



МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)

Л.П. ШЕСТОПАЛОВА

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ  
И ЗАЩИТНО-ОТДЕЛОЧНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»

Л.П. ШЕСТОПАЛОВА

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЗАЩИТНО-ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*Допущено Федеральным УМО по укрупненной группе специальностей  
и направлений подготовки 23.00.00 – «Техника и технологии наземного транспорта»  
в качестве учебного пособия для обучающихся по направлению подготовки  
23.05.01 – «Наземные транспортно-технологические средства»,  
уровень образования – «специалитет»*

МОСКВА  
МАДИ  
2019

УДК 620.22:629.33

ББК 30.3:39.124

Ш522

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, проф. каф. «Производство и ремонт автомобилей  
и дорожных машин» МАДИ *Баурова Н.И.*;

канд. техн. наук, доц. каф. «Высокоэффективные технологии обработки»  
ФГБОУ ВО «МГТУ «Станкин» *Тарасова Т.В.*

**Шестопалова, Л.П.**

Ш522 Конструкционные и защитно-отделочные материалы транспортных средств: учеб. пособие / Л.П. Шестопалова. – М.: МАДИ, 2019. – 216 с.

В учебном пособии показан широкий спектр конструкционных материалов, как металлических, так и неметаллических (полимерных, порошковых, композиционных материалов и т.п.), применяемых в транспортном машиностроении при различных тепловых режимах работы, рассмотрены изменения их свойств в процессе эксплуатации. Освещены вопросы конструкционной прочности материалов и критерии её оценки. Рассмотрен процесс износа материалов, дана его характеристика и виды изнашивания. Приведена классификация материалов, устойчивых к основным видам изнашивания. Отдельная глава посвящена смазочным материалам. Уделено внимание защитно-отделочным материалам: лакокрасочным покрытиям (эмали, лаки, грунтовки, шпатлёвки); химико-термическим и пластмассовым покрытиям; герметикам и т.п., а также светоотражающим, энергопоглощающим, шумо- и виброзащитным материалам.

Учебное пособие отличается практичностью и предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 23.00.00 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»; 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства». 23.05.02 «Транспортные средства специального назначения»; 15.03.01 «Машиностроение»; 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

УДК 620.22:629.33

ББК 30.3:39.124

---

Учебное издание

**ШЕСТОПАЛОВА** Лариса Павловна

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ  
И ЗАЩИТНО-ОТДЕЛОЧНЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Редактор Н.В. Шашина*

*Редакционно-издательский отдел МАДИ. E-mail: rio@madi.ru*

Подписано в печать 06.06.2019 г. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 13,5. Тираж 300 экз. Заказ . Цена 440 руб.

МАДИ, Москва, 125319, Ленинградский пр-т, 64.

© МАДИ, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>6</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>РАЗДЕЛ I. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИХ СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.....</b>	<b>9</b>
<b>Глава 1. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>9</b>
1.1. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам.....	9
1.2. Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки .....	10
1.3. Методы повышения конструкционной прочности.....	17
1.4. Классификация конструкционных материалов.....	20
<i>Контрольные вопросы и задания.....</i>	<i>21</i>
<b>Глава 2. СТАЛИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЖЕСТКОСТЬ, СТАТИЧЕСКУЮ     И ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ, ВЫСОКИЕ     УПРУГИЕ СВОЙСТВА .....</b>	<b>22</b>
2.1. Классификация конструкционных сталей. ....	22
2.2. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей ....	24
2.3. Углеродистые стали .....	26
2.3.1. Углеродистые стали обыкновенного качества .....	26
2.3.2. Углеродистые качественные стали .....	28
2.4. Легированные машиностроительные стали .....	30
2.4.1. Влияние легирующих элементов на механические свойства стали.....	30
2.4.2. Легированные стали нормальной и повышенной статической прочности.....	31
2.4.3. Легированные высокопрочные стали .....	35
2.4.4. Легированные стали с повышенной циклической прочностью .....	40
2.5. Стали с высокими упругими свойствами.....	45
2.5.1. Основные требования к пружинным материалам .....	45
2.5.2. Рессорно-пружинные стали .....	46
<i>Контрольные вопросы и задания.....</i>	<i>48</i>
<b>Глава 3. МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ВОЗДЕЙСТВИЮ     ТЕМПЕРАТУРЫ И РАБОЧЕЙ СРЕДЫ .....</b>	<b>50</b>
3.1. Хладостойкие материалы.....	50
3.1.1. Критерии хладостойкости стальных материалов.....	50
3.1.2. Хладостойкие стали климатического холода .....	51
3.1.3. Цветные хладостойкие сплавы .....	59
3.1.4. Неметаллические хладостойкие материалы.....	60
3.2. Жаропрочные сплавы .....	60
3.2.1. Основные группы жаропрочных материалов.....	62
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>64</i>

<b>Глава 4. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ.....</b>	<b>65</b>
4.1. Стали с высокой технологической пластичностью и свариваемостью.....	65
4.2. Железоуглеродистые сплавы с высокими литейными свойствами .....	69
4.2.1. Разновидности чугунов .....	70
4.2.2. Серые чугуны .....	71
4.2.3. Высокопрочные чугуны.....	75
4.2.4. Чугуны с вермикулярным графитом .....	76
4.2.5. Ковкие чугуны .....	78
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>79</i>
<b>Глава 5. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>80</b>
5.1. Полимеры.....	80
5.1.1. Состав и строение полимеров .....	80
5.1.2. Основные свойства полимеров.....	83
5.2. Пластмассы.....	86
5.2.1. Общая характеристика пластмасс.....	86
5.2.2. Термопластичные пластмассы .....	88
5.2.3. Термореактивные пластмассы.....	93
5.2.4. Газонаполненные пластмассы.....	98
5.2.5. Рекомендации по использованию пластмасс в машиностроении .....	98
5.3. Эластомеры .....	101
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>104</i>
<b>Глава 6. ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>106</b>
6.1. Общие сведения.....	106
6.2. Конструкционные порошковые материалы .....	109
6.2.1. Износостойкие порошковые материалы. ....	111
6.3. Триботехнические пористые материалы.....	115
6.3.1. Антифрикционные пористые материалы .....	115
6.3.2. Фрикционные пористые материалы.....	117
6.4. Пористые фильтрующие элементы .....	118
<i>Контрольные вопросы .....</i>	<i>121</i>
<b>Глава 7. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....</b>	<b>122</b>
7.1. Общая характеристика и классификация .....	123
7.2. Композиционные материалы с металлической матрицей .....	124
7.2.1. Дисперсно-упрочненные композиты .....	125
7.2.2. Волокнистые композиционные материалы .....	128
7.3. Композиционные материалы с полимерной матрицей .....	132
7.4. Композиционные материалы с керамической матрицей .....	134
<i>Контрольные вопросы и задания.....</i>	<i>135</i>
<b>РАЗДЕЛ II. ИЗНОС И ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>136</b>
<b>Глава 8. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВИДЫ ИЗНОСА.....</b>	<b>136</b>
8.1. Характеристики износа, виды изнашивания деталей и пути уменьшения их износа.....	136
8.1.1. Механическое изнашивание .....	139
8.1.2. Молекулярно-механическое изнашивание.....	145

8.1.3. Коррозионно-механическое изнашивание.....	148
8.1.4. Избирательный перенос.....	150
8.1.5. Водородное изнашивание.....	152
<i>Контрольные вопросы и задания.....</i>	<i>154</i>
<b>Глава 9. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....</b>	<b>155</b>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>159</i>
<b>Глава 10. ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....</b>	<b>160</b>
10.1. Материалы с высокой твердостью поверхности.....	160
10.1.1. Материалы, устойчивые к абразивному изнашиванию .....	160
10.1.2. Материалы, устойчивые к усталостному виду изнашивания .....	162
10.1.3. Материалы, устойчивые к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок.....	166
10.2. Графитизированные стали.....	167
10.3. Износостойкие порошковые материалы.....	168
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>172</i>
<b>Глава 11. АНТИФРИКЦИОННЫЕ И ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>173</b>
11.1. Антифрикционные материалы.....	173
11.1.1. Металлические антифрикционные материалы .....	174
11.1.2. Полимерные антифрикционные материалы.....	178
11.1.3. Антифрикционные порошковые материалы .....	179
11.1.4. Комбинированные антифрикционные материалы .....	183
11.2. Фрикционные материалы .....	185
11.2.1. Фрикционные устройства и их назначение .....	185
11.2.2. Требования к фрикционным устройствам.....	186
11.2.3. Материалы для фрикционных устройств .....	188
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>191</i>
<b>РАЗДЕЛ III. ЗАЩИТНО-ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>193</b>
<b>Глава 12. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ НА ИХ ОСНОВЕ .....</b>	<b>193</b>
12.1. Лакокрасочные покрытия и требования к ним .....	193
12.2. Лакокрасочные материалы .....	194
12.2.1. Компоненты ЛКМ .....	196
12.2.2. Разновидности ЛКМ, маркировка и назначение.....	199
<b>Глава 13. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКИЕ И ПЛАСТМАССОВЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ .....</b>	<b>206</b>
13.1. Химико-термические защитные покрытия .....	206
13.2. Пластмассовые защитные покрытия.....	207
<b>Глава 14. ГЕРМЕТИКИ.....</b>	<b>210</b>
<b>Глава 15. СВЕТООТРАЖАЮЩИЕ, ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИЕ, ШУМО- И ВИБРОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....</b>	<b>212</b>
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>215</i>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>216</b>

**СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

**КХ** – климатический холод

**КМ** – композиционный материал

**САП** – спечённые алюминиевые порошки

**САС** – спечённые алюминиевые сплавы

**ДСП** – древесно-слоистые пластики

**ИП** – избирательный перенос

**ПАВ** – поверхностно-активные вещества

**ФУ** – фрикционные устройства

**АФМ** – антифрикционные материалы

**ФПМ** – фрикционные полимерные материалы

**ПМ** – порошковые материалы

**ППД** – поверхностно-пластическая деформация

**ТКЛР** – температурный коэффициент линейного расширения

**ТМО** – термомеханическая обработка

**ВТМО** – высокотермомеханическая обработка

**НТМО** – низкотермомеханическая обработка

**ТВЧ** – ток высокой частоты

**ЛКП** – лакокрасочные покрытия

**ЛКМ** – лакокрасочные материалы

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире возросли скорости эксплуатации, режимы силового и температурного нагружения транспортных средств, что повлекло интенсификацию условий эксплуатации деталей и сборочных единиц многих машин различного назначения. Всё это вызвало применение большого количества новых конструкционных материалов для их изготовления.

Любое машиностроительное изделие, любую составляющую его деталь изготавливают из материалов, удовлетворяющих по совокупности техническим, эксплуатационным, технологическим, экономическим, экологическим и иным требованиям, и таким образом, обеспечивающих выполнение служебного назначения. Такие материалы принято называть конструкционными. Порой можно встретить определение, по которому к конструкционным материалам относят только такие, из которых изготавливают детали (элементы конструкции), воспринимающие силовые нагрузки. На самом же деле конструкционные материалы должны воспринимать любые внутренние и внешние физические воздействия, например, выполнять фрикционную и антифрикционную, тепло – и шумоизолирующую, экранирующую, герметизирующую функции и т.п. Способность материалов удовлетворять предъявленным требованиям выявляется при анализе их свойств, т.е. характеристик, определяющих поведение материала при производстве, а затем функционирование детали в составе изделия или сложной технической системы под действием приложенных внешних и внутренних физических воздействий. В настоящее время разработан и находит применение широкий спектр конструкционных материалов, обладающих той или иной совокупностью свойств. Задача конструктора – выбрать из потенциального множества имеющихся материалов наиболее рациональный, т.е. получить максимальное качество при минимальной себестоимости детали и изделия в целом, что позволило бы повысить мощности выпускаемых машин, их надежность, экономичность и конкурентоспособность.

Для этого должен быть решен вопрос о расширении и систематическом обновлении номенклатуры и ассортимента конструкционных материалов, внедрении высокоэффективных методов повышения их прочностных свойств, коррозионно- и износостойкости; об увеличении производства новых композитных конструкционных материалов; изделий на основе порошковой металлургии, порошков-

сплавов, заменяющих черные и цветные металлы; широком применении малооперационной и безотходной технологии, а также прогрессивной технологии обработки.

Целью изучения дисциплины является формирование у студентов данной специальности знаний теоретических основ: прочности и износостойкости конструкционных сталей и сплавов, пластмасс, порошковых и композиционных, лакокрасочных материалов и других материалов в машиностроении. Основная задача – подготовка специалистов, умеющих на основе современных научных и технических достижений отечественного и зарубежного транспортного машиностроения обеспечить прочность и надежность узлов и деталей автомобиля путем рационального использования конструкционных и защитно-отделочных материалов с минимальной стоимостью изготовления. Для этого необходимо научить студентов системному подходу, связанному с выбором конструкционных материалов при проектировании транспортных средств, а также в ремонтно-восстановительных работах в сервисном обслуживании; обучить студентов современным методам подбора материалов, безопасных в эксплуатации; сформировать у них навыки в определении рационального использования материалов, его экономической оценки и целесообразности при проектировании и подготовить студентов к самостоятельному решению основных задач в области проектирования узлов и агрегатов автомобиля в целом.

В учебном пособии освещены вопросы конструкционной прочности и износостойкости материалов, подробно рассмотрены как металлические, так и неметаллические конструкционные материалы (пластмассы, порошковые и композиционные материалы и т.п.), их свойства и применение. Уделено внимание защитно-отделочным материалам (эмали, лаки, грунтовки, герметики и т. п.), а также энергопоглощающим, светоотражающим и виброзащитным материалам.

## РАЗДЕЛ I. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИХ СВОЙСТВА И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

**Конструкционными** называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, подвергающихся механическим нагрузкам. Детали машин и приборов характеризуются большим разнообразием форм, размеров, условий эксплуатации. Они работают при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами.

От правильного выбора конструкционного материала зависят качество, надежность, экономичность и долговечность деталей и машины в целом. Все конструкционные материалы можно условно разделить на однородные и композиционные, металлические и неметаллические (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Конструкционные материалы

### Глава 1. КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

#### 1.1. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам

Выбор материала и термообработки деталей машин определяется эксплуатационными, конструктивными (обеспечение надежности), технологическими (единичное, серийное, массовое производство), и экономическими требованиями.

**Эксплуатационные требования** имеют первостепенное значение. Для того чтобы обеспечить работоспособность конкретных машин и приборов, материал должен иметь высокую конструкционную прочность.

*Конструкционной прочностью* называется комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную и длительную работу материала в условиях эксплуатации.

Требуемые значения механических свойств материала для конкретного изделия зависят не только от силовых факторов, но и от воздействия на него рабочей среды и температуры.

Среда – жидкая, газообразная, ионизированная, радиационная, в которой работает материал, оказывает существенное и преимущественно отрицательное влияние на его механические свойства, снижая работоспособность деталей.

Для того чтобы противостоять рабочей среде, материал должен обладать не только механическими, но и определенными физико-химическими свойствами: *стойкостью к электрохимической коррозии, жаростойкостью (окалиностойкостью), радиационной стойкостью, влагостойкостью, способностью работать в условиях вакуума и др.*

**Технологические требования** (технологичность материала) направлены на обеспечение наименьшей трудоемкости изготовления деталей и конструкций. Технологичность материала оценивается обрабатываемостью резанием, давлением, свариваемостью, способностью к литью, а также прокаливаемостью, склонностью к деформации и короблению при термической обработке. Технологичность материала имеет важное значение, так как от нее зависят производительность и качество изготовления деталей.

**Экономические требования** сводятся к тому, чтобы материал имел невысокую стоимость и был доступным. Стали и сплавы по возможности должны содержать минимальное количество легирующих элементов. Использование материалов, содержащих легирующие элементы, должно быть обосновано повышением эксплуатационных свойств деталей.

Экономические требования, так же как и технологические, приобретают особое значение при массовом масштабе производства.

Таким образом, качественный конструкционный материал должен удовлетворять комплексу требований.

## **1.2. Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки**

**Конструкционная прочность** – комплексная характеристика, включающая сочетание критериев прочности, жесткости, надежности и долговечности.

Критерии прочности материала выбирают в зависимости от условий его работы. При статических нагрузках критериями прочности являются предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_T$ ), которые характеризуют сопротивление материала пластической деформации.

Поскольку при работе большинства деталей пластическая деформация недопустима, то их несущую способность, как правило, определяют по пределу текучести. Для приближенной оценки статической прочности используют твердость HB (для сталей справедливо эмпирическое соотношение  $\sigma_B = HB/3$ ).

Большинство деталей машин испытывает длительные *циклические нагрузки*. Критерий их прочности – предел выносливости  $\sigma_R$  (при симметричном круговом изгибе  $\sigma_{-1}$ ).

По значениям выбранных критериев прочности рассчитывают допустимые рабочие напряжения. Однако повышение уровня прочности материала и, как следствие, рабочих напряжений сопровождается увеличением упругих деформаций

$$\varepsilon_{\text{упр}} = \sigma/E,$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости.

Для ограничения упругой деформации материал должен обладать высоким модулем упругости (или сдвига), являющимся критерием его *жесткости*. Именно критерии жесткости, а не прочности обуславливают размеры корпусов редукторов и других деталей, от которых требуется сохранение точных размеров и формы.

Возможно и противоположное требование. Для пружин, мембран и других чувствительных упругих элементов приборов, наоборот, важно обеспечить большие упругие перемещения.

Поскольку  $\varepsilon_{\text{упр}}^{\text{max}} = \sigma_{\text{упр}}/E$ , то от материала требуются высокий предел упругости и низкий модуль упругости.

