свойства некоторых материалов на основе поликарбоната.

К недостаткам поликарбоната следует отнести склонность к образованию микротрещин в поверхностном слое под влиянием остаточных напряжений после механической обработки и вследствие инородных включений и микропор. Поэтому обязательной финишной операцией должна быть термообработка для снятия остаточных напряжений.

#### 2.2.4. Материалы на основе полиолефинов

Расширяется применение *полиолефинов* (полиэтилен высокого давления, полипропилен) в качестве антифрикционных материалов как в чистом виде, так и в композициях с наполнителями. Полиолефины стойки к действию большинства кислот, щелочей, не растворяются в органических

растворителях при 20 °С. Однако сильные окислители (азотная кислота и др.), хлор, фтор разрушают их, и при повышенных температурах они растворяются во многих органических растворителях.

Таблица 2.14

**Материалы на основе поликарбонатов**

Марка материала	Состав	Плотность, $\rho$ , Мг/м <sup>3</sup>	Прочность, $\sigma_B$ , МПа	Ударная вязкость, КС, кДж/м <sup>2</sup>	Твердость, НВ, МПа	Предельная рабочая температура, °С	Метод переработки
ДАК-8	Поликарбонат, фторопласт-4	1,23	50–55	105	87	115	Литье под давлением
Эстеран-29	Поликарбонат, MoS <sub>2</sub>	1,30	–	6	200	100	Прессование
Эстеран-35	Поликарбонат, MoS <sub>2</sub>	1,41	52	30–70	140	100	Литье под давлением
Эстеран-51	Поликарбонат, MoS <sub>2</sub>	1,25	60	100–200	100	100	Литье под давлением
ДАК-12-3BN	Поликарбонат, BN	1,20	55	–	90	100	Литье под давлением
ДАК-УП15Д	Поликарбонат, графит	1,25	90	–	–	–	Литье под давлением

На основе полиолефинов создают композиционные материалы, вводя различные наполнители (сажу, каучук, стекловолокно, древесные опилки и т. д.), что позволяет получать материалы, обладающие высокой износостойкостью и коэффициентом трения 0,1–0,15. Экспериментальные исследования композиционных материалов на основе полиэтилена показывают, что повышение износостойкости у большинства композиций не сопровождается улучшением механических свойств, а в ряде случаев прочность и модуль Юнга снижаются при резком повышении износостойкости. У изделий из материала с волокнистым наполнителем значительно повышается размерная стабильность, а при использовании в качестве наполнителей металлических порошков резко увеличиваются теплопроводность, электропроводность и некоторые другие характеристики. К недостаткам свойств

полиолефинов следует отнести низкую теплоемкость, так как детали узлов трения могут длительно эксплуатироваться при температуре не выше 60 °С (кратковременно до 80 °С). Это снижает возможность применения полиолефинов в машиностроении.

#### 2.2.5. Материалы на основе полиарилатов

Широкое применение в машино- и приборостроении находят антифрикционные самосмазывающиеся материалы на основе полиарилатов для изготовления деталей подшипников скольжения и качения, предназначенных для работы в глубоком вакууме без смазки.

Полиарилаты марок Ф-1, Ф-2, ДВ, Д-4 и др. в чистом виде имеют высокий коэффициент трения (0,35–0,40) и относительно невысокую износостойкость. С целью улучшения триботехнических характеристик и повышения теплостойкости в полиарилат добавляют фосфор, дисульфид молибдена, медь и серебро. Например, композиционный материал Делан-524 на основе полиарилата ДВ-101 с добавкой 15 % (массовая доля) дисульфида молибдена обладает самой высокой теплостойкостью среди полимерных материалов, перерабатываемых литьем под давлением.

Чистый полиарилат марки ДВ имеет нестабильные триботехнические характеристики из-за высокой величины адгезионной составляющей силы трения в результате наличия гидроксильных групп и макромолекул.

Высокими антифрикционными свойствами (табл. 2.15) обладают пластики на основе полиоксибензоила (эконол, аропласт А-1). Хотя коэффициент трения по стали высок (0,3 против 0,04–0,2 для политетрафторэтилена), область  $PV$  (произведения давления на линейную скорость) шире, чем в случае фторлона и нейлона, и лишь несколько уже, чем у стеклонанполненного фторлона и бронзы.

При наполнении полиоксибензоила 20 % (масс.) Ф-4 его износостойкость значительно превосходит износостойкость фторлона и бронзы (без

смазки) (рис. 2.3). Минимальный износ при трении имеет эконол, наполненный стеклом и графитом.

Известны композиции Ф-4 и А-1 с добавлением дисульфида молибдена и оксидонитридных наполнителей, концентрата нефтяных высокомолекулярных соединений – флуорекса, углеродного волокна, которые расширяют температурный диапазон эксплуатации, снижают электризацию узла трения, повышают износостойкость. Скорость износа эконола (вследствие хорошей теплопроводности тепло, выделяющееся при трении, быстро отводится от поверхности) мало зависит от температуры и составляет от 0,018 до 0,043 мм при ее изменении от 20 до 515 °С.

Таблица 2.15

**Свойства пластиков на основе эконола**

Свойства	Эконол	Наполнитель				
		5 % поли-тетра-фтор-этилена	20 % поли-фелен-сульфида	10 % гра-фитового порошка	20 % карбида кремния	60 % порошка алюминия
Плотность, $P$ , Мг/м <sup>3</sup>	1,44	1,45	1,36–1,44	1,46	1,53	2,06
Разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_{в}$ , МПа	17,6	13,0	19,0	7,5	10,6	18,5
при изгибе $\sigma_{изг}$ , МПа	39,4	31,6	59,8–61,2	20,0	39,4	44,2
Модуль упругости $E$ , МПа						
при растяжении	4300	4100	410	480	460	810
при изгибе	7200	6100	8100	7700	7800	14300
Относительное удлинение, $\varepsilon$ , %	0,44	0,65	0,048	0,29	0,28	0,29
Коэффициент трения $f$	0,3	0,34	0,34	0,31	–	0,22

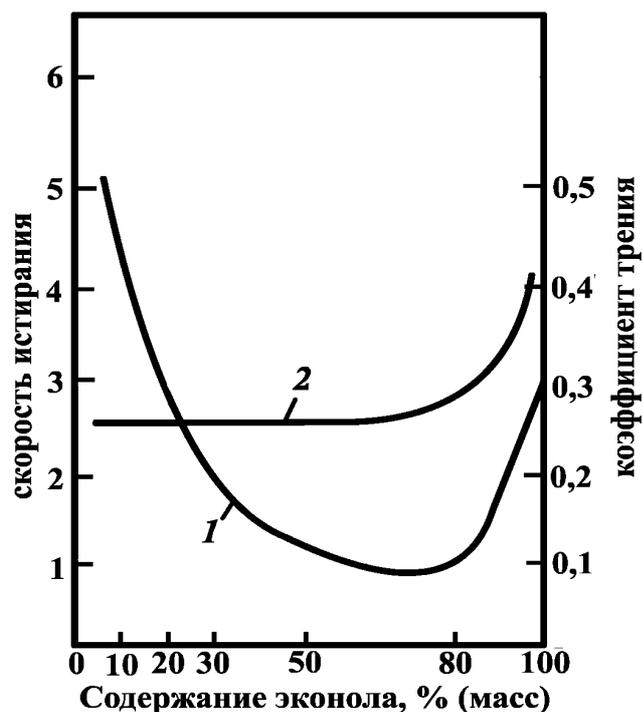


Рис. 2.3. Зависимости скорости истирания (1) и коэффициента трения (2) образцов от содержания эконола в смеси эконол – ПТФЭ (нагрузка 0,4 Мпа; скорость 60 м/мин; время 0,5 ч)

Из пластиков на основе эконола изготавливают подшипники скольжения, шестерни, клапаны, втулки, лопатки (детали насосов), покрытия, диски сцепления, уплотнения в компрессорах авиационных двигателей, дисковые тормоза, футеровку труб и аппаратуры на химических заводах и многие другие изделия, от которых требуется износостойкость, стабильность размеров и устойчивость к коррозии.

#### 2.2.6. Материалы на основе полиэфирэфиркетона

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК, РЕЕК) – линейный полукристаллический полимер (термопласт) с высокими механическими и термическими свойствами. Имеет высокие физико-механические свойства, которые стабильны под действием нагрузки, низкий коэффициент трения. сохраняет свои великолепные механические свойства, жесткость и сопротивление ползучести даже при высоких температурах и воздействии химических веществ (в отличие от фторопласта). Единственный в своем роде имеет

высокий предел прочности при растяжении и предел выносливости при изгибе для знакопеременного цикла (высокая вязкость и усталостная прочность). Стоек к излучениям высокой энергии (рентген, гамма-излучения). Даже ультрафиолетовые лучи приводят только к легкому изменению цвета материала. Полиэфирэфиркетон – самый устойчивый из термопластов к действию водяного пара.

Существенным недостатком изделий из ПЭЭК является высокий коэффициент трения. Для его снижения в композиции на основе ПЭЭК вводят различные наполнители, при этом удается повысить и прочностные свойства полимера (табл. 2.16).

Таблица 2.16

**Полиэфирэфиркетон, наполненный стекло- (СВ) и углеволокном (УВ)**

Свойства	ПЭЭК	ПЭЭК+ +30 % СВ	ПЭЭК+ +30 % УВ
Прочность при разрыве, $\sigma_b$ , МПа	110	190	250
Относительное удлинение, $\epsilon$ , %	25	2,3	1,7
Модуль упругости при растяжении, $E$ , МПа	3790	12000	25000
Прочность на изгиб, $\sigma_{изг}$ , МПа	165	290	360
Модуль изгиба, $E$ , МПа	4100	12000	22000
Прочность на сжатие, $\sigma_{сж}$ , МПа	120	250	300
Плотность, $\rho$ , Мг/м <sup>3</sup>	1,32	1,52	1,41

Перспективно для снижения коэффициента трения и уменьшения износа в ПЭЭК введение политетрафторэтилена (ПТФЭ) и SiC. Увеличение содержания карбида кремния приводит к постепенному уменьшению коэффициента трения материала. Самый низкий коэффициент трения наблюдается, когда содержание SiC достигает 9,40 % (рис. 2.4), а для наилучшего сочетания коэффициента трения и интенсивности изнашивания содержа-

ние карбида кремния должно быть равно 3,3 %.

При содержании ПТФЭ 5 %. интенсивность изнашивания материала резко уменьшается. Наименьшая интенсивность изнашивания композита наблюдается при содержании ПТФЭ 20 %, выше 20 % - она возрастает, хотя и остается более низкой по сравнению с чистым ПЭЭК (рис. 2.5).

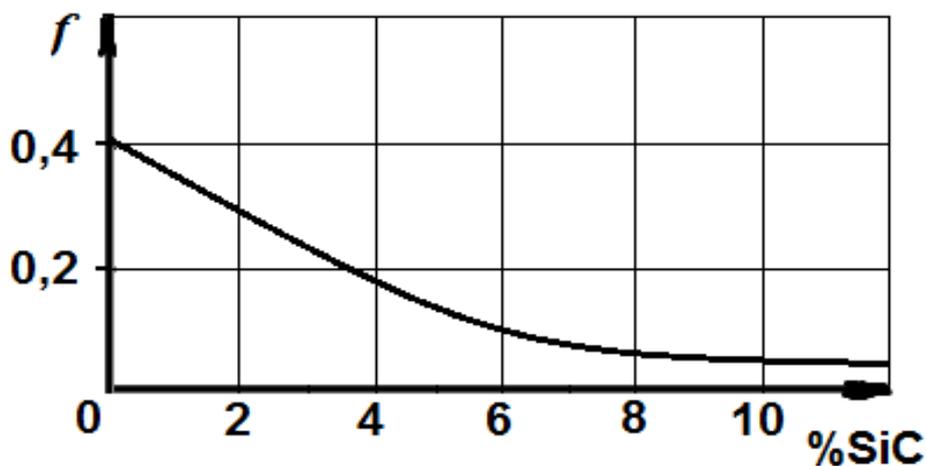


Рис. 2.4. Зависимость коэффициента трения ( $f$ ) наполненного ПЭЭК от содержания карбида кремния (SiC)

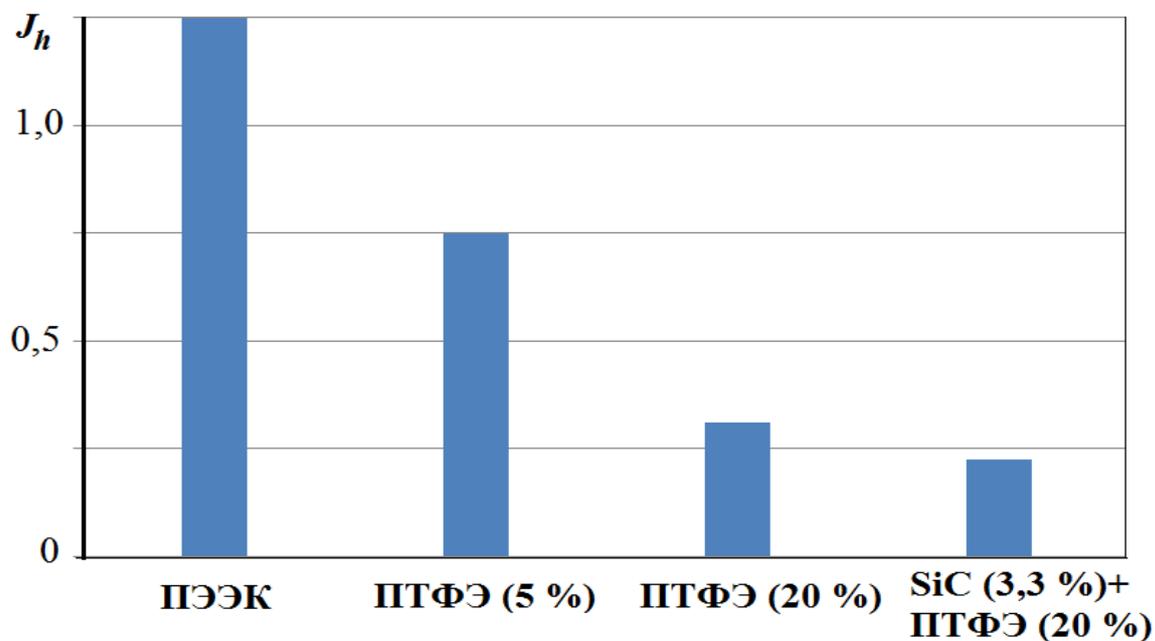


Рис. 2.5. Относительная интенсивность изнашивания наполненного ПЭЭК

Хорошие результаты получены и при совместном введении ПТФЭ и SiC в ПЭЭК (рис. 2.5). Материал SiC (3,3 %)-ПТФЭ (20 %)-ПЭЭК работоспособен в широком диапазоне температур (-100...+300 °С), скоростей и нагрузок, работает без смазки, с традиционными смазочными материалами и с жидкостями, не обладающими смазочными свойствами (топливом, водой, растворителями). Материал не повреждает сопряженную стальную поверхность при тяжелых (и аварийных) режимах работы.

## **2.3. Антифрикционные термореактивные материалы**

### **2.3.1. Материалы на основе эпоксидных смол**

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол нашли применение для деталей трибосопряжений вследствие хорошей адгезии эпоксидных полимеров к металлам и другим материалам, высокой механической прочности, малой усадки и водопоглощения. Наряду с традиционными наполнителями (графит, кокс, дисульфит молибдена, оксиды металлов, различные волокнистые материалы и т. п.) в эпоксидные смолы вводят олигомеры, полиэтилен, кремнийорганические смолы, двуокись титана и другие специальные добавки, что значительно увеличивает твердость, жесткость, нагрузочную способность и износостойкость композиционных материалов. Свойства некоторых антифрикционных материалов на основе эпоксидных смол приведены в табл. 2 17.

Наиболее широкое применение получили композиционные материалы марок АМС-1, АМС-3, АМС-5М (табл. 2.4, 2.17), отличающиеся высокой механической прочностью, износостойкостью, термостойкостью и низким коэффициентом трения. Из этих материалов изготавливают поршневые кольца компрессоров, работающих без смазки, торцевые уплотнения, подшипники скольжения для узлов сухого трения с нормальной влажностью при повышенных температурах, лопасти воздушных ротационных насосов.