Таким образом, в качестве критериев конструкционной прочности выбирают те характеристики, которые наиболее полно отражают прочность в условиях эксплуатации.

Кроме стандартных механических характеристик  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$ , характеризующих металлургическое и технологическое качество материала, для оценки конструкционной прочности необходимы характеристики прочности при рабочих температурах и в эксплуатационных средах.

**Надежность** – свойство материала противостоять хрупкому разрушению. Хрупкое разрушение вызывает внезапный отказ деталей в условиях эксплуатации. Оно считается наиболее опасным из-за про-

текания с большой скоростью при напряжениях ниже расчетных, а также возможных аварийных последствий.

Для предупреждения *хрупкого разрушения* конструкционные материалы должны обладать достаточной пластичностью ( $\delta$ ,  $\psi$ ) и ударной вязкостью ( $KCU$ ). Необходимо также учитывать то, что в условиях эксплуатации действуют факторы, дополнительно снижающие их пластичность, вязкость и увеличивающие опасность хрупкого разрушения. Это концентраторы напряжений (надрезы), понижение температуры, динамические нагрузки, увеличение размеров деталей (масштабный фактор).

Чтобы избежать внезапных поломок в условиях эксплуатации, необходимо учитывать трещиностойкость материала. **Трещиностойкость** – группа параметров надежности, характеризующих способность материала тормозить развитие трещины.

Очагами разрушения высокопрочных материалов служат небольшие трещины эксплуатационного или технологического происхождения (могут возникать при сварке, термической обработке), а также трещиноподобные дефекты (неметаллические включения, скопления дислокаций и т.п.). Трещины являются острыми концентраторами напряжений, местные (локальные) напряжения в вершине которых могут во много раз превышать средние расчетные напряжения (рис. 1.2).

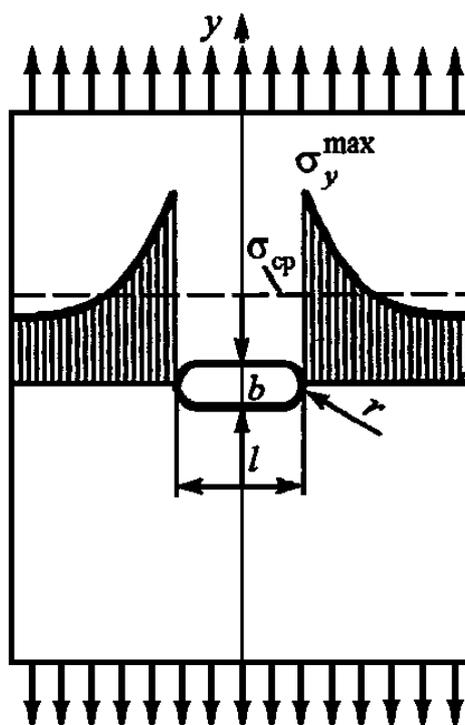


Рис. 1.2. Концентрация напряжений вблизи эллиптической трещины

Для трещины длиной  $l$  и радиусом  $r$  (рис. 1.2) напряжение в вершине

$$\sigma_y^{\max} = 2\sigma_{\text{ср}}\sqrt{\frac{l}{r}}. \quad (1.1)$$

Концентрация напряжений тем больше, чем длиннее трещина и острее ее вершина.

Для пластичных материалов опасность таких дефектов невелика, а хрупкие материалы, наоборот, чрезвычайно чувствительны к надрезам. В силу того что дислокации заблокированы и пластическая деформация невозможна, при увеличении средних напряжений локальные напряжения  $\sigma_y^{\max}$  повышаются настолько, что вызывают разрыв межатомных связей и развитие трещины. Рост трещины не тормозится, как в пластичных материалах, а наоборот, ускоряется. После достижения некоторой критической длины наступает самопроизвольный лавинообразный рост трещины, вызывающий хрупкое разрушение.

Так как высокопрочные материалы обладают определенной пластичностью, то для них реальную опасность представляют трещины не любых размеров, а только критической длины  $l_{\text{кр}}$ . Подростание трещины до  $l_{\text{кр}}$  тормозится в них местной пластической деформацией. Но при определенном сочетании рабочего напряжения и длины дефекта равновесное положение трещины нарушается и происходит самопроизвольное разрушение.

Оценку надежности высокопрочных материалов по размеру допустимого дефекта (меньше критического) проводят по критериям Ж. Ирвина. Им предложено два критерия трещиностойкости, из которых наибольшее применение имеет *критерий*  $K$  – коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины. Он определяет растягивающие напряжения  $\sigma_y$  в любой точке (рис. 1.3) впереди вершины трещины:

$$\sigma_y = K/\sqrt{2\pi x}. \quad (1.2)$$

Знаменатель дроби обращается в единицу при  $x \approx 0,16$ , поэтому  $K$  численно равен  $\sigma_y$  на расстоянии  $\approx 0,16$  мм от вершины трещины.

Критерий  $K$  для наиболее жесткого нагружения (плоская деформация растяжением) обозначают  $K_1$ , а при достижении критического значения, когда стабильная трещина переходит в нестабильную, –  $K_{1\text{с}}$ . Критерий  $K_{1\text{с}}$  показывает, какого значения (интенсивности) достигает напряжение вблизи вершины трещины в момент разрушения. Он связывает приложенное среднее напряжение с критической длиной трещины:

$$K_{1\text{с}} = \sigma_{\text{ср}}\sqrt{\alpha\pi l_{\text{кр}}}, \quad (1.3)$$

где  $\alpha$  – безразмерный коэффициент, характеризующий геометрию трещины.

Из соотношения (1.3) следует, что единица измерения  $K_{1c}$  – МПа м<sup>1/2</sup>.

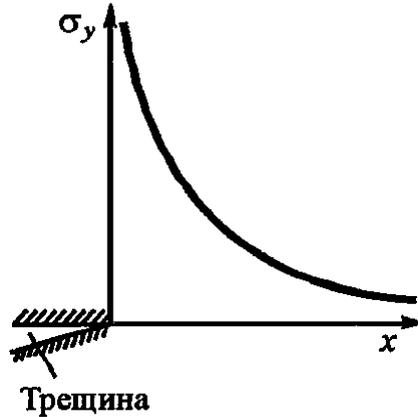


Рис. 1.3. Зависимость напряжения от расстояния до вершины трещины

Значение  $K_{1c}$  определяют экспериментально на образцах с надрезом и с заранее созданной на дне этого надреза усталостной трещиной (рис. 1.4). Для расчета  $K_{1c}$  при нагружении образца фиксируют усилие в момент подрастания трещины на некоторую длину и перехода ее к нестабильному распространению.

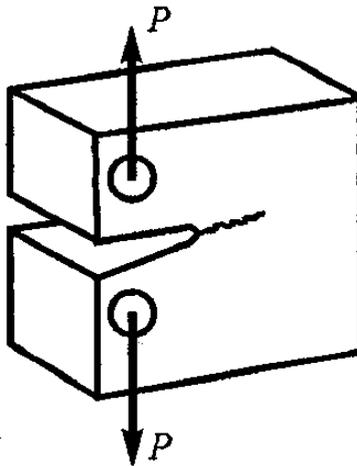


Рис. 1.4. Образец для определения критерия  $K_{1c}$

Значение  $K_{1c}$  зависит от степени пластической деформации у вершины трещины (ее затупления) и характеризует сопротивление развитию вязкой трещины. По этой причине критерий  $K_{1c}$  называют *вязкостью разрушения*. Чем значение  $K_{1c}$  больше, тем выше сопротивление материала вязкому разрушению и его надежность. Кроме качественной характеристики надежности,  $K_{1c}$  дополняет параметры

$\sigma_{0,2}$  и  $E$  при расчётах на прочность деталей из высокопрочных материалов (сталей с  $\sigma_B \geq 1200$  МПа, титановых сплавов с  $\sigma_B \geq 800$  МПа и алюминиевых сплавов с  $\sigma_B \geq 450$  МПа). Этот критерий позволяет определить безопасный размер трещины при известном рабочем напряжении или, наоборот, безопасное напряжение при известном размере дефекта. Например, при рабочем напряжении  $\sigma_p$  (рис. 1.5) трещина длиной  $l$  будет безопасной для материала II и вызовет разрушение в материале I, имеющем меньшее значение  $K_{1c}$  ( $K'_{1c} < K''_{1c}$ ).

Для оценки надёжности материала используют также следующие параметры: ударную вязкость  $KCV$  или  $KCT$ , температурный порог хладноломкости  $t_{50}$ . Однако – это качественные, непригодные для расчета на прочность, параметры. Параметром  $KCV$  оценивают пригодность материала для сосудов давления, трубопроводов и других конструкций повышенной надёжности. Параметр  $KCT$ , определяемый на образцах с трещиной усталости у основания надреза, более показателен. Он характеризует работу развития трещины при ударном изгибе и оценивает способность материала тормозить начавшееся разрушение. Если материал имеет  $KCT = 0$ , то это означает, что процесс его разрушения идёт без затраты работы. Такой материал хрупок. И наоборот, чем больше параметр  $KCT$ , определенный при рабочей температуре, тем выше надёжность материала в условиях эксплуатации. Так же как и  $K_{1c}$ ,  $KCT$  учитывают при выборе материала для конструкций особо ответственного назначения (роторов турбин и т.п.).

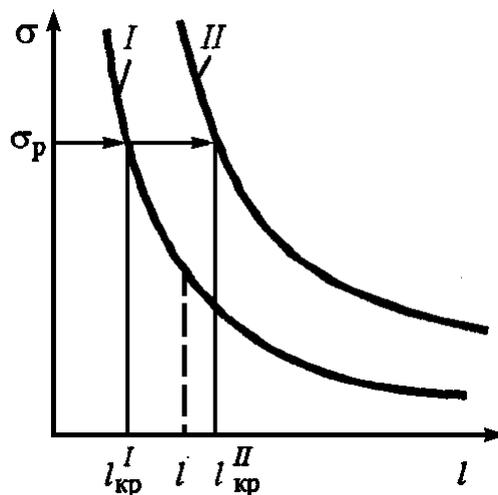


Рис. 1.5. Зависимость критического напряжения  $\sigma$  от размера дефекта  $l$  для двух материалов (I и II) с разным значением  $K_{1c}$  ( $K''_{1c} > K'_{1c}$ )

Порог хладноломкости характеризует влияние снижения температуры на склонность материала к хрупкому разрушению. О пригодности

материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и  $t_{50}$ . При этом, чем ниже температура перехода в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре, тем больше температурный запас вязкости и выше гарантия от хрупкого разрушения.

На рис. 1.6 показан случай, когда ударная вязкость двух сталей при температуре эксплуатации, равной  $20^{\circ}\text{C}$ , одинакова. Однако переход в хрупкое состояние стали 1 (мелкозернистой) заканчивается при  $-40^{\circ}\text{C}$ , а стали 2 (крупнозернистой) – при  $0^{\circ}\text{C}$ . По сравнению с температурой эксплуатации температурный запас вязкости у стали 1 составит  $60^{\circ}\text{C}$ , а у стали 2 – лишь  $20^{\circ}\text{C}$ . Сталь 1 более надежна в работе, так как возможное понижение температуры эксплуатации относительно расчетной при наличии трещин и ударной нагрузки не вызовет в ней хрупкого разрушения.

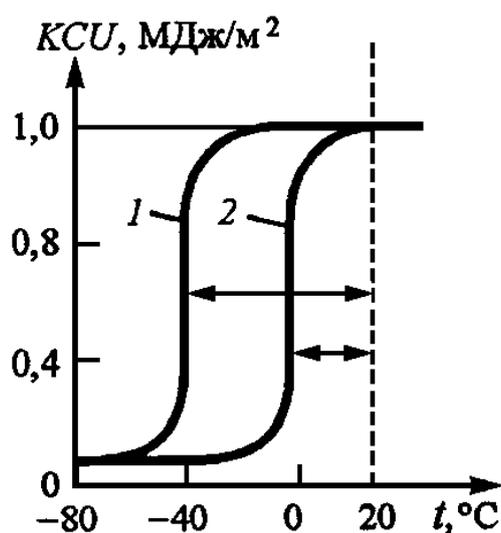


Рис. 1.6. Зависимость ударной вязкости от температуры испытания мелкозернистой (1) и крупнозернистой (2) стали (0,22% С)

**Долговечность** – свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения (постепенного отказа), обеспечивая работоспособность деталей в течение заданного времени (ресурса). Причины потери работоспособности разнообразны: развитие процессов усталости, изнашивания, ползучести, коррозии и др. Эти процессы вызывают постепенное накопление необратимых повреждений в материале и его разрушение. Обеспечение долговечности материала означает уменьшение до требуемых значений скорости его разрушения.

Для большинства деталей машин (более 80%) долговечность определяется сопротивлением материала усталостным разрушениям

(циклической долговечностью) или сопротивлением изнашиванию (износостойкостью).

**Циклическая долговечность** характеризует работоспособность материала в условиях многократно повторяющихся циклов напряжений. Она тем выше, чем ниже скорость зарождения и скорость развития трещины усталости.

**Износостойкость** характеризует сопротивление материала разрушению поверхности путем отделения его частиц под воздействием силы трения. Износостойкость оценивают величиной, обратной скорости изнашивания.

Долговечность деталей, работающих при высоких температурах (детали энергетических установок, двигателей), определяется **скоростью ползучести** – скоростью развития пластической деформации при постоянном (ниже предела текучести) напряжении. Ограничение скорости ползучести достигается применением жаропрочных материалов.

Долговечность деталей, работающих в атмосфере нагретых сухих газов или жидких электролитов, зависит от скорости химической или электрохимической коррозии. Работоспособность в таких средах сохраняют жаростойкие и коррозионно-стойкие материалы.

Таким образом, работоспособность материала детали в условиях эксплуатации характеризуют следующие критерии конструкционной прочности:

1) критерии прочности  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{-1}$ , которые при заданном запасе прочности определяют допустимые рабочие напряжения, массу и размеры деталей;

2) модуль упругости  $E$ , который при заданной геометрии детали определяет величину упругих деформаций, т.е. ее жёсткость;

3) пластичность  $\delta$ ,  $\psi$ , ударная вязкость  $KCT$ ,  $KCV$ ,  $KCU$ , вязкость разрушения  $K_{1C}$ , порог хладноломкости  $t_{50}$ , которые оценивают надёжность материала в эксплуатации;

4) циклическая долговечность, скорости изнашивания, ползучести, коррозии, определяющие долговечность материала.

### 1.3. Методы повышения конструкционной прочности

Высокая прочность и долговечность конструкций при минимальной массе и наибольшей надёжности достигаются технологическими, металлургическими и конструкторскими методами.

Наибольшую эффективность имеют технологические и металлургические методы, цель которых – повышение механических свойств и качеств материала.

Из механических свойств важнейшее – прочность материала, повышение которой при достаточном запасе пластичности и вязкости ведет к снижению материалоемкости конструкции и в известной степени к повышению ее надежности и долговечности.

**Прочность** – свойство, зависящее от энергии межатомной связи, структуры и химического состава материала. Энергия межатомного взаимодействия непосредственно определяет характеристики упругих свойств (модули нормальной упругости и сдвига), а также так называемую теоретическую прочность.

Современные методы повышения прочности материала основаны на создании такого структурного состояния, которое обеспечивало бы максимальную задержку (блокировку) дислокаций. К методам упрочнения относятся легирование, пластическая деформация, термическая, термомеханическая и химико-термическая обработка. Повышение прочности указанными методами основано на ряде структурных факторов:

1. *Увеличение плотности дислокаций.* Чем больше плотность дислокаций, тем выше сопротивление пластическому деформированию.

Теория дислокаций дает следующую зависимость между пределом текучести  $\sigma_T$  и плотностью дислокаций  $\rho$ :

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha b G \rho,$$

где  $\sigma_0$  – предел текучести до упрочнения;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий вклад других механизмов торможения дислокаций;  $b$  – вектор Бюргерса;  $G$  – модуль сдвига.

Целесообразно увеличивать плотность дислокаций до  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

2. *Создание дислокационных барьеров* в виде границ зерен, субзерен, дисперсных частиц вторичных фаз. Подобные препятствия на пути движения дислокаций требуют дополнительного повышения напряжения для их продвижения и тем самым способствуют упрочнению. Роль эффективного барьера выполняют границы зерен.

3. *Измельчение зерна.* Важная особенность этого фактора упрочнения состоит в том, что измельчение зёрен (увеличение протяженности их границ) сопровождается повышением ударной вязкости. Объясняется это уменьшением размеров зародышевых трещин и затруднением их развития. Трещина вынуждена изменять направление движения при переходе от одного зерна к другому; в результате ее траектория и сопротивление движению увеличиваются.

Сильное торможение передвижению дислокаций создают дисперсные частицы вторичной фазы. Такой фактор упрочнения характерен для гетерогенных сплавов, подвергнутых закалке и старению.

4. *Образование полей упругих напряжений*, искажающих кристаллическую решетку. Такие поля образуются вблизи точечных дефектов-вакансий, примесных атомов и, главным образом, атомов легирующих элементов.

Упрочнение при легировании растет пропорционально концентрации легирующего элемента в твердом растворе и относительной разницы атомных радиусов компонентов.

Атомы внедрения (С, О, Н, N) могут вносить большой вклад в упрочнение, если они скапливаются на дислокациях и блокируют их, образуя сегрегации или атмосферы Коттрелла.

Проблема повышения конструкционной прочности состоит не столько в повышении прочностных свойств, сколько в том, как при высокой прочности обеспечить высокое сопротивление хрупкому разрушению, т.е. надежность материала. В углеродистых сталях при содержании 0,4% С после закалки на мартенсит с последующим низким отпуском  $\sigma_b \approx 2400$  МПа, при 0,6% С –  $\sigma_b \approx 2800$  МПа. Однако при такой прочности стали хрупки ( $KCT \approx 0$ ) и эксплуатационно ненадежны.