## Материалы на эпоксидной основе

Марка материала	Состав	Плотность, $\rho$ , Мг/м <sup>3</sup>	Предел прочности $\sigma$ , МПа	Номинальное контактное давление, $P$ , МПа	Скорость скольжения, $V$ , м/с	Интенсивность изнашивания, $J \cdot 10^{-8}$	Коэффициент трения $f$
АМС-1	Эпоксикремний – органическая смола, кокс, нитрид бора	1,77	–	5,0	0,5	0,1	0,08
АМС-3	Эпоксикремний – органическая смола, электродный графит, кристаллический графит	1,79	–	5,0	0,5	0,22	0,10
АМС-5М	Эпоксикремний – органическая смола, углеродная ткань	1,23	–	2,0	0,5	0,05	0,11
ЭДМА-10	Эпоксидная смола, наполнитель	1,90	8,0	2,0	0,06	2,0	0,23
Э10Н5	Эпоксидная смола, графит, никель	1,35	9,5	0,65	1,0	1,2	0,35

Триботехнические характеристики материалов значительно зависят от условий эксплуатации. На рис. 2.6 приведены зависимости массовой скорости изнашивания и коэффициента трения от номинального давления при трении без смазки по стали 45 при скорости скольжения 1 м/с.

Повышение температуры от 50 до 250 °С вызывает снижение коэффициента трения композиционных материалов в 1,5–2 раза, при дальнейшем повышении температуры до 300 °С коэффициент трения практически не изменяется или незначительно возрастает.

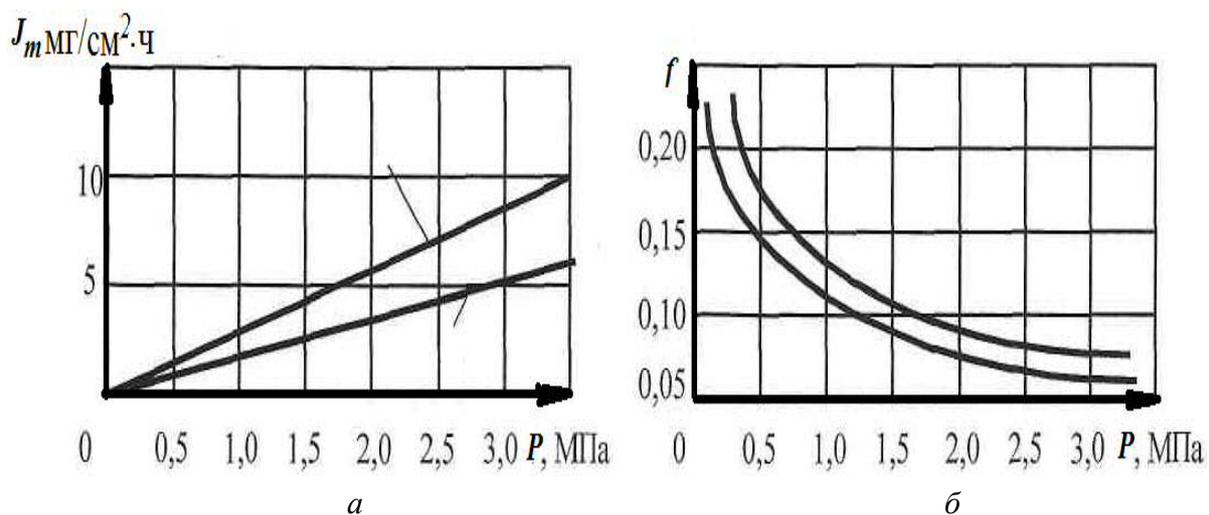


Рис. 2.6. Зависимость скорости изнашивания (*a*) и коэффициента трения (*б*) от номинального контактного давления для материалов: 1 – АМС -1; 2 – АМС-3

### 2.3.2. Материалы на основе фенолформальдегидных полимеров

Фенолформальдегидные полимеры (ФФП) широко применяют при создании антифрикционных полимерных материалов вследствие их повышенной термической и химической стойкости и износостойкости. Для улучшения триботехнических свойств вводят специальные наполнители (графит, свинец,  $\text{MoS}_2$ , оксиды алюминия, железа и меди, а также базальтовые, стеклянные и углеродные волокна, технический углерод, асбест, различные волокна), что позволяет получить самосмазывающиеся материалы с низким коэффициентом трения без смазки (0,04–0,06) и интенсивностью изнашивания ( $10^{-9}$ – $10^{-10}$ ) для подшипников скольжения, уплотнений, направляющих, работающих при повышенных температурах. Известны самосмазывающиеся материалы на основе ФФП следующих марок: АТМ-1, АТМ-IT, Вилан-9Б, Синтек-2, АМАН-24. Материал марки АТМ-1 обладает высокими износостойкостью и теплопроводностью, но он хрупок, и поэтому его применяют в узлах трения, не работающих при ударных нагрузках. Для устранения этого недостатка используют волокнистые наполнители (углеродные и органические волокна) или ткани, например, в материалах марки Синтек.

## 2.4. Резины

Коэффициенты кинетического и особенно статического трения резины без смазки высокие (до 0,8). Как антифрикционный материал резину применяют прежде всего в подшипниках при смазке их водой. Особое преимущество по сравнению со всеми другими антифрикционными материалами резина имеет в случае наличия в смазочной среде абразивных частиц (например песка).

Попадая в зазор между металлическим валом и резиновым подшипником, они вдавливаются в упругодеформируемый подшипник, не внедряясь в него. Вследствие легкой деформируемости резины при остановке вала в зазоре между ним и подшипником может сохраниться тонкая прослойка воды, облегчающая последующий старт.

При изготовлении подшипников предпочтение отдается мягким резинам. Резину можно применять при температурах до 110 °С. Она широко используется и в уплотнительных устройствах, в которых в качестве смазок применяют различные гидроксилсодержащие соединения, не вызывающие ее заметного набухания.

Существенный недостаток обычных типов резин как антифрикционных материалов – их способность корродировать углеродистые стали, что приводит к необходимости облицовывать вал нержавеющей сталью или сплавами цветных металлов.

## 2.5. Древесные пластики

Для изготовления подшипников, работающих на смазке водой, применяют древесно-слоистые пластики (ДСП), у которых направление древесных волокон во всех листах шпона совпадает, причем рабочая поверхность подшипника должна быть образована торцами волокон. Это улучшает износостойкость подшипников и уменьшает изменение зазора между телом подшипника и валом под влиянием водопоглощения дре-

весно-слоистым пластиком. Для шестерен используют древесно-слоистые пластики с одинаковыми механическими свойствами во всех направлениях. Древесно-слоистые пластики, применяемые как антифрикционные материалы, содержат до 18–22 % связующего – фенолоформальдегидной смолы.

Прессовочные композиции из пропитанных резольной смолой древесной пресскрошки, опилок, кусочков ткани и т. д. также применяют как антифрикционный полимерный материал. При пропитке этих наполнителей раствором смазочного масла в резольной смоле и введении в материал графита получают самосмазывающиеся антифрикционные полимерные материалы.

Из многочисленных сортов древесины как антифрикционный материал для подшипников, работающих на воде, ограниченное применение находит бакаут. Эта древесина содержит до 22–26 % гваяковой смолы, придающей ее поверхности «жирность». Бакаут в свободном состоянии поглощает до 12–18 % воды. Особенности применения бакаута в подшипниках те же, что и для древесно-слоистых пластиков.

В настоящее время разрабатываются древесно-металлические композиционные материалы, состоящие из модифицированной древесины и введенной в нее металлической фазы различного состава, формы и дисперсности. Наиболее целесообразно при создании вкладышей подшипников скольжения использовать сферические металлические и биметаллические составляющие из алюминия, меди или сплавов на их основе.

За счет того, что в древесине, обладающей высокими виброгасящими свойствами, размещаются металлические элементы, обеспечивающие повышенные теплопроводность и износостойкость, снижается тепловая нагрузка на пятнах фрикционного контакта в подшипниках скольжения. В результате эти материалы обладают повышенными антифрикционными, демпфирующими и теплофизическими свойствами и могут эффективно использоваться в разнообразных узлах трения машин.

**Глава 3**  
**АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**  
**НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА-4**

**3.1. Общие сведения о фторопласте-4**

Политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон) обладает исключительной стойкостью ко всем кислотам, растворителям, нефтепродуктам, щелочам (кроме щелочных металлов) в широком интервале температур (рабочий интервал длительной эксплуатации для изделий из фторопласта-4 от минус 269 °С до плюс 260 °С), инертностью, стойкостью к водяному пару, климатическим и бактериальным воздействиям, достаточно высокой прочностью, отличными диэлектрическими, антифрикционными и антиадгезионными свойствами. Выпускается в виде легко комкующегося порошка белого цвета без видимых включений.

В качестве матрицы применяют не только Ф-4, но и другие фторопласты. В России фторопласт-4 производится в соответствии с ГОСТ 10007–80, который предусматривает выпуск нескольких марок Ф-4:

С – для изготовления специзделий;

П – для изготовления электроизоляционной и конденсаторной пленок;

ПН – для изготовления электротехнических изделий и других изделий повышенной надежности, а также электроизоляционных, изоляционных и пористых, вальцованных пленок и прокладочной ленты (допускается в отдельных случаях при отсутствии фторопласта-4 марки С применять фторопласт-4 марки ПН для изготовления изделий спецназначения);

О – для изготовления изделий общего назначения и композиций;

Т – для изготовления толстостенных изделий и трубопроводов.

Условное обозначение фторопласта-4 состоит из названия материала и сокращенного указания марки. Например: Фторопласт-4 П ГОСТ 10007–80 или Фторопласт-4 С ГОСТ 10007–80.

#### *Фторопласт-4 марки О*

##### Характеристики:

- зарубежные аналоги: TEFLON 7, FLUON G 163,190, ALGOFLON F, HOSTAFLON TF 1702, POLYFLON M 12, 14;
- массовая доля влаги: не более 0,02 %;
- плотность: не более 2,2 Мг/м<sup>3</sup>;
- прочность при разрыве не менее 23,0 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: не менее 350 %;
- термостабильность при температуре 415 °С: не менее 100 ч.

Применение: используется для изготовления изделий общего назначения и композиций.

#### *Фторопласт-4 марки П*

##### Характеристики:

- зарубежные аналоги: TEFLON 7, FLUON G 163,190, ALGOFLON F, HOSTAFLON TF 1702, POLYFLON M 12, 14;
- массовая доля влаги: не более 0,02 %;
- плотность: не более 2,18 Мг/м<sup>3</sup>;
- прочность при разрыве: не менее 26,0 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: не менее 350 %;
- электрическая прочность при постоянном напряжении при толщине образца 0,100±0,005 мм не менее 60 кВ/мм;
- термостабильность при температуре 415°С: не менее 100 ч.

Применение: используется для изготовления электроизоляционной и конденсаторной пленок.

#### *Фторопласт-4 марки ПН*

##### Характеристики:

- зарубежные аналоги: TEFLON 7, FLUON G 163,190, ALGOFLON F, HOSTAFLON TF 1702, POLYFLON M 12, 14;
- массовая доля влаги: не более 0,02 %;

- плотность: не более 2,19 Мг/м<sup>3</sup>;
- прочность при разрыве: не менее 25,0 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: не менее 350 %;
- электрическая прочность при постоянном напряжении при толщине образца 0,100±0,005 мм: не менее 50 кВ/мм;
- термостабильность при температуре 415 °С: не менее 100 ч.

Применение: используется для изготовления электротехнических и других изделий повышенной надежности.

#### *Фторопласт-4 марки С*

Характеристики:

- зарубежные аналоги: TEFLON 7, FLUON G 163,190, ALGOFLON F, HOSTAFLON TF 1702, POLYFLON M 12, 14;
- массовая доля влаги: не более 0,02 %;
- плотность: не более 2,18 Мг/м<sup>3</sup>;
- прочность при разрыве не менее 27,0 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: не менее 350 %;
- электрическая прочность при постоянном напряжении при толщине образца 0,100±0,005 мм: не менее 50 кВ/мм;
- термостабильность при температуре 415 °С: не менее 100 ч.

Применение: используется для изготовления изделий высокой надежности в ответственных узлах машин и механизмов, в том числе для аэрокосмической и военной техники.

#### *Фторопласт-4 марки Т*

Характеристики:

- зарубежные аналоги: TEFLON 7, FLUON G 163,190, ALGOFLON F, HOSTAFLON TF 1702, POLYFLON M 12, 14;
- массовая доля влаги: не более 0,02 %;
- плотность: не более 2,21 Мг/м<sup>3</sup>;
- прочность при разрыве: не менее 15,0 МПа;

- относительное удлинение при разрыве: не менее 280 %;
- термостабильность при температуре 415 °С: не менее 15 ч.

Применение: используется для изготовления толстостенных изделий.

#### *Фторопласт-4А*

Характеристики:

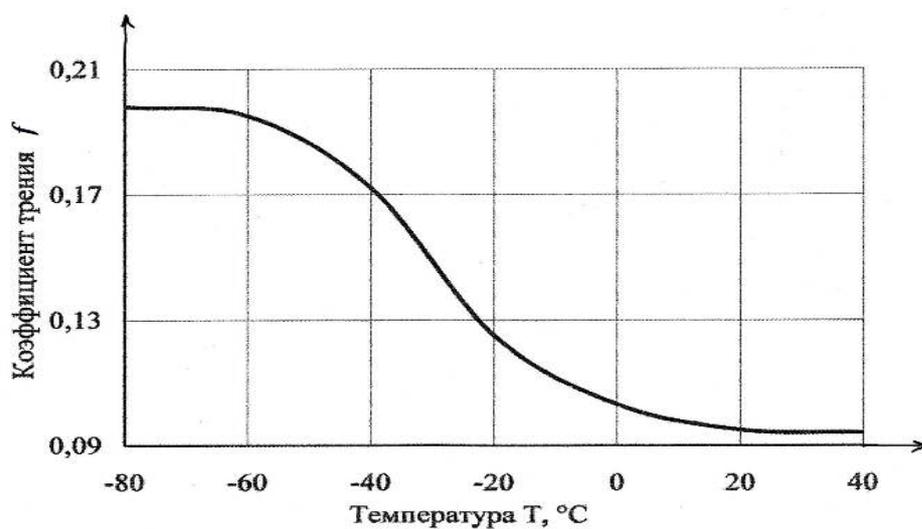
- зарубежные аналоги: TEFLON 8, HOSTAFLON TF 1640, POLYFLON M30, FLUON G 307;
- насыпная плотность: не менее 650 Мг/м<sup>3</sup>;
- прочность при разрыве: не менее 21,0 МПа;
- относительное удлинение при разрыве: не менее 250 МПа

Фторопласт-4А – агломерированный фторопласт-4. Более технологичен в переработке, не комкуется и не слипается при транспортировке и хранении. Выпускается в виде свободнотекучего порошка белого цвета.

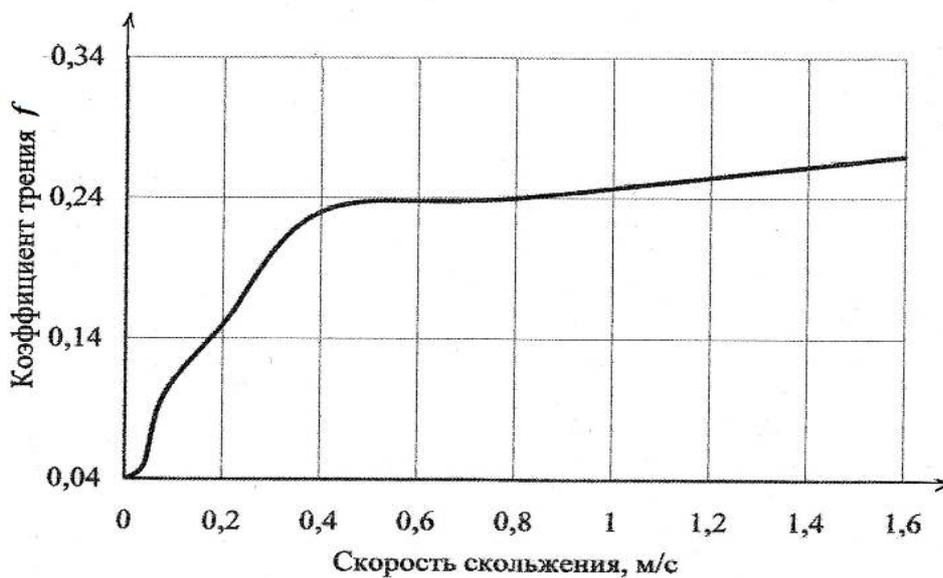
Применение: используется для изготовления изделий методами автоматического, изостатического, компрессионного прессования и поршневой экструзии.

Для улучшения механических и антифрикционных свойств в ПКМ предпочтительнее применение Ф-4 марок С и Т, а также Ф-4ДП, Ф-4ДПТ, Ф-4М, а также небольшие добавки плавких фторопластов. Иногда Ф-4 применяют как наполнитель в полиамиде, поликарбонате и других полимерах.

Фторопласт-4 обладает высокими антифрикционными качествами и способен работать без смазки. Коэффициент трения Ф-4 существенно зависит от температурных воздействий, нагрузка и скорость скольжения, а также качества поверхности (рис. 3.1, 3.2). Минимальные значения  $f$  зафиксированы при работе в паре с металлами при высоких давлениях (не ниже давления хладотекучести фторопласта-4) и весьма малых (до 0,5 м/с) скоростях скольжения. При повышении скорости скольжения значения коэффициента трения возрастают до 0,3 и более, и при скорости более 10 м/с начинается катастрофический износ ПТФЭ.



a



b

Рис. 3.1. Зависимость коэффициента трения ПТФЭ по стали без смазки при нагрузке 2 МПа от температуры (a) и скорости скольжения (b)

К сожалению, политетрафторэтилен обладает не только достоинствами, у него есть и недостатки. Во-первых, это хладотекучесть (ползучесть). Это явление проявляется даже при небольших нагрузках и температурах, когда ПТФЭ постепенно деформируется, а при снятии нагрузки не полностью восстанавливает свою первоначальную форму. Во-вторых, материал обладает малой теплопроводностью (0,24 Вт/м К), что не позволяет нагружать его при рабочих температурах выше 250 °С даже в охлаждае-

мых узлах. В-третьих, изделия из ПТФЭ имеют заметный износ в нагруженных узлах трения, при этом фторопласт особенно боится абразивного износа. В-четвертых, его достоинство как самого скользкого материала переходит в недостаток, когда надо создать защитное покрытие из ПТФЭ. Получить покрытие из фторопласта с хорошей адгезией к металлу, бетону, дереву и другим основаниям достаточно сложно.

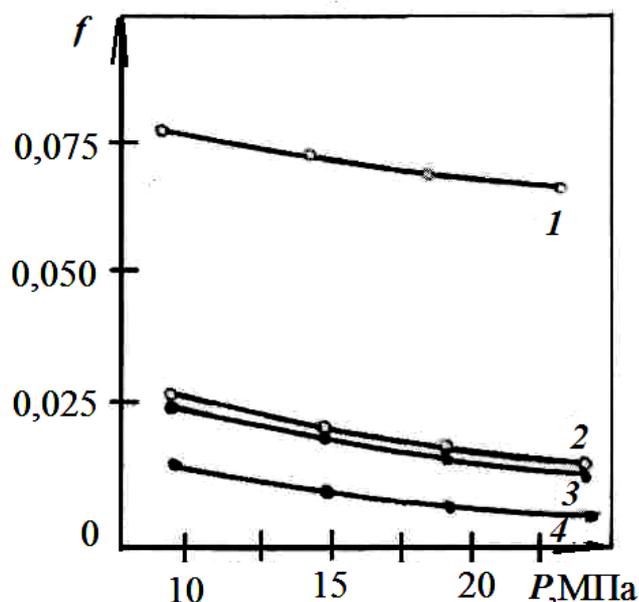


Рис. 3.2. Зависимости коэффициента трения от нагрузки при трении ПТФЭ по нержавеющей стали с разным качеством поверхности:  
1, 3 – без смазки; 2, 4 – со смазкой; 1, 2 –  $R_a=0,178$  мкм; 3, 4 –  $R_a=0,051$  мкм.

Кроме того, недостаточные механические характеристики фторопласта-4 (табл. 3.1) ограничили применение его в особо нагруженных узлах трения и других ответственных деталях машин.

Улучшить характеристики Ф-4 удалось созданием композитов на его основе. Выбор материала наполнителя зависит от условий работы изделия (температура, давление, рабочая среда), но главное правило - в качестве наполнителей применяют материалы, выдерживающие температуры выше температур спекания полимера (365–375 °С).

Наполнители улучшают ряд характеристик ПТФЭ: повышают износостойкость, твердость, прочность на сжатие, модуль упругости, снижают

ползучесть (хладотекучесть) в 2–3 раза, температурный коэффициент линейного расширения (КЛТР) в 2 раза, но параллельно ухудшают некоторые из их: снижают прочность на растяжение и изгиб, ударную вязкость.

Порошкообразные наполнители повышают износостойкость до 1000 раз, но снижают прочность на растяжение на 0,5–0,7 МПа на каждый объемный процент наполнителя. 3–10 % объемных наполнителя немного повышают износостойкость, но обеспечивают высокие прочностные характеристики сопротивлению изгибу и разрыву; 10–20 % объемных дают износостойкие ПКМ для невысоких скоростей и нагрузок; 20–35 % объемных дают наибольшую износостойкость и стойкость к деформациям при высоких скоростях и нагрузках, но недолговечны при знакопеременных нагрузках, плохо работают на растяжение и изгиб. Жесткость не позволяет поддерживать герметичность без создания высокого контактного давления, что усложняет конструкцию и снижает ресурс работы узла.

Таблица 3.1

**Физико-механические свойства Ф-4**

Свойства	
Плотность, Мг/м <sup>3</sup>	2,15–2,24
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	14–32
Относительное удлинение при растяжении, %	250–500
Предел прочности при сжатии, МПа	12
Модуль упругости при растяжении, МПа	410
Модуль упругости при изгибе, МПа	470–850
Ударная вязкость, КДж/м <sup>2</sup>	125
Твердость, МПа	30–40
Температурный коэффициент линейного расширения (КЛТР), °С <sup>-1</sup>	8-64·10 <sup>-5</sup>
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	>1,5·10 <sup>17</sup>
Термостойкость (длит.), °С	260
Коэффициент трения (по стали)	0,04–0,2
Степень кристалличности, %	45–85
Водопоглощение, %	не смачив.

Антифрикционные наполнители: дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ), графит и другие несколько снижают коэффициент трения ПТФЭ, но повышают его износостойкость. Однако при высоких давлениях газов такой ПКМ становится «прозрачным» для газа (наблюдается утечка газа через уплотнение). Ученые Якутского государственного университета считают вредными для ПТФЭ добавки  $\text{MoS}_2$ . Скорее всего, они правы, т. к. присутствие серы, даже в соединении, не желательно для ПТФЭ, т. к. снижает термостойкость полимера, в отличие от кислорода и окислов, которые ее повышают.  $\text{MoS}_2$  можно заменить нитридом бора.

Коллоидный графит повышает жесткость ПКМ, уменьшает хладотекучесть (композиты марок ФГ-15А, ФГ-30А, ФГ-40А). Взаимодействие ПТФЭ с поверхностью частичек графита приводит к резкому ограничению подвижности (ужесточению) молекулярных цепей, что тождественно увеличению узлов в пространственной сетке полимера.

Коксовая мука, графит, бронза, слюда, нитрид бора, а также силициды металлов в 200–1000 раз уменьшают износ, в несколько раз повышают теплопроводность, в 5–10 раз увеличивают прочность при сжатии и твердость. VN и свинец снижают КЛТР, эти ПКМ отличаются высокой прирабатываемостью к стальным и чугунным парам в агрессивных сухих и влажных средах.

При использовании наполнителем свинца на поверхности контртела образуется зеленоватая пленка, способствующая уменьшению износа уплотнителя. Медный наполнитель значительно увеличивает теплопередачу и уменьшает тепловое расширение, но переносится на стальной вал, а это способствует возрастанию коэффициента трения.

Титан,  $\text{MoS}_2$ , двуокись кремния при длительном трении образуют следы большого износа твердого контртела при малом износе ПКМ, что вызвано эффектом резания контртела более твердым наполнителем в составе композита.

Стекловолокна, углеволокна, (реже кремнезем, асбестовые ткани) и другие волокнистые материалы, в том числе полимерные, например полиимидные, увеличивают жесткость ПКМ, уменьшают относительную деформацию при невысоких коэффициентах трения. Введение мелкорубленого стекловолокна до 30–40 % повышает стабильность размеров изделий при водопоглощении, уменьшает усадку и тепловое расширение, повышает тепло- и износостойкость.

Необходимо отметить, что на снижение износа Ф-4 сильно влияет как содержание наполнителя, так и в еще большей степени природа материала наполнителя и его дисперсность. Для наглядной иллюстрации этого влияния на рис. 3.3 приведены экспериментальные зависимости объемного износа от продолжительности испытания некоторых композиций с оптимальным количеством наполнителя.

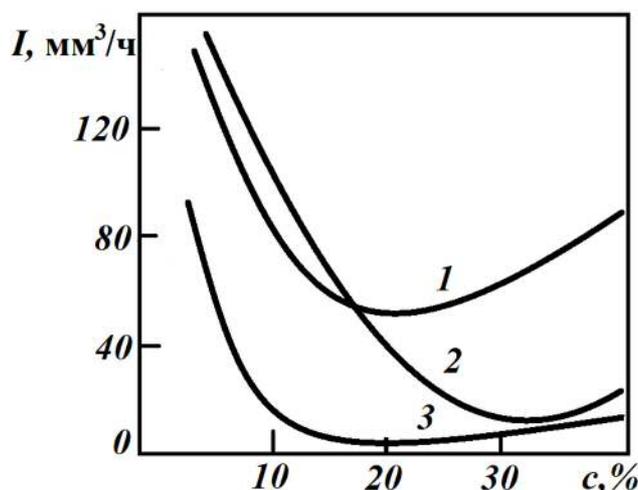


Рис. 3.3. Зависимости скорости изнашивания композиций фторопласта-4 от объемного содержания наполнителя при испытании по схеме трения вал – плоский образец:  
 1 – сернокислый барий; 2 – медь; 3 – дисульфид молибдена (частицы менее 1 мкм)

При испытании по схеме трения вал–плоский образец наиболее низкая скорость изнашивания и одновременно наиболее низкий коэффициент трения получены у композиций фторопласта-4 со свинцом и бронзой марок БрОЦС 5-4-4 и БрОФ 10-1. Однако у композиций со свинцом начальный износ до замедления и стабилизации скорости изнашивания зна-

чительнее, чем у большинства других материалов. Композиции Ф-4 с наполнителями характеризуются при трении по стали без смазки значительно более высокой износостойкостью, чем чистый фторопласт-4. При этом коэффициент трения может быть незначительно выше или даже ниже, чем у чистого фторопласта-4.

### 3.2. Материалы на основе фторопласта-4

Марки композиционных материалов отечественного производства маркируются с обозначением материала, на основе которого создан композит, и количественного обозначения массовой доли наполнителей с буквенным указанием материала наполнителя (С – измельченное стекловолокно, К – молотый кокс, М – дисульфид молибдена, Г – графит, НБ – нитрид бора, КС – кобальт синий, УВ – углеродное волокно, А1 – безводная окись алюминия).

В табл. 3.2 представлены характеристики антифрикционных композиционных материалов на базе фторопласта Ф-4 с наполнителями из графита, коксовой муки, талька, нитрида бора, дисульфида молибдена и других. В результате введения наполнителей износостойкость повысилась в 500 и более раз, сопротивление деформации – в 10–20, жесткость – в 4–5, а теплопроводность – в 5–10 раз.

Наибольшее распространение с середины 60-х годов XX века получил композит *Ф-4К20*, в котором присутствует 20 % молотого кокса, а также его версия с 5 % дисульфида молибдена *Ф4К15М5* (табл. 3.2). Сегодня в России это основные фторопластовые композиты, из них и сегодня изготавливают торцевые и сальниковые уплотнения, опорные подшипники, поршневые кольца. В узлах компрессоров и насосов, работающих при криогенных температурах и сжатии сухих газов, вне конкуренции остается трехкомпонентный высоконаполненный материал *АФГМ*. По сравнению с фторопластом-4 имеет в 600 раз большую износостойкость и на 30 % выше напряже-

ние при 10 %-ной деформации сжатия в диапазоне температур от -60 до +250 °С. Они обладают достаточно хорошими механическими и триботехническими характеристиками и применяются в машинах среднего режима нагрузок. Поршневые кольца компрессоров, изготовленные из Ф4К20, позволяют перевести компрессоры на работу без смазки цилиндров, что устраняет загрязнение промышленных газов маслом. Применение композиции Ф4К20 для изготовления уплотнительных манжет ограничено вследствие относительно низкой его эластичности, материал Ф4К20 пригоден для работы в условиях высокого вакуума, в среде углеводородных газов, сухого воздуха, жидких углеводородов, растворителей. Композиции с графитом и углем стойки и истиранию. Эти композиции особенно пригодны как материал сухих подшипников, применяемых при низких температурах.

К сожалению, защитив себя от интенсивного износа, вышеуказанные материалы не жалеют своего партнера по трению и подвергают его абразивному износу. Эти композиты работоспособны до давлений около 1,5 МПа. При давлении нагнетания 10,0–20,0 МПа ресурс уплотнений из Ф4К20 и АФГМ в условиях сухого трения оставался незначительным: 500–1000 ч. Недостатками этих композитов является экструзия материала, деформируемость, низкая механическая прочность.

**Ф4К15М5** – композиционный материал на основе фторопласта-4, содержит 15 % коксовой муки и 5 % дисульфида молибдена (применяется для работы в среде влажных газов).

**Ф4С15М5** – композиционный материал на основе фторопласта-4, содержит 15 % размолотого стекловолокна и 5 % дисульфида молибдена (применяется для деталей, работающих в условиях высокого вакуума сухого и влажного воздуха и газов).

**Ф4М15** – композиционный материал на основе фторопласта-4, содержит 15 % дисульфида молибдена (применяется для деталей, работающих в среде влажных газов и в вакууме).

Таблица 3.2

**Свойства промышленных материалов антифрикционного назначения  
на основе фторопласта-4**

Материал и его состав	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по Бринеллю, МПа	Пределное $PV^*$ , МПа·м/с	Интенсивность износа, $10^{-6}$ кг/ч	Относительная износостойкость	Коэффициент трения	Температура эксплуатации, °С	
							min	max
Ф-4	250–500	29,4–39,2	–	–	–	0,04	-269	260
Ф-4 + 20 % кокса (Ф4К20)	120–160	2,9–3,0	490 1078	1,0–1,5	625	0,15–0,30	-250	
Ф-4 + 15 % стекловолокна молодого (Ф4С15)	200–300	39,4	343 540	2,6–3,5	250			
Ф-4 + 15 % кокса + 5 % дисульфида молибдена (Ф4К15М5)	150–200	40–43	588 687 1078	0,7	1000	0,30–0,39		
Ф-4 + 15 % стекловолокна + 5 % дисульфида молибдена (Ф4С15М5)		40–43	392 490 608	2,5	275	0,10–0,20		
Ф-4 + 21 % графита + 7 % дисульфида молибдена (Ф4Г21М7)	100–120	58,8	–	$4 \cdot 10^{-7}$	–	0,36–0,42		-196
Ф-4 + 7 % сажи (Ф4Сж7)	100–150	–	–	–	–	–	-60	260
Ф-4 + 10 % графита (Ф4Г10)	200–250	39,2	–	1,5	415	0,18	-250	
Ф-4 + 15 % графита (Ф4Г15)	180–200	42,1	–	1,3	480	–		
Ф-4 + 15 % графита (Ф4Г15А)	150–170	42,1	–	1,3				
Ф-4 + 50 % графита (7В-2А)	–	83,5–137,0	–	20–50	–	0,08–0,15	–	–
Ф-4 + 20 % графита (АФГ-80ВС)	40–60	58,8–93,2	–	20–50	–		–	–
Ф-4 + 35 % графита + 15 % дисульфида молибдена	10	65,6–140,0	–	20–50	–	0,28–0,35	–	–
Ф-4 + 5 % $B_4N_3$ (Ф4НБ5)	250–300	37,2–39,2	–	4,0	160	–	-250	260

Материал и его состав	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по Бринеллю, МПа	Пределное $PV^*$ , МПа·м/с	Интенсивность износа, $10^{-6}$ кг/ч	Относительная износостойкость	Коэффициент трения	Температура эксплуатации, °С	
							min	max
Ф-4 + 2 % кобальта синего (Ф4КС2)	250–300	37,2–39,2	–	8,0	78	–	-250	260
Ф-4 + 10 % порошка никеля + 3 % $B_4N_3$ (ФН-202)	250	39,2–78,4	98–196	–	–	0,25–0,30	–	–
Ф-4 + 10 % порошка никеля + 3 % $MoS_2$ (ФН-3)	110	39,2–49,0	588–784	–	–	0,15–0,20	–	–
Ф-4 + 20% ситалла (Ф4Ж20)	80	–	–	–	–	–	–	–
Ф-4 + 25% ситалла (Ф4Ж25)	60	–	–	–	–	–	–	–
Ф-4 + 15% кокса + 5% измолотого углеводородного волокна (Ф4К15УВ5)	60	–	–	–	–	–	–	–

\* при  $V = 0,05$  м/с,  $V = 0,5$  м/с,  $V = 5$  м/с.