*Заданные прочность, надежность, долговечность достигаются формированием определенного структурного состояния.* Формированию благоприятной структуры и обеспечению надежности способствуют рациональное легирование, измельчение зерна, повышение металлургического качества металла.

Рациональное легирование предусматривает введение в сталь и сплавы нескольких элементов при невысокой концентрации каждого с тем, чтобы повысить пластичность и вязкость. Измельчение зерна осуществляется легированием и термической обработкой, особенно при использовании высокоскоростных способов нагрева – индукционного и лазерного.

Наиболее эффективное измельчение субструктуры (блоков мозаики) достигается при высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО). Она предусматривает интенсивную пластическую деформацию аустенита с последующей закалкой, при которой наклепанный аустенит превращается в мартенсит, и низкий отпуск. Такая комбинированная обработка формирует структуру с высокой плотностью дислокаций и достаточно равномерным их распределением. В результате ВТМО обеспечивает наиболее благоприятное сочетание высокой прочности с повышенной пластичностью, вязкостью и сопротивлением разрушению.

Более надежной работе высоконапряженных деталей способствует повышение чистоты металла, связанное с удалением вредных примесей – серы, фосфора, газообразных элементов – кислорода, водорода, азота и зависящих от их содержания неметаллических включений – оксидов, сульфидов и др.

При равной прочности более чистый металл обладает более высоким сопротивлением вязкому разрушению и более низким порогом хладноломкости.

*Для повышения циклической прочности и износостойкости важно затруднить деформацию поверхности деталей. Это достигается поверхностной закалкой, химико-термической обработкой (азотированием, цементацией), поверхностным пластическим деформированием (обдвкой дробью, обкаткой роликами).*

*Конструкторские методы* предусматривают обеспечение равнопрочности высоконапряженных деталей. При их проектировании избегают резких перепадов жесткости, глубоких канавок, галтелей малого радиуса и других конструктивных надрезов. Если этого сделать нельзя, то для смягчения концентрации напряжений применяют местное упрочнение для формирования остаточных напряжений сжатия.

Принципиально иной способ достижения высокой конструкционной прочности использован в *композиционных материалах* – новом классе высокопрочных материалов. Такие материалы представляют собой композицию из мягкой матрицы и высокопрочных волокон. Волокна армируют матрицу и воспринимают всю нагрузку. В этом состоит принципиальное отличие композиционных материалов от обычных сплавов, упрочненных, например, дисперсными частицами. В сплавах основную нагрузку воспринимает матрица (твердый раствор), а дисперсные частицы тормозят в ней движение дислокаций, сильно снижая тем самым ее пластичность. В композиционных материалах нагрузку воспринимают высокопрочные волокна, связанные между собой пластичной матрицей. Матрица нагружена слабо и служит для передачи и распределения нагрузки между волокнами.

#### **1.4. Классификация конструкционных материалов**

Предлагаемая классификация подразделяет конструкционные материалы по свойствам, определяющим выбор материала для конкретных деталей и конструкций. Каждая группа материалов оценивается соответствующими критериями, обеспечивающими работоспо-

способность в эксплуатации. Универсальные материалы рассматриваются в нескольких группах, если возможность применения их определяется различными критериями.

В соответствии с выбранным принципом классификации все конструкционные материалы подразделяют на следующие группы: 1 – материалы, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность, высокие упругие свойства (стали); 2 – материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды; 3 – материалы с особыми технологическими свойствами; 4 – неметаллические материалы (пластмассы, порошки, композиты); 5 – износостойкие материалы.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Какие материалы называют конструкционными? Назовите требования, предъявляемые к конструкционным материалам.
2. Назовите критерии оценки конструкционной прочности материалов в зависимости от условий работы.
3. Назовите методы повышения конструкционной прочности.
4. На какие группы классифицируют конструкционные материалы?

## Глава 2. СТАЛИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ЖЕСТКОСТЬ, СТАТИЧЕСКУЮ И ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ, ВЫСОКИЕ УПРУГИЕ СВОЙСТВА

Детали машин и оборудования, передающие нагрузку, должны обладать жесткостью и прочностью, достаточными для ограничения упругой и пластической деформации при гарантированной надежности и долговечности. Из многообразия материалов в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют сплавы на основе железа – чугуны и особенно стали. Стали обладают высоким, наследуемым от железа, модулем упругости ( $E = 210$  ГПа) и высокой жесткостью. Высокую жесткость стали сочетают с достаточной статической и циклической прочностью, значение которой можно регулировать в широком диапазоне изменением концентрации углерода, легирующих элементов и технологии термической и химико-термической обработки.

При соответствующем легировании и технологии термической обработки сталь может быть износостойкой, коррозионно-стойкой, жаростойкой и жаропрочной или хладостойкой, а также приобрести упругие свойства.

Благодаря этим достоинствам стали являются основным металлическим материалом в транспортном машиностроении.

### 2.1. Классификация конструкционных сталей

**Стаями** называют железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 2,14%. По сравнению с другими материалами стали имеют высокую прочность, пластичность, хорошо поддаются термической, химико-термической и механической обработке.

Стали классифицируют по химическому составу, качеству, степени раскисления, структуре, прочности и назначению.

**По химическому составу** стали классифицируют на углеродистые и легированные. По концентрации углерода те и другие подразделяют на *низкоуглеродистые* ( $<0,3\%$  C), *среднеуглеродистые* (0,3–0,7% C) и *высокоуглеродистые* ( $>0,7\%$  C). Легированные стали в зависимости от введенных элементов подразделяют на хромистые, марганцовистые, хромоникелевые, хромкремнемарганцевые и многие другие. По количеству введенных элементов их разделяют на *низко-, средне- и высоколегированные*. В низколегированных сталях количество легирующих элементов не превышает 5%, в среднелегированных содержится от 5 до 10%, в высоколегированных – более 10%.

**По качеству** стали классифицируют на стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные в зависимости от вредных примесей.

Стали обыкновенного качества содержат до 0,055% S и 0,045% P, качественные – не более 0,04% S и 0,035% P, высококачественные – не более 0,025% S и 0,025% P, особо высококачественные – не более 0,015% S и 0,025% P.

**По степени раскисления** и характеру затвердевания стали классифицируют на спокойные, полуспокойные и кипящие. *Раскисление* – процесс удаления из жидкого металла кислорода, проводимый для предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации.

*Спокойные стали* раскисляют марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газовыделения. *Кипящие стали* раскисляют только марганцем. Перед разливкой в них содержится повышенное количество кислорода. Кипящие стали производят низкоуглеродистыми и практически без кремния ( $Si < 0,07\%$ ), но с повышенным количеством газообразных примесей. *Полуспокойные стали* по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

При классификации стали **по структуре** учитывают особенности ее строения в отожженном и нормализованном состояниях. По структуре в *отожженном* (равновесном) *состоянии* конструкционные стали бывают: 1) доэвтектоидные – структура избыточного феррита; 2) эвтектоидные – структура перлита; 3) аустенитные; 4) ферритные.

**По структуре после нормализации** стали подразделяют на перлитный, мартенситный, аустенитный, ферритный классы.

*Стали перлитного класса* имеют невысокую устойчивость переохлажденного аустенита (рис. 2.1, а). При охлаждении на воздухе они приобретают структуру перлита, сорбита или троостита. К этому классу относятся углеродистые и низколегированные стали. *Стали мартенситного класса* отличаются высокой устойчивостью переохлажденного аустенита (рис. 2.1, б); при охлаждении на воздухе они закаливаются на мартенсит. К этому классу относятся средне- или высоколегированные стали.

Стали аустенитного класса из-за повышенного количества никеля или марганца (обычно в сочетании с хромом) имеют интервал мартенситного превращения ниже  $0^{\circ}\text{C}$  и сохраняют аустенит при  $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$  (рис. 2.1, в). Структурный класс аустенитных и ферритных сталей совпадает по классификации как в отожженном, так и нормализованном состояниях.