**Ф4С15В5** – композиционный материал на основе фторопласта-4, содержит 15 % измельченного стекловолокна и 5 % нитрида бора (применяется для изделий, обладающих высокой химической стойкостью и износостойкостью, а также высокими механическими свойствами в широком интервале температур).

Композиция **Ф4Г21М7** – композиционный материал на основе фторопласта-4, содержит 21 % графита и 7 % дисульфида молибдена (применяется для создания антифрикционных самосмазывающихся графитофторопластовых материалов).

Материал **Ф4С15** легко перерабатывается, стоек к любым агрессивным средам, хорошо работает в среде сухих агрессивных газов. Добавление измельченного стекла в Ф-4 значительно уменьшает его текучесть (ползучесть). По сравнению с материалом Ф4К20 фторопласт с добавкой стеклопорошка более эластичен. Эта композиция применяется для изготовления различного рода подшипников и других изделий при повышен-

ных требованиях к химической стойкости материала. Еще одно удивительное свойство этого материала возможно к использованию: высокие статические свойства композиции позволяют использовать его как проводник (электрод) для накопления заряда проходящего через проводник материала (жидкости).

Добавка 5 % дисульфида молибдена в композиции Ф4К20 и Ф4С15 повышает износостойкость композитов в 1,6 раза и снижает коэффициент трения в 1,2 раза. Данные материалы (**Ф4С15М5** и **Ф4К15М5**) рекомендуются к использованию в условиях влажных газов, в том числе с наличием конденсата.

Малонаполненные композиции марок **Ф4КС2** и **Ф4С5** практически не отличаются по физико-механическим и химическим свойствам от свойств ненаполненного фторопласта-4. Введение легирующих добавок кобальта синего и дисульфида молибдена заметно увеличивает износостойкость. Материалы Ф4КС2 и Ф4М5 пригодны для изготовления подвижных малонагруженных деталей антифрикционного назначения, работающих в паре с резинами, алюминиевыми сплавами и бронзой. Материалы имеют высокую эластичность и повышенную скорость приработки, а также хорошие электрические свойства. Эти свойства вместе с химической стойкостью позволяют широко применять этот материал в химической промышленности.

Материал **Ф4А010** содержит мелко дисперстный порошок окиси алюминия и придает материалу стойкость к воздействию электрической дуги при коронном разряде. Детали из этой фторопластовой композиции используются как изоляторы в коммутирующих приборах.

Перспективным является введение в состав фторопластов усиливающих наполнителей: углеродных, стеклянных, асбестовых волокон (табл. 3.3). При разработке антифрикционных материалов на основе фторопластов необходимо выбирать такие системы полимер – наполнитель, из которых

формировались бы на металле при трении промежуточные пленки по одному из механизмов – из наполнителя или из полимера. Реализация второго механизма дает более износостойкие пары трения, причем для повышения адгезии такой промежуточной пленки к металлу необходимо наличие в композите мягкого абразива, облегчающего образование ювенильной поверхности, активной к диспергирующей матрице.

Таблица 3.3

**Свойства фторопластовых композитов с волокнистым наполнителем**

Наполнитель	Степень износа*, ( $\cdot 10^{-10}$ ) мм <sup>3</sup> /Н·м	Коэффициент трения*	Предел прочности при изгибе, МПа	Модуль упругости, МПа
—	460	0,25	Нет разрыва	320
25 % углеродного волокна и 5 % MoS <sub>2</sub>	5,3	0,24	35,0	530
25 % асбестового волокна	3,0	0,25	24,8	430
30 % углеродного волокна	2,2	0,23	61,8	450
30 % стекловолокна	1,9	0,34	26,5	380
20 % углеродного волокна и 10 % WC	1,1	0,35	44,6	370
20 % углеродного волокна и 5 % графита	0,7	0,25	42,5	980
20 % углеродного волокна и 20 % графита	0,4	0,19	7,85	350
20 % углеродного волокна и 10 % бронзовых чешуек	0,35	0,25	34,3	690

Условия испытания: нормальная нагрузка  $N=12$  Н,  $V=2,7$  м/с.

Для фторопластовых композитов реализуется первый механизм образования промежуточной пленки. Изменением технологии получения и активности поверхности углеродного волокна удалось реализовать второй механизм образования промежуточной пленки из композита. Композиты, полученные спеканием под давлением 68,6 МПа, имеют износостойкость и

коэффициент трения несколько выше, чем композиты, полученные свободным спеканием. Политетрафторэтиленовые композиты, наполненные углеродным волокном, применяются для изготовления подшипников скольжения и упорных подшипников, используемых в малогабаритных высокоскоростных двигателях и других устройствах. При введении углеродных волокон антифрикционные свойства фторопластовых композиций повышаются в большей степени, чем при введении стеклянных волокон. Стекловолокна вследствие большой абразивности значительно увеличивают шероховатость металлической поверхности, в результате чего повышаются локальные контактные напряжения, снижается износостойкость и возрастает коэффициент трения. В отличие от стеклянных углеродные волокна значительно увеличивают теплопроводность композиционных материалов и теплопроводность контакта. Они могут распределяться так, что между ними возникает максимальный контакт, вследствие которого тепло быстро передается через материал, снижая теплонапряженность узла трения.

В конце 1980-х годов появилась новая группа фторполимерных самосмазывающихся материалов, получивших название ФЛУБОНЫ – *Флубон 15* (Ф4УВ15) и *Флубон 20* (Ф4УВ20) с украинскими (г. Запорожье) углеволокнами марки «Хортиця». Флубон-20 содержит двухкомпонентный наполнитель из высокомодульных и низко модульных углеродных волокон. Испытания показали, что Флубон-20 по износостойкости в 3–5 раз превосходит зарубежные материалы и в 6–8 раз – отечественный прессованный материал Ф4К20 (табл. 3.4), имеет вдвое большее допустимое удельное давление.

Сравнительные испытания композиционных материалов проводились на уплотнениях поршня 4-й ступени компрессора 2РК-1,5/220С при давлении нагнетания 20,0 МПа без смазки (максимальный перепад давления 18,0 МПа). Результаты испытаний представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.4

**Антифрикционные свойства композитов на основе фторопласта-4**

Марка материала	Интенсивность линейного износа, $\cdot 10^{-10}$	Коэффициент трения
Ф4К20 прессованный (Россия)	9	0,35
«Гарлок» (США)	13,2	0,267
«Меркель» (ФРГ)	18,0	0,268
«Иэльнардг» (ФРГ)	14,0	0,293
Ф4К20 экструзионный* (Россия)	13,2	0,301
Флубон-20 (Россия)	6,8	0,297

\* Направление экструзии перпендикулярно поверхности трения

Таблица 3.5

**Сравнение интенсивности изнашивания различных композитов на основе фторопласта-4**

Наименование материала	Средняя интенсивность износа колец по комплекту, мкм/ч		
	После первых 100 ч	После вторых 100 ч	После 200 ч
АФГМ	2,6	2,4	2,5
АФГ-5М	2,02	2,98	2,5
4ГВ-20	1,34	1,34	1,34
Ф4К20	1,3	1,3	1,3
Флубон-20	0,22	0,15	0,19

С конца 1990-х годов в Белоруссии был выпущен аналог Флубона, так называемый **ФЛУВИС** с белорусскими углеволокнами (аббревиатура Флубон с УглеВолокном Из Светлогорск-химволокно). Эти материалы стоят заметно дороже Ф4К20, но имеют более высокие потребительские характеристики, в частности, в 1,5–2,0 раза большую износостойкость и

незначительный износ материала контртела, что дает возможность исключить капитальный ремонт цилиндропоршневой группы, а все ремонтные размеры колец свести к одному.

Эффективно повышают износостойкость ПКМ порошки металлов, имеющие высокую теплопроводность (табл. 3.6). Причем максимальное влияние на увеличение теплопроводности оказывают порошки металлов, которые меньше подвержены поверхностному окислению. Наиболее высокой износостойкостью обладают ПКМ, наполненные  $\text{MoS}_2$  и бронзой. Концентрация наполнителей обычно составляет 15–40 % об., что позволяет повысить износостойкость в 250–1000 раз.

Введение металлических наполнителей приводит к снижению максимальной температуры в поверхностном слое. Эффективность отвода тепла из зоны трения зависит также от формы частиц, а наибольшему снижению максимальной температуры способствуют наполнители в виде стружки. Продолговатые частицы представляют собой теплопроводящие каналы, благоприятствующие распределению тепла трения на поверхностный слой большей толщины.

Влияние металлических наполнителей зависит также от сродства к материалу контртела, кристаллического строения, твердости, размера частиц, их способности к схватыванию между собой и с материалом контртела и т. д.

В современном машиностроении широкое применение нашли металлополимерные самосмазывающиеся материалы, сформированные на основе пористого металлокерамического каркаса, полимеров и сухих смазок. В процессе трения по мере нагревания композиции полимер, содержащий сухую смазку, вытесняется из пористого каркаса, образуя смазочную пленку на рабочей поверхности детали. Металлокерамические полимерсодержащие материалы чаще всего используют для изготовления поршневых колец, подшипников скольжения и сепараторов подшипников качения.

Для изготовления подшипников скольжения узлов трения вакуумных установок и приборной техники используют металлокерамику, спеченную из порошков высокооловянистой бронзы и пропитанную 50 %-ной водной суспензией фторопласта. В табл. 3.6 приведены допускаемые режимы трения металлокерамики на основе бронзы. Для сравнения приведены данные для других самосмазывающихся материалов.

Таблица 3.6

**Допускаемые режимы трения самосмазывающихся материалов**

Материал	Давление, МПа	Скорость скольжения, м/с	Температура, К	Фактор $PV$ , МПа·м/с	Коэффициент трения
Металлокерамика на основе бронзы, пропитанная фторопластом-4Д	10–13	5,0	520	0,7–1,0	0,05–0,06
Стеклокерамика на основе ситалла и меди, пропитанная фторопластом-4Д	4–5	10,0	520	1,5–2,0	0,15
Металлокерамика на основе нержавеющей стали и пирографита, пропитанная фторопластом-4Д	25–30	5,0	520	2–2,5	0,12
Амальгопласт-2	10–12	3,0	570	1,0–1,3	0,1
Металлизированный текстолит на основе модифицированной фенольной смолы ДМВЭФ	20–25	5,0	570	1,5–2,0	0,09
Фторопласт-4Д	0,5–0,7	0,5	390	0,04–0,06	0,04–0,08
Фторопласт-4Д с наполнителями Ф4К20	1–2,5	1,0	390	0,2–0,4	0,08–0,1
Металлофторопластовая лента	14–28	5,0	550	0,4–0,8	0,05–0,16
Термопластичные полимерные материалы с наполнителями, соединенные с металлической подложкой	10–14	1,0	380	0,3–0,4	0,2–0,3

Разработаны и находят применение в узлах трения химической аппаратуры материалы, несущий каркас которых выполнен из пористой стеклокерамики (ситалла), а поры покрыты медью и наполнены фторопластом-4Д. Эти материалы отличаются высокой работоспособностью при эксплуатации узлов трения в агрессивных средах и в условиях отсутствия внешнего подвода смазки (табл. 3.6). Существенным недостатком материала на основе ситалла является хрупкость стеклокерамического каркаса, что сдерживает его использование в узлах трения, работающих в условиях воздействия ударных нагрузок.

К числу наиболее перспективных самосмазывающихся материалов для получения подшипников скольжения, поршневых колец, эксплуатирующихся не только в условиях отсутствия смазки при температуре до 520 К, но и в особо агрессивных средах, например в четырехокиси азота, можно отнести металлокерамический материал МПК. Формирование этого материала осуществляется путем осаждения пиролитического графита в поры металлокерамики из нержавеющей стали непосредственно в процессе пиролиза нефтяных газов. После охлаждения заготовку пропитывают суспензией фторопласта до заполнения свободного объема пор.

Одними из наиболее распространенных являются каркасные ленточные самосмазывающиеся материалы. Несущую основу таких материалов образует металлическая лента, а эффект самосмазывания обеспечивает слой нанесенного на ленту металлополимерного покрытия, состоящего из пористого металлокерамического каркаса и размещенной в порах дисперсной смазочной композиции на основе фторопласта с наполнителем (дисульфид молибдена).

Стальная основа придает металлофторопластовому материалу высокую прочность, бронзовый пористый каркас обеспечивает быстрый отвод тепла, возникающего при трении, и служит резервуаром для твердой смаз-

ки, роль которой играет фторопласт, поверхностный слой антифрикционного материала предотвращает износ сопряженной с подшипником детали и уменьшает трение.

В промышленности используется металлофторопластовый материал, состоящий из основы (сталь 20) и предварительно припеченного слоя бронзолатунной (БрЛАТ) сетки (рис. 3.4), поры которой заполнены композиционной порошковой шихтой на основе фторопласта-4 марки ПН и свинца марки ПСА прессованием с последующей термообработкой при 640–650 К под избыточным давлением, создаваемым расширением фторопласта. Свойства широко применяемого каркасного материала на стальной основе марки «Спрелафлон» следующие: плотность 2,8 Мг/м<sup>3</sup>, предел прочности при изгибе 200 МПа, теплопроводность 0,561 Вт/м. К, коэффициент термического расширения  $12,6 \cdot 10^{-6}$  1/град.

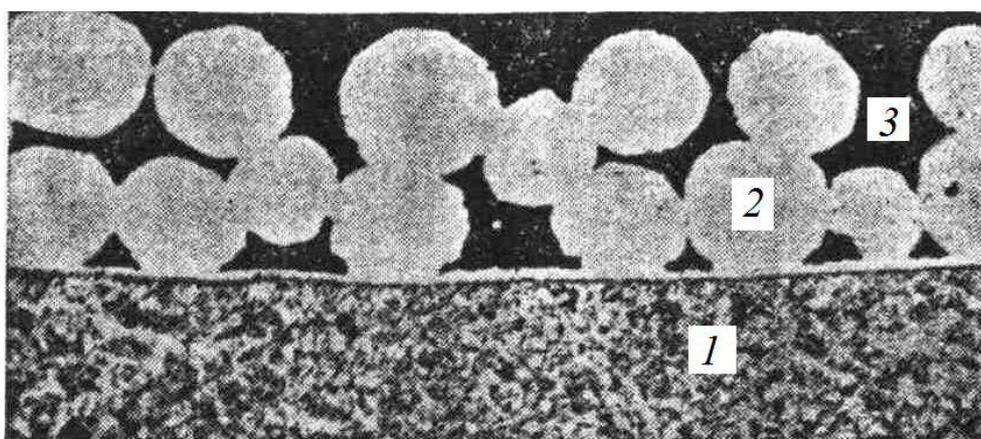


Рис. 3.4. Микроструктура каркасного композита:  
1 – стальная подложка; 2 – бронзовый каркас; 3 – Ф-4+свинец

Американской фирмой «Du Pont» разработано несколько различных марок наполненного фторопласта. В качестве фторопластовой составляющей композиций используется Тефлон-7. Состав марок выпускаемых материалов приведен в табл. 3.7.

Эти материалы по сравнению с чистым фторопластом характеризуются более высоким сопротивлением износу и крипу, а также повышенным сопротивлением начальной деформации под нагрузкой.

Марки наполненных ПКМ на основе тефлона

Марки наполненного фторопласта	Наполнитель, %
Тефлон-1303	15 % стекловолокна
Тефлон-1305	25 % стекловолокна
Тефлон-1346	60 % бронзы
Тефлон-1371	20 % стекловолокна +5 % графита
Тефлон-1374	15 % стекловолокна +5 % дисульфида молибдена

У композиций фторопласта со стекловолокном при повышенных физико-механических свойствах в наибольшей мере сохраняются присущие чистому фторопласту ценные химические и электрические свойства. Композиционный материал, содержащий во фторопластовой основе бронзу, имеет высокие механические свойства и отличается от других материалов более высокой теплопроводностью и износостойкостью, однако из-за содержания в нем бронзы его нельзя применять для работы в химически агрессивных средах. Материалы с графитом или дисульфидом молибдена имеют достаточно высокие механические свойства, а также высокие износостойкость и несущую способность и могут работать в химически агрессивных средах. Графит лучше других наполнителей способствует уменьшению начального износа материала при трении и ускорению процесса приработки. В табл. 3.8 приведены характеристики антифрикционных свойств композиций фторопласта с наполнителями фирмы «Du Pont». Износостойкость всех приведенных композиций в 1000 или даже более раз превышает износостойкость чистого фторопласта. Эти композиции используют главным образом для изготовления подшипников разных типов, уплотнений, поршневых колец компрессоров и других деталей, работающих без смазки в широком диапазоне температур или в агрессивных средах. Они применя-

ются при работе на трение даже в самолето- и ракетостроении, в искусственных спутниках и космических кораблях.

Таблица 3.8

**Антифрикционные свойства композиций фторопласта  
с наполнителями фирмы «Du Pont»**

Марка материала	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Коэффициент линейного расширения, °С·10 <sup>-5</sup>				PV без смазки при износе за 1000 ч, МПа·м/с	Коэффициент сухого трения	
			при температуре					статический	динамический
			от 26 до 150	от 26 до 260	от 26 до 150	от 26 до 260			
			в направлении прессования		перпендикулярно направлению прессования				
V100	190	150	12,6	15,1	6,3	8,8	358–716	0,16	0,14
V101	154	175	–	–	–	–	179–358	0,20	0,18
V102	190	150	12,6	15,3	6,5	9,0	716	0,16	0,14
VG15	245	320	14,9	18,5	5,2	7,6	107	0,20	0,16
VG25	203	250	13,5	17,1	7,6	10,1	179	0,18	0,16
G4	350	450	13,6	17,1	13,6	17,1	<36	0,16	0,12

Фирма «Alleghney Plastic Co.» (США) выпускает композиционный материал Salox «М», состоящий из смеси 40 % бронзы и 60 % политетрафторэтилена. Этот материал особенно пригоден для работы при криогенных температурах, а также при температуре до 260 °С.

Композиционный материал Rulon «А» с основой из политетрафторэтилена производит американская фирма «Dixon Corp.». Материал предназначен главным образом для работы на трение при криогенных температурах и в вакууме, но так же, как и Salox «М», может работать при температуре до 260 °С.

Американская фирма «Rogers Corp.» производит материал Duroid 5813

– композиция фторопласта со стеклонаполнителем и дисульфидом молибдена, применяемый для уплотнений и сепараторов подшипников качения.

Английской фирмой «Polypenco Ltd» разработан подшипниковый материал флюоросинт (Fluorosint), представляющий собой композицию фторопласта с мелкодисперсным керамическим наполнителем. Детали из этого материала, обладая самосмазывающими свойствами, имеют высокую износостойкость, плавное скольжение, почти нулевое водопоглощение и отличаются от чистого фторопласта-4 высокой стабильностью размеров, позволяющей при механической обработке этого материала (в отличие от чистого фторопласта) выдерживать допускаемые отклонения размеров деталей в пределах до 0,0127 мм. Подшипники из такого материала используются в шарнирной опоре при работе в диапазоне температур от –40 до +82 °С и относительной влажности до 100 %. Из этого материала изготавливают также поршневые кольца воздушных компрессоров на английских самолетах «Трайидент», работающие при давлении 160 МПа, температуре 300 °С (кратковременно бывает до 470 °С). Подшипники из этих материалов работают в течение 6000 ч. без капитального ремонта.

Фирма «Fluorocarbon Co. Ltd.» выпускает, кроме различных деталей из чистого фторопласта, также подшипники и другие, работающие на трение, детали из ряда специально разработанных материалов с торговой маркой Fluorinoid, представляющих собой композиции фторопласта с наполнителями со следующими физико-механическими свойствами: прочность на разрыв 1400 – 2100 МПа; удельный вес 2,15 – 2,3 Мг/м<sup>3</sup>; относительное удлинение – 250 % максимум; деформация под нагрузкой 2,9 % при 1400 МПа за 85 ч при 50 °С. По сравнению с чистым фторопластом материал Fluorinoid обладает более высокой износостойкостью, повышенными сопротивлениями хладотекучести и начальной деформации под нагрузкой, повышенной твердостью, увеличенной теплопроводностью, лучшей стабильностью размеров.

Американская фирма «W. S. Sharaban and Co.» производит самосмазывающиеся подшипники разных типов и размеров из материала «Тарсайт» (Turcite), представляющего собой композицию фторопласта со специальными добавками. Материал имеет низкий коэффициент трения, повышенную прочность, твердость и хорошую коррозионную стойкость. Сопротивление изнашиванию этого материала по сравнению с чистым фторопластом повышено в 10 раз. Фирмой «Glacier Metal Co. Ltd» (Англия) разработаны и выпускаются подшипниковые материалы черного цвета под названиями Glacier DQ и Glacier DQ2, представляющие собой композиции политетрафторэтилена с наполнителями, предназначенные для работы без смазки. Они выпускаются в виде стержней диаметром от 6,5 до 51 мм и длиной 180 мм и труб диаметром от 16 – 9,5 мм до 51 – 35 мм длиной 180 мм. Из этих стержней или труб посредством механической обработки изготавливают необходимые детали. Во фторопластовой основе материала содержится примерно 20 % бронзового порошка, 30 % графита и некоторое количество свинца. Материал PQ2 имеет несколько более низкую прочность и износостойкость, чем DQ, но обладает почти полной химической инертностью и может применяться для работы в сильно коррозионных средах. В материале DQ2 отсутствует бронзовый наполнитель, поэтому для работы в контакте с контртелом из бронзы и другими материалами на медной основе фирма рекомендует применять DQ2.

Материал DQ наряду с высокими антифрикционными свойствами чистого фторопласта имеет в тысячу раз большую по сравнению с последним износостойкость. Оба материала широко используют для изготовления подшипников в виде втулок, кольцевых упорных подшипников (упорных шайб), направляющих, ползунов и других деталей, предназначенных для работы на трение в таких условиях, когда применение обычных жидких или консистентных смазочных материалов нежелательно или невозможно или когда вследствие работы узла трения в условиях очень низких или

очень высоких температур (от  $-200$  до  $+250$  °C) обычные смазки не годятся.

Английская фирма «Imperial Chemical Industries Ltd» (ICI) после интенсивных двенадцатилетних исследований разработала и начала выпускать серию композиционных материалов из фторопласта с наполнителями под общим названием Fluon V, к которым относятся следующие пять марок: Fluon VG15, Fluon VG25, Fluon V100, Fluon V101, Fluon V102.

Марки Fluon VG15 и Fluon VG25, содержащие соответственно 15 и 25 % стекла, считаются материалами нормального качества, а остальные три – материалами повышенного качества. Материал марки Fluon V100 имеет универсальное применение, обладает низкой деформацией под нагрузкой и хорошими износостойкими свойствами; Fluon V101 предназначен для работы на трение при контактировании с мягкими материалами, например, с латунью или алюминием, Fluon V102 рекомендуется для использования в виде ленточного материала, позволяющего нести повышенные нагрузки.

Материалы Fluon VG15 и Fluon VG25 значительно уступают остальным в износостойкости и по допустимому значению произведения  $PV$ , но более дешевы. Поэтому эти материалы используются только в тех случаях, когда не требуется особенно высокой износостойкости и высокого значения  $PV$ .

Физико-механические и антифрикционные свойства материалов серии Fluon V и чистого политетрафторэтилена марки Fluon G4 приведены в табл. 3.7.

Материалы серии Fluon V, согласно данным фирмы ICI, в основном предназначены для изготовления подшипников скольжения, уплотнений, манжет насосов, поршневых колец и сепараторов подшипников качения. Наиболее широко материалы применяют для подшипников скольжения различных типов. Их достоинства, как и других, предназначенных для работы на трение, деталей из материалов серии Fluon, состоят в том, что они

не требуют смазки; могут работать в широком диапазоне температур и в жидкостях, не являющихся смазками (например, бензин, вода, коррозионные химически активные жидкости); работают бесшумно; могут работать в условиях относительной загрязненности и запыленности; не подвержены явлениям «схватывания–проскальзывания», что особенно ценно при работе подшипников в условиях возвратно-вращательного движения и при периодических остановках; стойки к атмосферным воздействиям и имеют низкое водопоглощение (что весьма важно для подшипников стиральных машин, дождевальных установок, корабельных дверей и люков); имеют хорошие электроизоляционные свойства, весьма важные для подшипников вращающихся антенн, радиолокаторов и других радио- и электротехнических устройств. В то время как наиболее сильное изнашивание обычных смазываемых маслом металлических подшипников происходит в момент пуска, подшипники из Fluon V при очень малых скоростях изнашиваются незначительно, и поэтому они могут иметь в период пуска высокие значения  $PV$ .

Из материалов серии Fluon V изготавливают не только монолитные подшипники в виде втулок, но и ленту, которую используют в качестве вкладыша (в виде тонкослойной облицовки поверхности трения подшипника). Вкладыши из ленты по сравнению с толстостенными подшипниками обладают следующими преимуществами: предельно допустимые значения  $PV$  для работы в течение 1000 ч могут быть увеличены вдвое; используется минимальное количество материала; имеют при одинаковой нагрузке меньшую деформацию; в конструкции подшипника, в котором лента имеет возможность за счет стыкового зазора расширяться, величина внутреннего диаметра может сохраняться почти неизменной; если лентавкладыш может в подшипнике свободно проворачиваться, то при постоянно направленной нагрузке местный износ будет меньше; чрезвычайно легкие и компактные; просты в изготовлении; имеют более высокую тепло-

проводность; позволяют изготавливать подшипник любого размера (даже диаметром в несколько футов); посредством прокатки можно заранее перед постановкой в подшипник придать поверхности трения ленты свойства приработанной поверхности; вкладыш из ленты может быть помещен непосредственно в проточку корпуса подшипника, в отдельную обойму или установлен на валу.

За рубежом уже получили широкое распространение детали из наполненного фторопласта. Такие подшипники скольжения применяют в прядильных и ткацких станках, гребнечесальных машинах, антеннах подводных лодок, перископах, крышках люков торпедных аппаратов, контрольно-измерительных приборах, топографических и чертежных машинах, поплавковых клапанах, установках для производства искусственного льда, выпарных аппаратах, мешалках (опорные подшипники), центрифугах (в подшипниках вспомогательных устройств), киносъёмочных и кинопроекторных аппаратах, хромотографическом оборудовании, ракетах (подшипники в топливных системах), светокопировальных машинах, горнорудном оборудовании, расфасовывающих и упаковывающих машинах, паровых стерилизаторах (подшипники тележек и крючков для мяса), доильном оборудовании, сцепных устройствах тракторов, муфтах сцепления, электрических счетчиках (взамен дорогих камней), лифтах и других подъемных устройствах, телефонных аппаратах, компрессорах, лабораторных стерилизаторах (подшипники в петлях дверей), паровых прессах и устройствах для сушки одежды в прачечных, тележках железнодорожных вагонов, прокатных станах (во вспомогательных устройствах), бумагоделательных машинах, машинах для изготовления бумажных коробок, печатных машинах (подшипники дверных петель и вспомогательного оборудования), машинах для изготовления папирос и сигарет, амортизаторах колесных, рулевых механизмах судов.

Уплотнения и манжеты насосов применяют в насосах для перекачки

бензина и других нефтепродуктов, водяных и насосах для инсектицидов, в воздушных цилиндрах пневмоавтоматики, седлах шаровых клапанов, пробках конических вентилях.

Широко используются материалы на основе Ф-4 в качестве антифрикционных покрытий и сухих смазок. Нанесение на металлические поверхности фторопластовых покрытий придает им антифрикционные, антиадгезионные, антизадириные, электроизоляционные и другие свойства, присущие фторопласту. Получаемые и применяемые покрытия могут иметь толщину от нескольких микрон до 0,1 мм и реже до 0,5 мм. Более толстые покрытия применяют редко, так как с увеличением толщины покрытий уменьшается надежность их закрепления на подложке и повышается способность к отслаиванию.

В зависимости от назначения и требований покрытия могут быть как из чистого фторопласта, так и из композиций фторопласта со связующим и другими полезными добавками.

В России разработан и выпускается лак ФБФ-74Д, представляющий собой суспензию тонкодисперсных частиц фторопласта 4Д, взвешенных в растворе органического связующего (типа клея БФ). Покрытие из такого лака применяют в качестве антифрикционного. Оно держится значительно прочнее и изнашивается медленнее, чем в случае покрытия из обычной суспензии. Коэффициент трения пленки лака без смазки такой же, как и у чистого фторопласта-4. Необходимую толщину покрытия получают нанесением нескольких слоев лака. Предельная рабочая температура покрытия из лака ФБФ-74Д определяется термостойкостью связующего и не должна при длительной эксплуатации превышать 125 °С.

Из каталогов зарубежных фирм и других литературных данных известно применение чистого фторопласта и его композиций с другими материалами для получения тонкослойных антифрикционных покрытий на подшипниках скольжения, качения и других деталях, работающих на тре-

ние. Основная цель применения таких покрытий – возможность работы деталей без смазки.

Английской фирмой «Glasir» разработан материал покрытий марки DQ, состоящий из смеси фторопласта с 40 – 50 % дисульфида молибдена. Имеются две разновидности этого материала – DQ (a), содержащий наибольшее количество свинца DQ (b), в котором свинец отсутствует. Материал покрытий DQ (b) уступает в износостойкости материалу DQ (a), но благодаря отсутствию свинца может применяться в пищевой и фармацевтической промышленности. Фирма «Glasir» производит покрытие этими материалами изделий. Покрытия наносят на поверхности трения таких деталей, как втулки, шестерни, кулачки, опорные шайбы, направляющие, ползуны, сферические поверхности, обоймы подшипников качения и др. В качестве наиболее подходящего материала покрываемых деталей рекомендуется простая углеродистая сталь или низколегированная с содержанием легирующих элементов до 7 %. Покрытия из материала DQ могут работать при температуре от  $-100$  до  $+280$  °С. Толщина рекомендуемых и наносимых фирмой покрытий составляет 0,04–0,065 мм. Средний коэффициент трения при работе таких покрытий по полированной стали без смазки 0,08, но в зависимости от сочетания нагрузки и скорости может иметь значение от 0,04 (высокие нагрузки и низкие скорости скольжения) до 0,16 (небольшие нагрузки и высокие скорости скольжения).

Английская фирма «Acheson Colloids Ltd» выпускает ряд дисперсий, содержащих фторопласт, под названием «Эмралон». Дисперсии «Эмралон-810», «Эмралон-820», «Эмралон-320» и другие применяют в качестве антифрикционных покрытий.

Дисперсия «Эмралон-810» содержит в качестве связующего резольную фенолформальдегидную смолу. Такое покрытие наносят на металлы, пластмассу, резину и другие материалы. Покрытие выдерживает рабочую температуру до 175 °С, а кратковременно даже до 200 °С. Диспер-

сия «Эмралон-820» в качестве связки содержит термопластическую смолу, не требующую для затвердевания повышенной температуры, и поэтому ее наносят на материалы, которые нельзя нагревать. Коэффициент трения покрытий 0,05 – 0,07.

Американская фирма «Tri Point Industries (Teflon Way, Corn-mack, L.L.NJ.)» выпускает покрытую тефлоном алюминиевую фольгу либо с клейкой подложкой, либо без нее. Материал предназначен для создания антиадгезионных поверхностей.

### **3.3. Технология переработки Ф-4 и его композиций**

В отличие от других термопластов, которые перерабатываются в изделия методом литья или горячего прессования, изготовление изделий из Ф-4 производится в два приема – прессования (таблетирования) и спекания.

Процесс изготовления изделий из Ф-4 больше напоминает технологию, применяемую в порошковой металлургии. Для получения изделия порошок Ф-4 подвергают прессованию в стальной пресс-форме, а затем после извлечения из пресс-формы в свободном состоянии спекают в специальных печах. В отдельных случаях при изготовлении крупных или сложных изделий (например, сифонов) спекание производят в пресс-форме.

При спекании изделия отдельные частицы порошка сплавляются в монолит, благодаря чему изделие дополнительно уплотняется, при этом происходит усадка материала. Усадка будет тем больше, чем меньше уплотнен порошок при прессовании. Для получения правильной формы изделия и равномерной толщины необходимо при засыпке порошка в пресс-форму получить равномерную толщину и плотность слоя.

Повышение давления прессования для выравнивания плотности может вызывать холодную вытяжку частиц в переуплотненных местах, а во время спекания возможно восстановление первоначальной формы частичек, в результате чего в изделии появятся коробления и трещины. Поэтому ос-

новным требованием при прессовании является создание одинаковой и достаточной плотности во всех частях таблетки. Сложные изделия прессуются из нескольких навесок порошка, загружаемых отдельно в пресс-форму.

В некоторых случаях не представляется возможным изготовить из Ф-4 изделия заданной конструкции. Тогда получают заготовку, близкую по форме к требуемому изделию, которую подвергают механической обработке или горячему штампованию.

Другие марки фторопластов, являясь термопластами, перерабатываются в изделия обычными для термопластов способами (плунжерной экструзией, литьем под давлением). Однако при переработке фторопластов следует иметь в виду, что необходима более высокая температура нагрева. Кроме того, из расплава выделяются агрессивные и токсичные газы, от которых необходима защита оборудования и работающих.