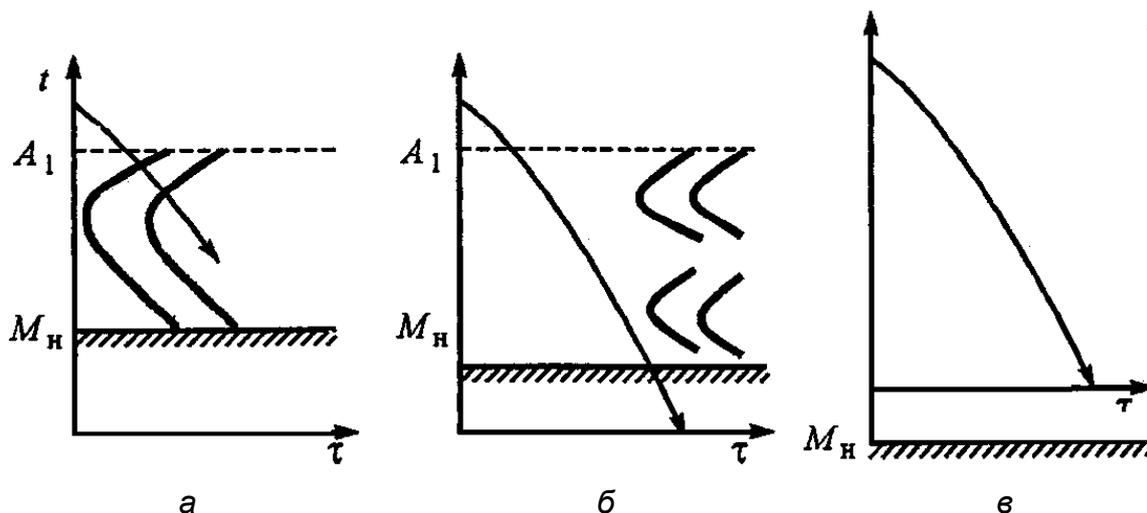


Рис. 2.1. Схемы изотермического распада аустенита сталей перлитного (а), мартенситного (б) и аустенитного (в) классов

**По прочности**, оцениваемой пределом прочности, конструкционные стали с некоторой условностью можно разделить на стали *нормальной (средней)* прочности ( $\sigma_B < 1000$  МПа), повышенной прочности ( $\sigma_B < 1500$  МПа) и высокопрочные ( $\sigma_B > 1500$  МПа).

**По назначению** конструкционные стали подразделяют на машиностроительные, предназначенные для изготовления деталей машин и механизмов, и строительные, используемые для металлоконструкций и сооружений.

## 2.2. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали

*Стали* – сложный по составу железоуглеродистый сплав. Кроме железа и углерода – основных компонентов, а также возможных легирующих элементов, сталь содержит некоторое количество постоянных и случайных примесей, влияющих на её свойства.

**Углерод**, концентрация которого в конструкционных сталях достигает 0,8%, оказывает определяющее влияние на их свойства. Степень его влияния зависит от структурного состояния стали, ее термической обработки. После термической обработки по мере повышения содержания углерода, увеличиваются прочность и твердость, но снижаются пластичность и вязкость стали (рис. 2.2, а).

Кроме того, углерод заметно повышает верхний порог хладноломкости, расширяя тем самым температурный интервал перехода стали в хрупкое состояние (рис. 2.2, б).

Влияние углерода еще более значительно при неравновесной структуре стали. После закалки на мартенсит предел прочности леги-

рованных сталей интенсивно возрастает по мере увеличения содержания углерода и достигает максимума при 0,4%С. При низком отпуске механические свойства полностью определяются концентрацией углерода в твердом растворе.

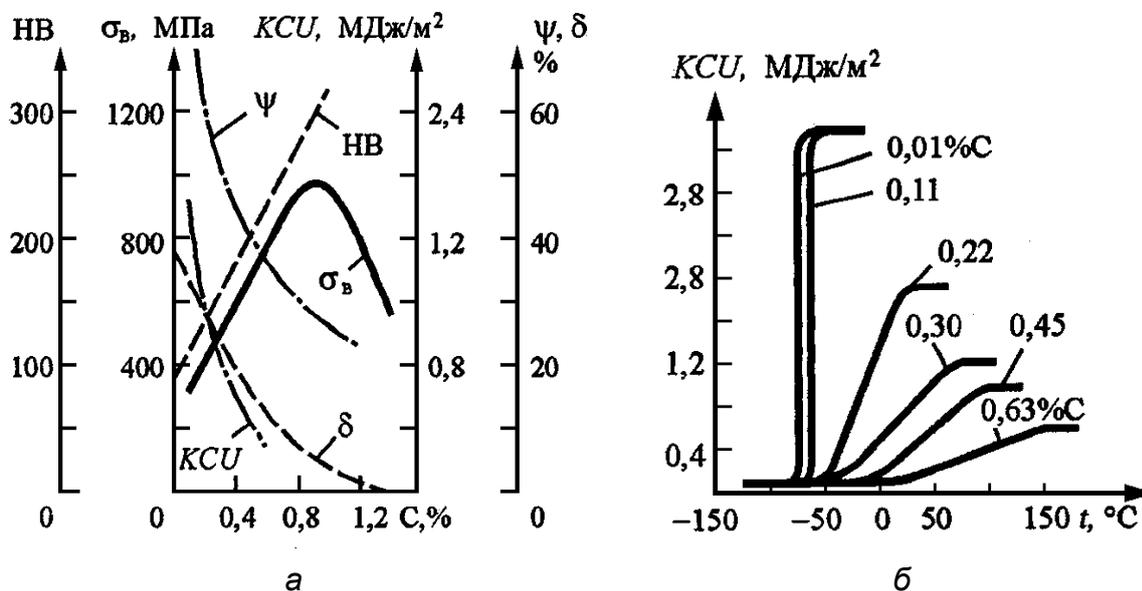


Рис. 2.2. Влияние содержание углерода: а – на механические свойства горячекатаных сталей; б – на хладноломкость стали

Углерод изменяет технологические свойства стали. При увеличении его содержания снижается способность сталей деформироваться в горячем и особенно в холодном состояниях, затрудняется свариваемость.

Постоянные примеси в стали: марганец, кремний – это полезные примеси; сера, фосфор, а также газы: кислород, азот, водород – вредные примеси (рис. 2.3).

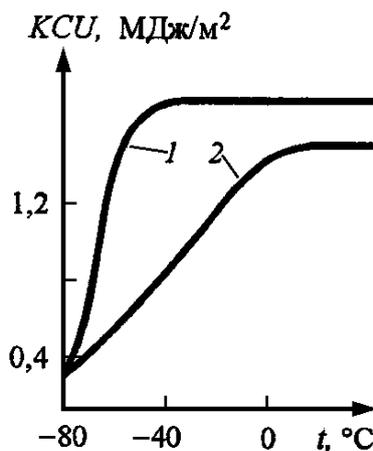


Рис. 2.3. Влияние фосфора на хладноломкость стали:  
1 – 0,008% P; 2 – 0,06% P

*Случайные примеси* – элементы, попадающие в сталь из вторичного сырья или руд отдельных месторождений. Из скрапа в сталь попадает сурьма, олово и ряд других цветных металлов. Стали, выплавленные из уральских руд, содержат медь, из керченских – мышьяк. Случайные примеси в большинстве случаев оказывают отрицательное влияние на вязкость и пластичность стали.

### **2.3. Углеродистые стали**

На долю углеродистых сталей приходится 80% от общего объёма. Это объясняется тем, что углеродистые стали дешёвы и сочетают удовлетворительные механические свойства с хорошей обрабатываемостью резанием и давлением. При одинаковом содержании углерода по обрабатываемости резанием и давлением они значительно превосходят легированные стали. Однако углеродистые стали менее технологичны при термической обработке. Из-за высокой критической скорости закаливания углеродистые стали охлаждают в воде, что вызывает значительные деформации и коробление деталей. Кроме того, для получения одинаковой прочности с легированными сталями их следует подвергать отпуску при более низкой температуре, поэтому они сохраняют более высокие закалочные напряжения, снижающие конструкционную прочность.

Главный недостаток углеродистых сталей – небольшая прокаливаемость (до 12 мм).

По *статической прочности* углеродистые стали относятся преимущественно к сталям нормальной прочности. Углеродистые конструкционные стали выпускают двух видов: обыкновенного качества и качественные.

#### **2.3.1. Углеродистые стали обыкновенного качества**

В углеродистых сталях обыкновенного качества допускается повышенное содержание вредных примесей, а также газонасыщенность и загрязнённость неметаллическими включениями. Эти стали преимущественно используют в строительстве как наиболее дешёвые, технологичные и обладающие прочностью, достаточной для изготовления металлоконструкций различного назначения.

Стали маркируют сочетанием букв «Ст» и цифрой (от 0 до 6), показывающей номер марки. Степень раскисления обозначают добавлением в спокойных сталях букв «сп», в полуспокойных – «пс», в кипящих – «кп».

Для всех сталей, кроме СтО, справедлива следующая формула:  $C (\%) \approx 0,07 \times \text{номер марки}$ . Так, в стали Ст3 содержание  $C \approx 0,07 \cdot 3 = 0,21\%$  (фактически 0,14–0,22%).

Концентрация марганца возрастает от 0,25–0,50% в стали Ст1, до 0,50–0,80% в стали Ст6. Три марки стали производят с повышенным (0,80–1,1%) содержанием марганца, на что указывает буква «Г» в марке: Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст5Гпс.

Содержание кремния зависит от способа раскисления стали: у кипящих – не более 0,05%, у полуспокойных – не более 0,15%, у спокойных – не более 0,30%.