### 3.3.1. Основные стадии переработки Ф-4 в изделия

Ф-4 не удается перерабатывать в изделия известными методами на стандартном оборудовании. Переработку осуществляют, получая из порошкообразного полимера заготовки и спекая их при высоких температурах.

#### *Подготовка порошка Ф-4*

Ф-4 представляет собой рыхлый, легко комкующийся, несыпучий порошок с частицами волокнистой структуры. Измельченный порошок пригоден для прессования в течение всего лишь нескольких дней, поэтому рекомендуется измельчать одно-двухдневный запас. При этом следует учитывать, что полимер находится в сильно наэлектризованном состоянии и легко притягивает пыль и другие частицы с окружающих предметов и из воздуха. Минеральные и органические включения, попавшие в порошок, становятся причиной брака в изделиях (щели и отверстия в тонкостенных деталях). Сгораемые включения, особенно масла, при спекании образуют

продукты горения, в результате чего значительная часть изделия приобретает черный цвет. Все это сопровождается снижением показателей механических и диэлектрических свойств материала.

В некоторых случаях перед рыхлением для удаления низкомолекулярных продуктов фторопласт подвергают нагреву в течение 2 ч при 250–270 °С.

#### *Прессование заготовок Ф-4*

Прессование (таблетирование) изделий из порошкообразного Ф-4 выполняется на гидравлических прессах для пластмасс. Основное требование, предъявляемое к прессам – обеспечение равномерного и контролируемого давления на пуансон. Скорость рабочего хода пресса должна составлять 60–70 мм/мин, а в конце прессования несколько уменьшаться. Не допускается движение поршня толчками.

Прессование проводят при давлении 20–30 МПа без нагревания. При чрезмерно высоких давлениях (выше 70 МПа) наблюдается растрескивание уже готовых изделий, а при низких образуются таблетки с недостаточно плотной структурой, что приводит к повышенной усадке и понижению механической прочности изделий.

Измельченным порошок Ф-4 имеет насыпную плотность 0,4–0,45 Мг/м<sup>3</sup>. Для обеспечения беспористости готового изделия необходимо достичь при прессовании плотности материала не менее 1,83 Мг/м<sup>3</sup>.

Порошок в пресс-форму засыпается свободно и равномерно распределяется по всему объему с помощью металлического или пластмассового шпателя (рейки). Выравнивать слой вдавливанием бугорков не рекомендуется. Засыпать порошок в форму можно через сито. Съёмную пресс-форму можно слегка встряхивать. Утрамбовка порошка допустима.

Втулки высотой до 90 мм прессуются в пресс-форме с высотой обоймы 200 мм, при этом порошок засыпается дозами; каждая доза выравнивается, уплотняется рукой, затем пуансоном или лоточковой рейкой,

представляющей часть пуансона. На уплотненный материал засыпается каждая следующая порция и также уплотняется. При таком уплотнении трещин во втулках не наблюдается. Если уплотнение производится бессистемными ударами рейки или палочки, то в этом случае создаются предпосылки для образования трещин.

#### *Компрессионное прессование заготовок Ф-4*

Качественные заготовки средних и особенно больших размеров можно получить на прессах с двусторонним прессованием (рис. 3.5).

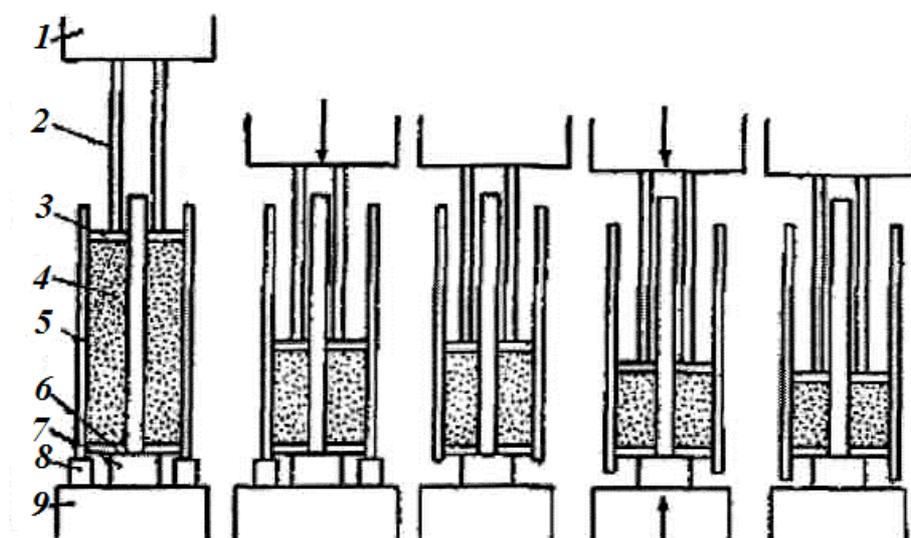


Рис. 3.5. Схема формирования заготовки двусторонним прессованием (с плавающей матрицей):

1- верхняя плита; 2- толкатель; 3- верхний пуансон; 4- порошок Ф-4; 5- матрица; 6- нижний пуансон; 7- упор; 8- подставки; 9- нижняя плита

Скорость движения пуансона при прессовании не должна превышать 60–70 мм/мин. С увеличением высоты изделия (более 50 мм) одинакового сечения необходимо повышать давление прессования, причем усилие следует передавать с двух противоположных сторон, так как при подаче давления с одной стороны нижние слои уплотняются меньше, и после спекания изделие в нижней части получается несколько меньших размеров.

Различные марки Ф-4 должны прессоваться при различных давлениях, скоростях формования и выдержках полимера под давлением. Обычно для чистого полимера давление прессования составляет 25–50 МПа, а для

композиций – 35–100 МПа. Рекомендуемое оптимальное давление прессования 30 МПа, при котором таблетка получается с удельным весом 1,83 Мг/м<sup>3</sup>. При спекании удельный вес такой таблетки повышается до 2,15–2,2 Мг/м<sup>3</sup>, а усадка по объему составляет 23–25 %.

Выдержка под давлением зависит от высоты прессуемой детали. При высоте таблетки до 15–20 мм и удельном давлении 30 МПа достаточна выдержка 0,5 мин. С увеличением высоты выдержка под давлением (для выравнивания плотности таблетки) возрастает до 2–3 мин и больше. Давление и продолжительность выдержки устанавливаются для каждого изделия.

#### *Изостатическое прессование заготовок Ф-4*

Способ формования порошкообразного Ф-4 с помощью воздушного или гидравлического давления через эластичную мембрану позволяет изготавливать полые изделия, в том числе сложной конфигурации.

Изостатическое прессование применяется для получения малых и больших сосудов, труб большего диаметра, трубной арматуры и фасонных изделий сложной формы.

Давление прессования для чистого Ф-4 составляет 28–42 МПа и до 70 МПа для наполненных композиций.

Затруднительным моментом изостатического прессования является удаление воздуха при прессовании (особенно при изготовлении толсто-стенных блоков), который заключен в частицах и между частицами порошка Ф-4. В отличие от компрессионного прессования при изостатическом процессе формование происходит по цилиндрической поверхности, а не по горизонтальной плоскости, что создает другую ориентацию частиц полимера и приводит к существенному изменению свойств изделий.

#### *Автоматическое прессование заготовок Ф-4*

Этот метод наиболее выгоден при производстве большого числа некрупных изделий достаточно простой формы (кольца, втулки, подшипники, прокладки). Автоматические пресса используются как механические,

так и гидравлические мощностью до 150 кН. Дозирующие устройства оборудуют вибропитателями. Давление, как правило, повышенное (до 100 МПа) по сравнению с компрессионным прессованием, что необходимо для достижения высокой производительности.

Установки для автоматического прессования укомплектованы печами для спекания, которые могут работать в периодическом или непрерывном режиме (печи туннельного типа). На этих установках часто перерабатывают наполненные марки Ф-4. Большим достоинством этого метода является отсутствие отходов Ф-4, что объясняется изготовлением непосредственно готового изделия и точным дозированием порошка.

#### *Спекание заготовок Ф-4*

Второй основной операцией производства изделий из Ф-4, после прессования (таблетирования), является процесс термообработки – спекание. Процессы спекания и охлаждения изделий после спекания являются весьма ответственными технологическими операциями, обеспечивающими конечные свойства материала и качество изделий.

В результате прессования получается изделие, не обладающее достаточной механической прочностью, так как частицы полимера не имеют однородной структуры, и только в процессе спекания благодаря их сплавлению достигаются требуемые свойства материала и его монолитность. При нагревании отформованной заготовки до температуры близкой к температуре плавления происходит уплотнение пористой массы, обусловленное стремлением частиц к уменьшению поверхностной энергии.

Спекание частиц происходит в три стадии. На *первой* стадии частицы приплавляются друг к другу, площадь контакта увеличивается, центры частиц сближаются, но между ними еще сохраняются границы раздела. На *второй* стадии сформировывается пористое тело в виде двух беспорядочно перемещающихся фаз (полимера и газа, заполняющего пустоты). На *третьей* стадии газовые включения превращаются преимущественно в

замкнутые ячейки, их число и общий объем уменьшается с повышением плотности материала.

В реальных порошках гранулометрический состав частиц полимера изменяется в широких пределах. Поэтому их не удастся равномерно распределить в объеме заготовки и между частицами образуются поры разных размеров. Спекание таких заготовок сопровождается возникновением микронапряжений вследствие того, что между частицами образуются газовые ячейки различных размеров в зависимости от диаметра спекаемых частиц и плотности их упаковки. В первую очередь захлопываются ячейки меньшего диаметра. Частицы укрупняются и в тех местах, где расстояние между сплавляемыми частицами оказалось больше, образуются разрывы.

Чем крупнее заготовка и больше ее высота, тем в большей степени проявляется действие гравитационных сил, которые распределены не равномерно по всему объему заготовки. Это является причиной неоднородности плотности заготовки и искажения ее формы при спекании (рис. 3.6). Существенную неравномерную пористость имеют заготовки, полученные прессованием в холодных пресс-формах (рис. 3.7)

Макронапряжения являются следствием неодинаковой степени уплотнения, а следовательно, неодинакового упругого восстановления. После снятия давления они растягиваются менее уплотненными участками заготовки, сжимая их. Релаксация макронапряжений в заготовке в процессе спекания приводит к появлению в готовом изделии трещин и расслоений. Микронапряжения оказываются уравновешенными в объеме каждой частицы. При уплотнении заготовки наибольшие напряжения возникают в приконтактном слое материала. В этих областях возникают пластические и эластические деформации, в то время как ядро частиц деформируется упруго. После снятия давления уплотнения упругие деформации в частицах полностью не исчезают, так как этому препятствуют пластические деформации. При спекании происходит релаксация микронапряжений.

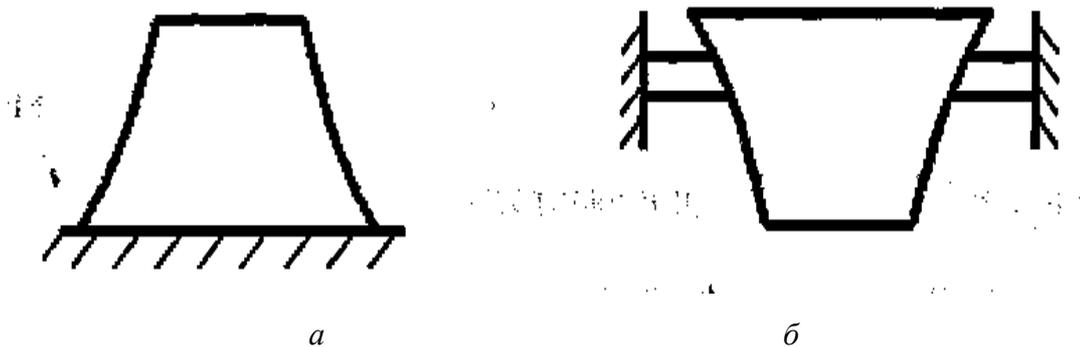


Рис. 3.6. Изменение формы изделия в процессе действия гравитационных сил  
*a* – спекание таблетки в форме; *б* – спекание подвешенной таблетки

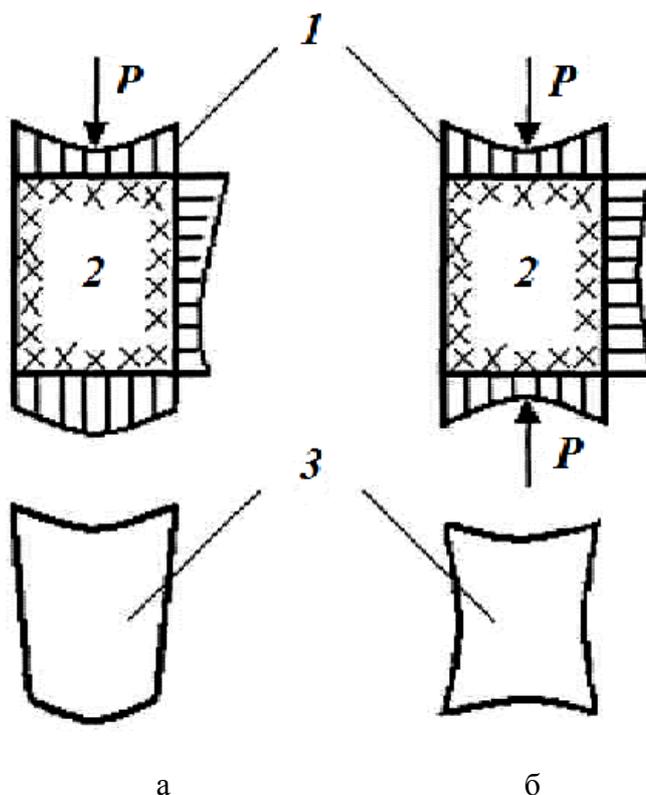


Рис. 3.7. Эпюры распределения давления по высоте и плотности заготовки, полученной из порошка в пресс-формах при одностороннем (*a*) и двухстороннем (*б*) прессовании: *1* – эпюры распределения давления; *2* – заготовка; *3* – характер изменения формы изделия после спекания

Таблетки спекают в печах с рециркуляцией воздуха и вращающимся подом. Воздух нагревается электронагревателями, расположенными вне печи, так как внутри печи излучение от нагревателей может вызвать местные перегревы изделий.

Продолжительность спекания изделий ориентировочно составляет 1 ч на 3 мм толщины стенки. Это в большей мере относится к высокомолекулярному полимеру. Спекание низкомолекулярного полимера, как показывает опыт, происходит за меньший промежуток времени. Часто изделие из низкомолекулярного Ф-4 с толщиной стенки 8–10 мм спекается за 1,5–2,0 ч, а с толщиной стенки 40–50 мм – за 5–6 ч при температуре 375 °С. Окончание спекания определяется визуально через смотровое окно по достижению полной прозрачности таблетки, поэтому печь должна быть внутри освещена.

Перед загрузкой в печь изделия тщательно просматривают, запыленные поверхности протирают сухой и чистой ветошью во избежание нарушения цвета готового изделия и появления отдельных темных пятен или точек. Мелкие изделия укладывают на специальные поддоны из алюминия.

#### *Охлаждение спекшихся изделий Ф-4*

Охлаждение может происходить как с закалкой, так и без нее. Сущность закалки заключается в быстром охлаждении заготовок в интервале температур от 327 до 250 °С. При этом аморфная фаза успевает перейти в кристаллическую. Скорость охлаждения в значительной мере определяет степень кристалличности полимера, а следовательно, и физико-механические свойства и качество изделий.

Чем медленнее происходит охлаждение, тем выше процент кристаллической фазы в получаемом изделии и, наоборот, – при быстром охлаждении, например, при погружении в холодную воду изделий с температурой 350–365 °С, кристаллизация не успевает достигнуть сердцевины изделия.

Закаленные изделия имеют большую прочность и эластичность, но меньшую плотность. Однако вследствие низкой теплопроводности полимера закалка крупногабаритных изделий сопряжена с большими трудностями. При погружении в воду происходит в первую очередь охлаждение внешних слоев изделия, а в глубине его продолжает совершаться процесс

кристаллизации. Таким образом, создаются внутренние напряжения, которые в сердцевине крупногабаритных изделий образуют трещины. Поэтому рекомендуют подвергать закалке изделия толщиной до 3 мм.

Обычно незакаленные изделия получают охлаждением вместе с печью. При этом материал имеет возможность перейти из аморфного состояния в кристаллическое равномерно по всей глубине. Поэтому степень кристалличности и плотность незакаленных изделий выше, а прочность несколько ниже, чем у закаленных.

Закаленный материал более гибкий, упругий и прочный, а незакаленный – более жесткий, но менее газопроницаемый. На перерабатывающих предприятиях изделия охлаждаются вместе с печью до 150–100 °С, после чего выгружаются.

Особенно крупные и толстостенные изделия могут спекаться в формах под давлением, что позволяет предупредить появление трещин при спекании и локализовать дефекты прессования, не обнаруженные внешним осмотром. Это производится в печах, скомбинированных с прессом.

### 3.3.2. Технология получения и переработки наполненного фторопласта-4

Изготовление наполненных фторопластов путем сухого смешивания порошка фторопласта с порошкообразными или волокнистыми наполнителями в смесителях различных типов исключает получение однородной композиции. Это объясняется тем, что Ф-4 имеет волокнистое строение, легко комкуется, не сыпуч и плохо смешивается с наполнителем.

Известно несколько способов получения наполненных фторопластов. В отечественной практике наибольшее распространение получили три метода:

1. Совместный помол фторопласта с наполнителями (порошкообразными) при очень низких температурах в среде жидкого азота при температуре – 196 °С.

2. Совместная коагуляция суспензии Ф-4 и суспензии наполнителя с последующей фильтрацией, сушкой и протиркой готовой композиции. Для этого сначала получают суспензию порошкообразного наполнителя в воде с добавкой поверхностно-активного вещества в количестве 0,02 % от веса воды, в эту суспензию вносится при интенсивном перемешивании суспензия фторопласта, а затем ацетон. Коагулированная смесь фильтруется через фильтровальную ткань или сетку и промывается водой. Сушат смесь в течение 16–18 ч на перфорированных противнях при 120 °С и затем просеивают.

На качество полученного наполненного фторопласта большое влияние оказывает длительность и скорость перемешивания, так как слишком сильное или слабое перемешивание может вызвать осаждение наполнителя. Оптимальной считается скорость 500 об/мин.

3. Метод получения композиции на основе фторопласта с порошкообразными наполнителями при совместном помоле фторопласта и порошкообразного наполнителя на коллоидной мельнице в спирте. В зависимости от типа коллоидной мельницы берутся определенные соотношения спирта, фторопласта и наполнителя.

Наполненные фторопласты перерабатывают в изделия так же, как чистый полимер, в две стадии: предварительным холодным прессованием заготовки при давлении от 25 до 100 МПа (давление прессования подбирается в зависимости от вида и количества наполнителя) с последующим спеканием заготовок при  $370 \pm 10$  °С.

Прессование деталей из наполненных фторопластов производится в специальных пресс-формах, изготавливаемых из низколегированных сталей с полированной и хромированной рабочей поверхностью. Для прессования заготовок из наполненных фторопластов диаметром до 200 мм применяются облегченные съемные пресс-формы, для заготовок диаметром выше 200 мм – стационарные пресс-формы. Пресс-формы изготавливаются

с учетом пятикратного уплотнения порошка по высоте при прессовании, усадки наполненных фторопластов в процессе спекания и припусков на механическую обработку.

Перед прессованием порошок измельчают на специальных мельницах. Навеска наполненного фторопласта засыпается в пресс-форму и разравнивается по высоте, затем медленно дается необходимое давление.

При прессовании наполненных фторопластов для получения качественных заготовок без пор и трещин необходимо соблюдение следующих условий:

- равномерная засыпка в пресс-форму всей навески материала без последующего досыпания и подпрессовки во избежание расслаивания материала;

- медленное и равномерное опускание пуансона, плавная подача и медленный съем давления.

Необходимое давление прессования зависит от состава композиций, то есть от содержания в ней наполнителя. Установлено, что при прессовании композиций, содержащих свыше 30 % порошкообразного наполнителя (графит, дисульфид молибдена), оптимальным давлением прессования является 50 МПа. При этом получается материал, имеющий прочность при разрыве 11–12 МПа. При добавлении в наполнитель рубленого стекловолокна в количестве 10–20 % давление прессования тогда принимают 70–75 МПа.

## Глава 4

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

## 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### ИЗУЧЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### 1. Цель работы

1.1. Ознакомиться с основными видами полимерных антифрикционных материалов.

1.2. Изучить влияние типа полимерной матрицы на свойства антифрикционных полимерных материалов.

1.3. Изучить влияние типа и состава наполнителей на свойства полимерных материалов.

#### 2. Содержание работы

2.1. Ознакомление с методическими указаниями к лабораторной работе и поставленной задачей.

2.2. Изучение и анализ свойств исследуемых антифрикционных полимеров.

2.3. Оформление отчета к лабораторной работе.

#### 3. Порядок выполнения работы

Провести сравнительный анализ свойств следующих полимерных антифрикционных композиционных материалов (табл. 2.4–2.7, 2.11–2.17, 3.2–3.5, рис. 2.1–2.6):

1) выявить влияние типа полимерной матрицы (термореакт, термопласт) на физико-механические и антифрикционные свойства композитов (табл. 2.4–2.6); определить температурный диапазон эксплуатации поли-

мерных материалов в зависимости от типа полимерного связующего;

2) выявить влияние типа дисперсного наполнителя на прочностные свойства полиамидов и поликарбонатов (табл. 2.11, 2.14);

3) определить закономерность изменения коэффициента трения и прочностных свойств эконола от типа и количества наполнителя (табл. 2.15, рис. 2.3);

4) определить влияние степени наполнения полиарилатов политетрафторэтиленом на свойства композиций (табл. 2.15, рис. 2.3, 2.5);

5) установить влияние марки полиимида и типа дисперсного наполнителя на прочностные свойства материалов на основе полиимидов (табл. 2.13);

6) установить влияние типа термопластичной матрицы на свойства композиций (табл. 2.11–2.16, 3.2);

7) выявить изменение свойств композиций в зависимости от типа эпоксидной матрицы (табл. 2.17, рис. 2.6);

8) установить закономерность изменения антифрикционных и прочностных свойств композитов на основе термопластов от степени наполнения (табл. 2.12, 3.2, рис. 2.3–2.5, 3.3);

9) выявить влияние дисперсности и объемного содержания наполнителя (табл. 2.12, рис. 3.3) на свойства ПКМ;

10) определить влияние типа наполнителя на свойства фторопласта-4 (табл. 3.2–3.3);

11) определить закономерность изменения антифрикционных свойств композиций АМС (рис. 2.6) и фторопласта-4 (рис. 3.1–3.2) от параметров трения (номинального контактного давления и скорости);

12) сравнить свойства композитов на основе политетрафторэтилена отечественного производства и их зарубежных аналогов (табл. 20–23, 26).

#### **4. Содержание отчета**

Письменный отчет по работе должен включать:

- 1) наименование и цель работы;
- 2) сравнительный анализ антифрикционных полимерных материалов, включающий таблицы и графические зависимости свойств основных термопластичных и термореактивных антифрикционных композитов;
- 3) выводы о влиянии различных факторов, перечисленных в п. 3, на свойства антифрикционных полимерных материалов.

## **2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ВЫБОР СОСТАВОВ И ПРИГОТОВЛЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

### **1. Цель работы**

- 1.1. Ознакомиться с антифрикционными композитами на основе фторопласта-4.
- 1.2. Произвести выбор наполнителей и состава композиций.
- 1.3. Получить полимерные порошковые композиции выбранных составов.

### **2. Содержание работы**

- 2.1. Ознакомление с методическими указаниями к лабораторной работе и поставленной задачей.
- 2.2. Выбор составов композиций на основе анализа их свойств.
- 2.3. Ознакомление с методикой приготовления полимерных порошковых композиций методом сухого смешения.
- 2.4. Расчет количества фторопласта-4 и наполнителей для выбранных композиций.
- 2.5. Приготовление порошковых композиций на основе Ф-4.

### **3. Оборудование, инструменты, материалы**

1. Порошок Ф-4.
2. Порошки наполнителей (кокс, графит, стеклопорошок и др.).
3. Сито.
4. Аналитические весы.
5. Ступка.
6. Калькулятор.

### **4. Теоретическая часть**

Дисперсные наполнители отличаются от других видов твердых наполнителей малым размером своих частиц (10–150 мкм) и небольшой разницей их продольных и поперечных размеров.

Дисперсные наполнители вводят в полимер для самых различных целей. В большинстве случаев эти наполнители вводят для изменения механических свойств. Так, введение любого твердого дисперсного наполнителя существенно повышает модуль упругости и твердость полимеров. Введение высокодисперсных наполнителей (с размером частиц менее 300 нм) повышает прочность полимеров и работу, затрачиваемую на их разрушение. Такое действие наполнителей на полимеры обычно называют *усилением*.

Одной из важнейших целей введения твердых дисперсных наполнителей является удешевление полимеров. Для этого в полимер вводят большое количество дешевых наполнителей с невысокой плотностью.

Кроме того, большое количество композиций содержит дисперсный наполнитель для придания полимерам самых разнообразных специальных (специфических) свойств. Сюда можно отнести придание электрической проводимости, улучшение теплопроводности, снижение или повышение коэффициента трения, снижение или повышение горючести и регулирование многих других свойств полимеров.

Свойства ПКМ определяются свойствами исходных компонентов, их

соотношением и структурой полученного композиционного материала. Для получения материала с заданными свойствами необходимо правильно выбирать наполнитель с соответствующими свойствами и способ получения композиции. Способ получения определяет структуру композиционного материала.

Известно много способов введения твердых дисперсных наполнителей в полимеры, из которых наиболее распространенными являются:

- 1) смешение наполнителя с полимером, находящимся в вязкотекучем состоянии;
- 2) смешение раствора полимера с наполнителем с последующим удалением, если это необходимо, растворителя;
- 3) введение наполнителя в латекс полимера с последующей коагуляцией смеси и удалением воды;
- 4) сухое смешение.

Самым распространенным способом является первый, поскольку он позволяет достичь наиболее высокого качества смешения. Под смешением понимают механический процесс распределения исходных компонентов по всему объему системы таким образом, чтобы содержание их в пределах любого малого объема не отклонялось от среднего содержания компонентов в смеси. Если содержание каждого компонента в любой точке системы постоянно, то такая смесь называется *идеальной*.

Качество смешения характеризуется двумя показателями: это равномерность распределения частиц наполнителя в объеме полимера и степень диспергирования или степень измельчения агломератов наполнителя в процессе смешения. Качество смешения оказывает очень сильное влияние на свойства ПКМ.

В качестве наполнителей для фторопластовых композиций применяются материалы, выдерживающие температуру спекания фторопласта (370–380 °С).

## 5. Порядок выполнения работы

5.1. Проанализировать составы промышленных антифрикционных материалов на основе фторопласта-4 (табл. 3.2–3.3).

5.2. Вид используемых в изучаемых композитах материалов и их плотность занести в табл. 4.1.

5.3. Произвести расчет массы Ф-4 и наполнителя на  $1 \text{ см}^3$  для каждой композиции с учетом состава, используя данные табл. 4.1 и формулы 1–2. Результаты занести в табл. 4.2.

$$M_{\text{Ф-4}} = \rho_{\text{Ф-4}} \cdot V_{\text{Ф-4}} \quad (4.1)$$

$$M_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}}, \quad (4.2)$$

где  $\rho_{\text{Ф-4}}$ ,  $\rho_{\text{н}}$  – плотность фторопласта-4 и наполнителя, соответственно,  $\text{Мг/м}^3$ ;

$V_{\text{Ф-4}}$ ,  $V_{\text{н}}$  – объем фторопласта-4 и наполнителя, соответственно,  $\text{м}^3$ .

5.4. Произвести расчет необходимой массы полимера и наполнителя для получения образцов заданных размеров. Размер образца задается преподавателем. Результаты расчета занести в табл. 4.3.

5.5. На аналитических весах произвести взвешивание порошков с точностью до 0,01 гр и получить навески для приготовления композиций заданного состава.

5.6. Просеять через сито порошок Ф-4 для измельчения, так как Ф-4 представляет собой рыхлый, легко комкующийся, несыпучий порошок с частицами волокнистой структуры

5.7. Поместить порошки Ф-4 и наполнителя в ступку и методом сухого смешивания получить композицию.

## 6. Содержание отчета

Письменный отчет по работе должен включать:

1) наименование и цель работы;

- 2) краткую характеристику изучаемых композитов и их компонентов;
- 3) результаты расчета в виде таблиц;
- 4) выводы по полученным экспериментальным данным.

Таблица 4.1

**Используемые материалы и их плотность**

Материал	Ф-4	Кокс	Стекланный порошок			
Плотность, Мг/м <sup>3</sup>						

Таблица 4.2

**Результаты расчета**

Композит	Вид наполнителя	Состав, %		Масса порошка на 1см <sup>3</sup> смеси, г	
		Ф-4	наполнитель	Ф-4	наполнитель
Ф4К20	кокс	80	20		

Таблица 4.3

**Результаты расчета**

Композит	Размер образцов			Масса порошка на образец, г	
	$d, м$	$h, м$	$V, м^3$	Ф-4	наполнитель
Ф4К20					

### **3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

#### **ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАПОЛНЕННЫХ ФТОРОПЛАСТОВ**

##### **1. Цель работы**

- 1.1. Получить термомеханические кривые наполненных фторопластов.
- 1.2. Определить температуры переходов наполненных фторопластов.
- 1.3. Изучить влияние типа и состава наполнителя на термомеханические свойства полимерных композитов.

##### **2. Содержание работы**

- 2.1. Ознакомление с методическими указаниями к лабораторной работе и поставленной задачей.
- 2.2. Ознакомление с принципом работы установки ТМИ-1 для снятия термомеханических кривых (ТМК).
- 2.3. Подготовка установки ТМИ-1 для испытаний.
- 2.4. Подготовка образцов композиционных материалов на основе фторопласта-4 и дисперсных наполнителей для испытаний.
- 2.5. Снятие экспериментальных данных для построения ТМК.
- 2.6. Обработка экспериментальных данных и построение графиков в координатах деформация–температура.
- 2.7. Определение температур переходов композитов.
- 2.8. Выводы по работе.

##### **3. Оборудование, инструменты, материалы**

1. Установка ТМИ-1.
2. Сосуд со льдом.
3. Штангенциркуль.
4. Образцы фторопласта-4, содержащие различные наполнители (кокс, графит, стеклопорошок, стеклосферы и др.).
5. Калькулятор.

#### 4. Теоретическая часть

Метод термомеханического анализа (ТМА) позволяет изучить влияние наполнителя на свойства полимеров. Данный метод основан на фиксации зависимости деформации, развивающейся за определенное время при заданном напряжении, от температуры. Используя ТМА, можно определить характеристические температуры физических и фазовых процессов (температуры перехода из одного физического состояния в другое, стеклования, кристаллизации, плавления), являющиеся основными характеристиками при выборе режимов переработки и эксплуатации полимеров и композиций на их основе.

Для получения термомеханических кривых существуют разнообразные методики, классификация которых, чаще всего, проводится по применяемому методу деформации. Основными являются метод одноосного растяжения и метод одноосного сжатия. В данной работе применяется метод, в котором подвижный рабочий орган установки ТМИ-1 выполнен в виде стержня с кончиком заведомо меньшего сечения, чем торцевая поверхность образца. Таким образом, на протяжении всего эксперимента удельное давление, рассчитываемое на действующую поверхность (то есть на площадь торца пуансона), считается постоянным. В ходе исследования происходит пенетрация, то есть постепенное внедрение нагруженного пуансона в массу исследуемого образца (рис. 4.1). Так, если по направлению оси пуансона (ниже точки *A*) на образец действует только усилие сжатия, то вблизи края пуансона (точка *B*) на него действует также усилие растяжения, преимущественно в приповерхностных слоях. Соответственно этому при пенетрации происходит перемещение массы вязкоупругого материала в направлениях, показанных на рис. 4.1 стрелками.

Таким образом, нагрузка, действующая через пуансон, вызывает изменение формы полимера, которые в общем не могут быть отнесены к определенному типу деформаций. Величина отклонений от чистого сжатия

зависит от относительных размеров торца образца и сечения пуансона, от толщины образца, его природы и физического состояния, а также степени пенетрации. Эта величина не соответствует истинной деформации сжатия. Тем не менее как условная мера деформации величина вполне приемлема и применяется при исследовании термомеханических кривых полимеров.