Уровень механических свойств зависит от толщины проката. Масштабный фактор учитывает влияние скорости охлаждения горячекатаной стали. Свойства регламентированы для проката толщиной  $\Delta < 10$ , 10–20, 20–40, 40–100 и  $> 100$  мм. С увеличением толщины проката снижаются  $\sigma_{0,2}$  и  $\delta$ .

Сортамент изделий из проката отличается большим разнообразием. Прокат из углеродистых сталей обыкновенного качества предназначен для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагружаемых деталей машин и приборов. Этим сталям отдают предпочтение в тех случаях, когда *работоспособность деталей и конструкций определяется жёсткостью*.

На выбор стали большое влияние оказывают также технологические свойства, прежде всего свариваемость и способность к холодной обработке давлением. Этим технологическим требованиям в наибольшей степени отвечают низкоуглеродистые стали, из которых изготавливают сварные фермы, рамы.

Стали, поставляемые по техническим условиям, имеют также и специализированное назначение: так, стали Ст4 и особенно Ст3 широко применяют в *сельскохозяйственном машиностроении* (валики, оси, рычаги, детали, изготавливаемые холодной штамповкой, а также детали из цементуемой стали: *шестерни, червяки, поршневые пальцы* и т.п.).

*Среднеуглеродистые стали*, обладающие большей прочностью, чем низкоуглеродистые, предназначены для *железнодорожных колёс*, а также валов, шкивов, шестерён и других *деталей грузоподъёмных и сельскохозяйственных машин*. Некоторые детали из этих сталей подвергают термическому улучшению.

### 2.3.2. Углеродистые качественные стали

Эти стали характеризуются более низким, чем у сталей обыкновенного качества, содержанием вредных примесей и неметаллических включений. Их поставляют в виде проката, поковок и других полуфабрикатов с гарантированным химическим составом и механическими свойствами (табл. 2.1). Маркируют их двухзначными числами: 08, 10, 15, 20, ..., 60, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ1050-88).

Механические свойства зависят от толщины проката: при толщине проката более 80 мм показатели прочности и пластичности несколько ниже значений, приведенных в ГОСТ 1050-88. ГОСТ гарантирует механические свойства углеродистых качественных сталей после закалки и отпуска, нагартовки или термической обработки, устраняющей нагартовку – отжига или высокого отпуска. *Качественные стали* находят многостороннее применение в технике, так как в зависимости от содержания углерода и термической обработки обладают разнообразными механическими и технологическими свойствами.

Таблица 2.1

Свойства углеродистых качественных сталей  
в нормализованном состоянии (ГОСТ 1050-88)

Марка стали	С, %	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	НВ*		KSU, МДж/м <sup>2</sup>
		МПа		%				
08	0,05–0,12	330	200	33	60	131	–	–
10	0,07–0,14	340	210	31	55	143	–	–
15	0,12–0,19	380	230	27	55	149	–	–
20	0,17–0,24	420	250	25	55	163	–	–
25	0,22–0,30	460	280	23	50	170	–	0,9
30	0,27–0,35	500	300	21	50	179	–	0,8
35	0,32–0,40	540	320	20	45	207	–	
40	0,37–0,45	580	340	19	45	217	(187)	0,6
45	0,42–0,50	610	360	16	40	229	(197)	0,5
50	0,47–0,55	640	380	14	40	241	(207)	0,4
55	0,52–0,60	660	390	13	35	255	(217)	–
60	0,57–0,65	690	410	12	35	255	(229)	–

**Примечания.** 1. В сталях допускается не более 0,8% Mn; 0,37% Si; 0,045% S; 0,035% P; 0,25% Cr; 0,30% Ni; 0,30% Cu. 2. Механические свойства указаны для стальных заготовок с поперечным сечением до 80 мм. 3. Ударная вязкость сталей 25–50 определяется после улучшения – закалки и высокого отпуска при 600°С.

\* В скобках после отжига.

*Низкоуглеродистые стали* по назначению подразделяют на две подгруппы.

1. *Малопрочные и высокопластичные* стали 08, 10. Из-за способности к глубокой вытяжке их применяют для холодной штамповки различных изделий. Без термической обработки в горячекатаном состоянии эти стали используют для шайб, прокладок, кожухов и других деталей, изготавливаемых холодной деформацией и сваркой.

2. *Цементуемые* ( $C = 0,3-0,5\%$ ) – стали 15, 20, 25. Предназначены они для деталей небольшого размера (кулачки, толкатели, малонагруженные шестерни и т.п.), от которых требуется твёрдая, износостойкая поверхность и вязкая сердцевина. Поверхностный слой после цементации упрочняют закалкой в воде в сочетании с низким отпуском. В результате поверхность твёрдая, а сердцевина остается вязкой. Их используют для изготовления деталей машин и приборов невысокой прочности (крепёжные детали, втулки, штуцеры и т.п.), а также деталей, работающих под давлением при температуре от 40 до 425°C.

*Среднеуглеродистые стали* 30, 35, 40, 45, 50, 55 отличаются большей прочностью, но меньшей пластичностью, чем низкоуглеродистые. Их применяют после улучшения, нормализации и поверхностной закалки. В улучшенном состоянии – после закалки и высокого отпуска на структуру сорбита – достигаются высокая ударная вязкость, пластичность (рис. 2.4, а) и, как следствие, малая чувствительность к концентраторам напряжений. При увеличении сечения деталей из-за несквозной прокаливаемости механические свойства таких сталей снижаются (рис. 2.4, б).

После улучшения стали применяют для изготовления деталей небольшого размера, *работоспособность которых определяется сопротивлением усталости* (шатуны, коленчатые валы малооборотных двигателей, зубчатые колеса, маховики, оси и т.п.). При этом возможный размер деталей зависит от условий их работы и требований к прокаливаемости. Для деталей, работающих на растяжение – сжатие (например, шатуны), необходима однородность свойств металла по всему сечению и, как следствие, сквозная прокаливаемость. Для деталей, испытывающих главным образом напряжения изгиба и кручения (валы, оси и т.п.), которые максимальны на поверхности, толщина упрочнённого при закалке слоя должна быть не менее половины радиуса детали. Для изготовления более крупных деталей, работающих при невысоких циклических и контактных нагрузках, используют стали 40, 45, 50.

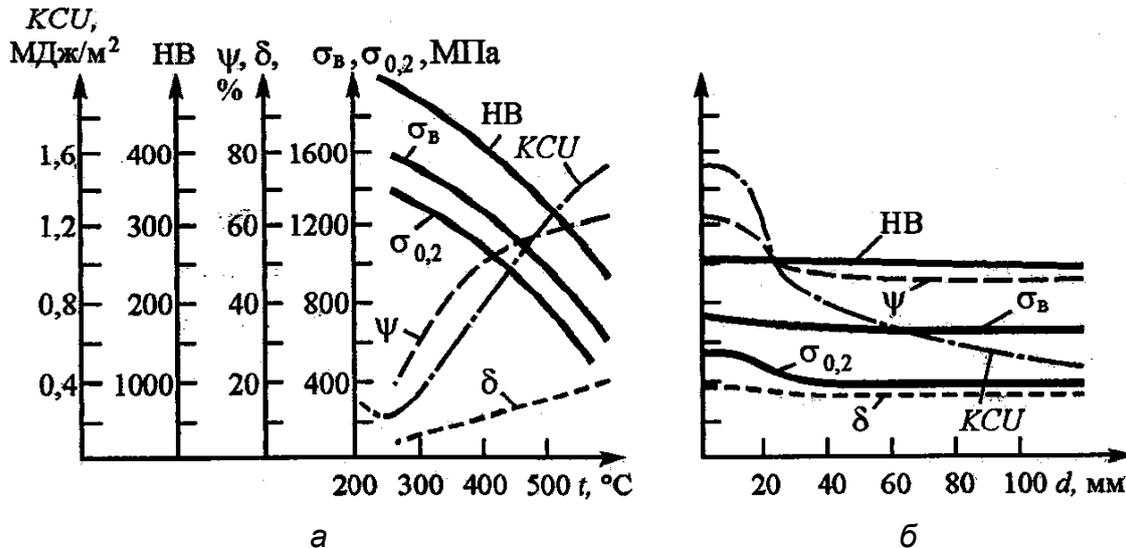


Рис. 2.4. Зависимость механических свойств стали 40 от температуры отпуска (а) и диаметра заготовок после отпуска при 580°С (б)

Их применяют после нормализации и поверхностной индукционной закалки с нагревом ТВЧ тех мест, которые должны иметь высокую твёрдость поверхности (40–58 HRC) и сопротивление износу (шейки коленчатых валов, кулачки распределительных валов, зубья шестерён и т.п.).

Индукционной закалкой с нагревом ТВЧ упрочняют также поверхность длинных валов, ходовых винтов и других деталей, для которых важно ограничить деформации при термической обработке.

## 2.4. Легированные машиностроительные стали

### 2.4.1. Влияние легирующих элементов на механические свойства сталей

Легирующие элементы вводят для повышения конструкционной прочности стали. Легированные стали производят качественными, высококачественными или особо высококачественными.