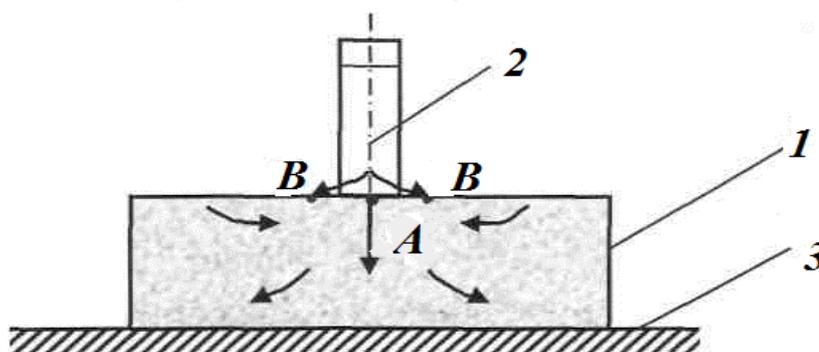


Рис. 4.1. Деформирование полимера при пенетрации:  
1 – образец полимера (стрелками указаны направления перемещения массы материала); 2 – пуансон с плоским срезом; 3 – опорная поверхность

Методика измерения термомеханической деформации позволяет объективно установить особенности термомеханического поведения исследуемых материалов, обусловленного силой адгезионного взаимодействия в системе полимер–наполнитель.

Введение наполнителей в полимеры может сопровождаться значительным изменением их релаксационного поведения и температур перехода из одного физического или фазового состояния в другое. Вместе с возможными структурными изменениями, вызываемыми введением наполнителей и отражающимися на теплофизических характеристиках и деформируемости (рис. 4.2), это приводит к существенному изменению всего комплекса свойств полимеров.

Исследование деформируемости фторопластовых образцов производят в интервале температур 20–400 °С. Деформацию при пенетрации ( $\varepsilon$ ) характеризуют глубиной проникновения пуансона в образец ( $\Delta h$ ) и выража-

ют в процентах к исходной его высоте  $h$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \cdot 100\%,$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация образца;  $\Delta h$  – деформация по индентору прибора;  $h$  – высота образца.

По полученным результатам строят термомеханические кривые, по которым и определяют характеристические температуры полимера.

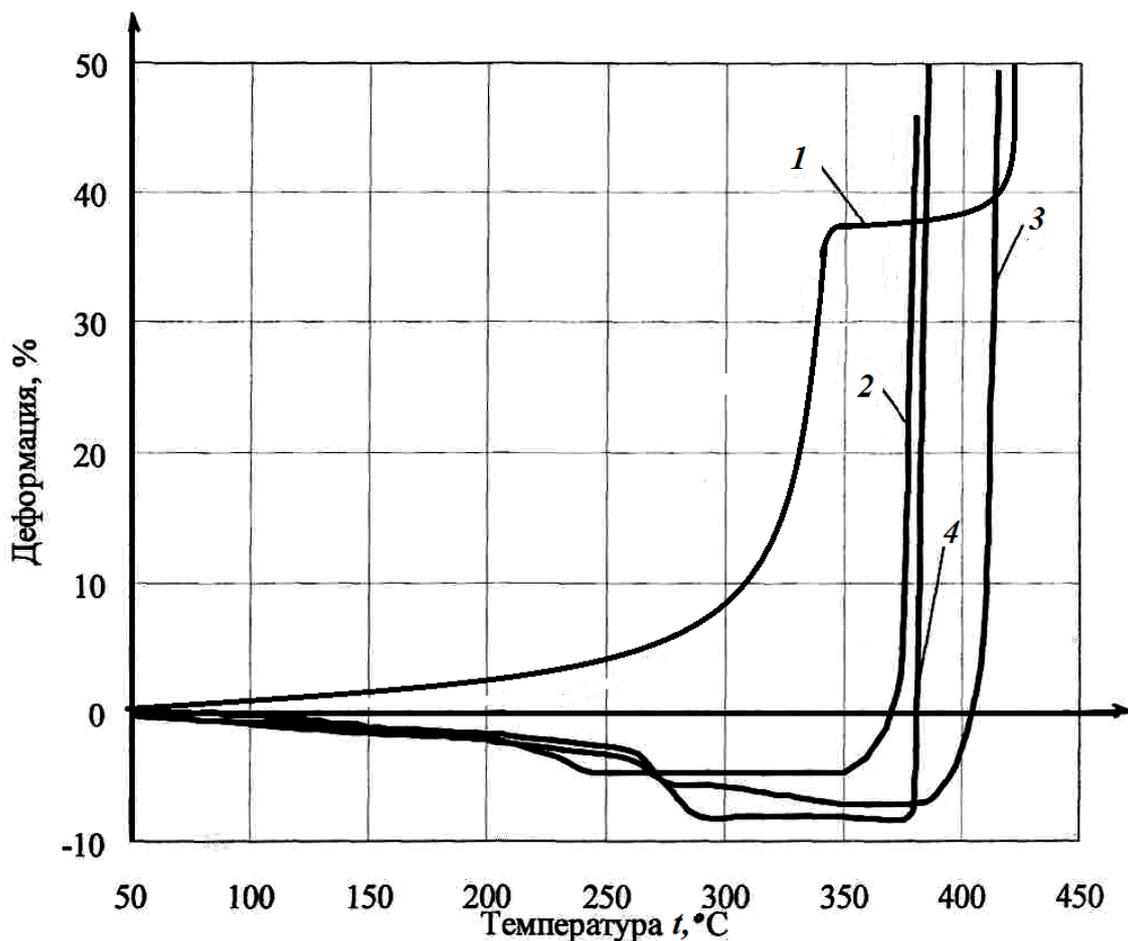


Рис. 4.2. Термомеханические кривые чистого Ф-4 и его композиций, содержащих 20 % кокса Ф4К20, 15 % углеродка Ф4УВ15, 15 % углеродка и 5 % дисульфидамолибдена Ф4С15М5:  
1 – Ф4; 2 – Ф4К20; 3 – Ф4УВ15; 4 – Ф4С15М5

## 5. Порядок выполнения работы

5.1. Приготовить образцы композитов диаметром 5–6 мм и высотой 3–4 мм для проведения испытаний. Образцы должны иметь строго параллельные плоскости и зачищены от заусенцев. Для воспроизводимости ре-

зультатов при сравнительном анализе материалов необходимо изготавливать образцы одинаковых размеров.

5.2. Подготовить к работе установку ТМИ-1.

5.2.1. Установить исследуемый образец 5 на предметный столик 6, так, чтобы он находился на одинаковом расстоянии от термопар 4 (рис. 4.3).

5.2.2. Включить блок измерения 10 в сеть. При этом должно засветиться табло электронных счетчиков. Установить тумблер измерения в положение I.

5.2.3. Установить «0» на блоке измерителя поворотом барабана и перемещением штока 2, с помощью винта 1 закрепить шток.

5.2.4. С помощью винтов 3 поместить столик с образцом в нагревательное устройство 7.

5.2.5. Свободные концы термопар опустить в сосуд со льдом.

5.2.6. Включить блок регулирования температуры 9 тумблером «сеть». С помощью тумблеров повышения и понижения температуры установить на табло значение, равное температуре окружающего воздуха.

5.2.7. Установить скорость нагрева образца  $V = 5\text{ м/с}$  нажатием тумблера «Прогр» и с помощью кнопки «скор».

5.3. Снять показания температуры и деформации.

5.4. Провести испытания образцов и результаты занести в табл. 4.4.

5.5. Полученные данные представить в виде графической зависимости температура-деформация.

5.6. Получить у учебного мастера ТМК чистого полимера.

5.7. По ТМК определить температуры фазового перехода и степень деформации при температуре 200, 250, 300, 350, 375 °С. Результаты занести в табл. 4.5.

## 6. Содержание отчета

Письменный отчет по работе должен включать:

- 1) наименование и цель работы;
- 2) краткую характеристику исследуемых композитов;
- 3) схему лабораторной установки ТМИ-1;
- 4) результаты эксперимента – таблицы, график;
- 5) выводы по полученным экспериментальным данным;

## 7. Указания по технике безопасности

7.1. Нагрев образцов и испытания материалов производить под контролем учебного мастера.

7.2. Строго соблюдать температурный режим нагрева.

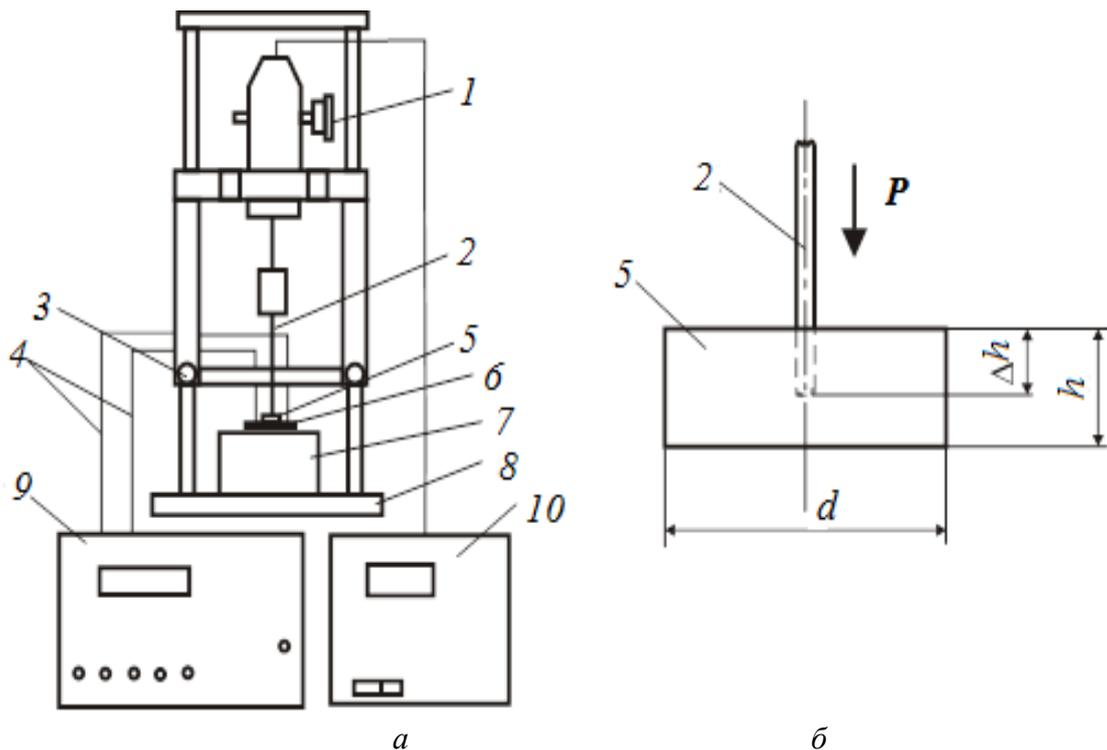


Рис. 4.3. Схема установки ТМИ-1 (а) и ее принцип работы (б):

1 – стопорный винт штока; 2 – подвижный шток; 3 – винты крепления;  
4 – термопары; 5 – образец; 6 – предметный столик; 7 – нагревательное устройство;  
8 – основание; 9 – блок регулирования температуры; 10 – блок измерения

Таблица 4.4

## Результаты испытаний

Образец 1, $h=$			Образец 2, $h=$		
$t, ^\circ\text{C}$	Деформация		$t, ^\circ\text{C}$	Деформация	
	мм	%		мм	%

Таблица 4.5

## Значения деформаций образцов из Ф-4 и его композиций

№ образ-ца	Материал	Деформация образца, %, при температуре $t, ^\circ\text{C}$					Температура перехода, $^\circ\text{C}$ $t_1$
		200	250	300	350	375	
1	Ф-4						
2							
3							

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фролова, К. В.* Современная трибология: Итоги и перспективы / под ред. К. В. Фроловой. – М. : Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. *Михайлин, Ю. А.* Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Профессия, 2006. – 624 с.
3. Трение и модифицирование материалов трибосистем : учеб. пособие / Ю. К. Машков [и др.] ; РАН, Ин-т сенсорн. микроэлектроники. – М. : Наука, 2000. – 279 с.
4. *Машков, Ю. К.* Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, М. Ю. Байбарацкая, О. А. Мамаев. – М. : Недра, 2004 – 262 с.
5. *Семенов, А. П.* Металлофторопластовые подшипники / А. П. Семенов, Ю. Э. Савинский. – М. : Машиностроение, 1976. – 192 с.
6. Антифрикционные термостойкие полимеры / Г. А. Сиренко, В. П. Сви-деркий, В. Д. Герасимов, В. З. Никонов. – Киев : Техника, 1978. – 247 с.
7. *Адаменко, Н. А.* Взрывная обработка металлополимерных композиций: монография / Н. А. Адаменко, А. В. Фетисов, А. В. Казуров ; ВолгГТУ. – Волгоград: РПК «Политехник», 2007. – 240 с.
8. *Паншин, Ю. А.* Фторопласты / Ю. А. Паншин. – Л., 1978. – 232 с.
9. *Истомин, Н. П.* Антифрикционные свойства композиционных материа-лов на основе фторопластов / Н. П. Истомин, А. П. Семенов. – М., 1981. – 424 с.
10. *Михайлин, Ю. А.* Конструкционные полимерные композиционные мате-риалы / Ю. А. Михайлин. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб. : Научные основы и техноло-гии, 2010. – 820 с.
11. *Пугачев, А. К.* Переработка фторопластов в изделия: технология и оборудо-вание / А. К. Пугачев, О. А. Росляков. – М., 1987. – 237 с.
12. *Машков, Ю. К.* Трибофизика и свойства наполненного фторопласта / Ю. К. Машков. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 1997. – 191 с.
13. *Машков, Ю. К.* Композиционные материалы на основе политетрафторэ-тилена / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, В. И. Суриков, Л. Ф. Калистратова. – М. : Маши-ностроение, 2005. – 240 с.
14. *Машков, Ю. К.* Структура и износостойкость модифицированного политетрафторэтилена / Ю. К. Машков [и др.]. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 1998. – 143 с.
15. *Охлопкова, А. А.* Пластики, наполненные ультрадисперсными неоргани-ческими соединениями / А. А. Охлопкова, А. В. Виноградов, Л. С. Пинчук. – Гомель : ИММС НАНБ, 1999. – 164 с.
16. *Курицына, А. Д.* Композиционные материалы и покрытия на базе фторопласта-4 для сухого трения в подшипниках скольжения / А. Д. Курицына, И. П. Истомин. – М. : Машиностроение, 1971. – 52 с.
17. *Белый, В. А.* Металлополимерные материалы и изделия / В. А. Белый. – М. : Химия, 1979. – 135 с.
18. *Адаменко, Н. А.* Конструкционные полимерные материалы: учеб. пособие / Н. А. Адаменко, А. В. Фетисов, Г. В. Агафонова. – Волгоград, 2010. – 102 с.
19. *Адаменко, Н. А.* Полимерные матрицы: метод. указ. к лабораторным ра-ботам / сост. : Н. А. Адаменко, А. В. Фетисов ; Волгоград. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2008.
20. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, техноло-гия / под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2008. – 558 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	5
1.1. Триботехнические характеристики материалов.....	7
1.2. Особенности трения полимеров.....	8
ГЛАВА 2. АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	13
2.1. Наполнители триботехнического назначения.....	19
2.2. Антифрикционные термопластичные материалы.....	29
2.2.1. Материалы на основе полиамидов.....	30
2.2.2. Материалы на основе полиимидов.....	34
2.2.3. Материалы на основе поликарбоната.....	36
2.2.4. Материалы на основе полиолефинов.....	37
2.2.5. Материалы на основе полиарилатов.....	39
2.2.6. Материалы на основе полиэфирэфиркетона.....	41
2.3. Антифрикционные термореактивные материалы.....	44
2.3.1. Материалы на основе эпоксидных смол.....	44
2.3.2. Материалы на основе фенолформальдегидных полимеров.....	46
2.4. Резины.....	47
2.5. Древесные пластики.....	47
ГЛАВА 3. АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ФТОРОПЛАСТА-4	49
3.1. Общие сведения о фторопласте-4.....	49
3.2. Материалы на основе фторопласта-4.....	58
3.3. Технология переработки Ф-4 и его композиций.....	79
3.3.1. Основные стадии переработки Ф-4 в изделия.....	80
3.3.2. Технология получения и переработки наполненного фторопласта-4.....	88
ГЛАВА 4. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И СВОЙСТВА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ».....	91
4.1. Лабораторная работа «Изучение антифрикционных свойств полимерных материалов».....	91
4.2. Лабораторная работа «Выбор составов и приготовление порошковых композиций».....	93
4.3. Лабораторная работа «Изучение теплофизических свойств наполненных фторопластов».....	98
Список использованной литературы.....	105

Учебное издание

Нина Александровна Адаменко

Галина Викторовна Агафонова

## **ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

*Учебное пособие*

Редактор Н. Н. Кваша

Темплан 2013 г. (учебники и учебные пособия). Поз. № 85у.  
Подписано в печать 02.07.2013. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,27. Уч.-изд. л. 5,08.  
Тираж 150 экз. Заказ .

Волгоградский государственный технический университет.  
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.  
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.