При маркировке легированной стали используют сочетания букв и цифр, обозначающих ее химический состав. По ГОСТ 4543-71 принято обозначать хром – Х; никель – Н, марганец – Г, кремний – С, молибден – М, вольфрам – В, титан – Т, ванадий – Ф, алюминий – Ю, медь – Д, ниобий – Б, бор – Р, кобальт – К. Число, стоящее после буквы, указывает примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если число отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1%.

Число в начале марки конструкционной легированной стали показывает содержание углерода в сотых долях процента. Например,

сталь 20ХНЗА в среднем содержит 0,20% С, 1% Cr и 3% Ni. Буква А в конце марки означает, что сталь высококачественная. Особо высококачественные стали (например, после электрошлакового переплава) имеют в конце марки букву Ш, например 30ХГС-Ш.

Легированные стали применяют после закалки и отпуска, поскольку в отожженном состоянии они по механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых.

Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов на свойства феррита, дисперсность карбидной фазы, устойчивость мартенсита при отпуске, прокаливаемость, размер зерна. Легирующие элементы, растворяясь в феррите, упрочняют его.

К важнейшим факторам, способствующим повышению конструкционной прочности, относятся *снижение при легировании критической скорости закалки и увеличение прокаливаемости*. Наиболее эффективно повышает прокаливаемость введение нескольких элементов: Cr + Mo, Cr + Ni, Cr + Ni + Mo и др. При комплексном легировании высокие механические свойства можно получить практически в сечении любого размера, поэтому комплексно-легированные стали применяют для крупных деталей сложной формы. Большинство легирующих элементов измельчает зерно, что способствует повышению работоспособности при развитии трещины и снижению порога хладноломкости. После достижения необходимой прокаливаемости избыточное легирование (за исключением никеля) снижает трещиностойкость и облегчает хрупкое разрушение.

Таким образом, для обеспечения высокой конструкционной прочности количество легирующих элементов в стали должно быть рациональным.

#### **2.4.2. Легированные стали нормальной и повышенной статической прочности**

Из сталей нормальной и повышенной прочности наибольшее применение в машиностроении имеют низкоуглеродистые (цементуемые) и среднеуглеродистые (улучшаемые) стали, содержащие, как правило, в сумме не более 5% легирующих элементов.

**Низкоуглеродистые (0,1–0,3% С) легированные стали** (ГОСТ 4543-71) используют в состоянии наибольшего упрочнения, т.е. после закалки и низкого отпуска со структурой (в зависимости от состава стали) низкоуглеродистого мартенсита или бейнита.

Функциональное назначение низкоуглеродистых сталей – цементуемые (нитроцементуемые) детали (*зубчатые колеса, кулачки* и т.п.), работающие в условиях трения. После насыщения поверхности углеродом, закалки и низкого отпуска низкоуглеродистые стали наряду с твердой поверхностью (58–63 HRC) имеют достаточно прочную и вязкую сердцевину, устойчивую к воздействию циклических и ударных нагрузок.

Благоприятное сочетание прочности, пластичности и вязкости, а также высокая хладостойкость (порог хладноломкости лежит в области отрицательных температур) обуславливают применение низкоуглеродистых сталей и без поверхностного упрочнения. Механические свойства таких сталей (без поверхностного упрочнения) после двойной закалки и низкого отпуска, т.е. термической обработки цементуемых деталей, приведены в табл. 2.2. При использовании этих сталей для деталей, от которых не требуется износостойкая поверхность, проводят однократную закалку по режиму I и низкий отпуск. Все стали, кроме 18X2H4MA, приведенные в табл. 2.2, относятся к перлитному классу.

**Хромистые стали** 15X, 20X, а также содержащие дополнительно ванадий (15XФ) или бор (20XP), образуют группу дешёвых сталей нормальной прочности. Для уменьшения коробления их закаливают не в воде, а в масле. В результате они приобретают структуру троостита или бейнита и упрочняются несколько меньше (табл. 2.2). Стали этой группы применяют для небольших деталей (сечением не более 25 мм), работающих при средних нагрузках.

Таблица 2.2

Режимы термической обработки и механические свойства низкоуглеродистых легированных сталей

Марка стали	Температура			Механические свойства (не менее)				
	закалки		отпуска	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$KCU$ , МДж/м <sup>2</sup>
	I	II		МПа		%		
15X	880	770–820	180	700	500	12	45	0,7
15XФ	880	760–810	180	750	550	13	50	0,8
30ХГТ	880	850	200	1500	1300	9	40	0,6
25ХГМ	860	–	200	1200	1100	10	45	0,8
12ХН3А	860	760–810	180	950	700	11	55	0,9
12Х2Н4А	860	760–800	180	1150	950	10	50	0,9
18Х2Н4МА	950	860	200	1150	850	12	50	1,0

К группе сталей повышенной прочности относятся комплексно-легированные, а также экономно-легированные стали с повышенным содержанием углерода (0,25–0,30%).

**Хромоникелевые стали** 12ХН3А, 20ХН3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А применяют для крупных деталей ответственного назначения. После закалки в масле эти стали в сечениях до 100 мм имеют структуру низкоуглеродистого мартенсита в смеси с нижним бейнитом, которая обеспечивает сочетание высокой прочности и вязкости.

**Хромоникельмолибденовая (хромоникельвольфрамовая) сталь** 18Х2Н4МА (18Х2Н4ВА) наиболее высоколегирована и имеет высокие механические свойства. Сталь при даже очень медленном охлаждении получает структуру мартенсита (или смесь мартенсита и бейнита). Отжиг для неё неприменим. В качестве смягчающей операции проводят высокий отпуск на сорбит.

Сталь 18Х2Н4МА относится к мартенситному классу, закаливается на воздухе и прокаливается практически в любом сечении. Её применяют для *крупных деталей особо ответственного назначения*. Сталь 18Х2Н4МА (18Х2П4ВА) из-за присутствия молибдена (вольфрама) слабо разупрочняется при отпуске (рис. 2.5). Её используют также в улучшенном состоянии при *больших статических и ударных нагрузках*.

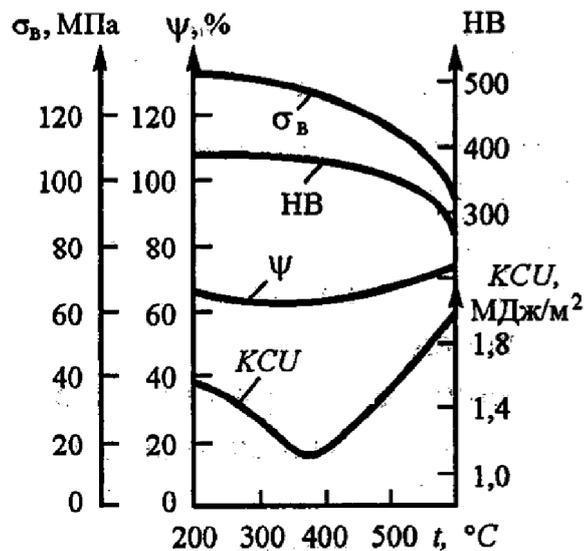


Рис. 2.5. Влияние температуры отпуска на механические свойства стали 18Х2Н4ВА

Недостатками среднелегированных сталей, содержащих 3–4% Ni, является сохранение до 60% остаточного аустенита после закалки, поэтому стали необходимо обрабатывать холодом для того, чтобы вызвать превращение остаточного аустенита в мартенсит и обеспечить высокую твердость поверхности.

**Хромомарганцевые стали с титаном (18ХГТ, 30ХГТ) и молибденом (25ХГМ)** относятся к экономно-легированным и предназначены для замены хромоникелевых сталей. Вместо никеля они содержат марганец; титан и молибден введены для измельчения зерна и снижения чувствительности к перегреву. Эти стали применяют для деталей крупносерийного и массового производства (*зубчатых колёс автомобилей*).

**Среднеуглеродистые (0,3–0,5% С) легированные стали** (ГОСТ 4543-71) приобретают высокие механические свойства после термического улучшения – закалки и высокого отпуска (500–650°C) на структуру сорбита. Улучшение этих сталей в отличие от нормализации обеспечивает повышенный предел текучести в сочетании с хорошей пластичностью и вязкостью, высоким сопротивлением развитию трещины. Кроме того, улучшение заметно снижает порог хладноломкости, который в этих сталях, в отличие от низкоуглеродистых, лежит при более высоких температурах.

Улучшаемые легированные стали применяют для большой группы деталей машин, *работающих не только при статических, но и в условиях циклических и ударных нагрузок* (валы, штоки, шатуны и др.), *концентрации напряжений*, а в некоторых случаях и *при пониженных температурах*.

**Хромистые стали 40Х, 45Х, 50Х** относятся к дешевым конструкционным материалам. С увеличением содержания углерода возрастает прочность, но снижаются пластичность и вязкость, повышается порог хладноломкости этих сталей (табл. 2.3). Стали 45Х, 50Х из-за невысокой вязкости рекомендуются для изделий, работающих без значительных динамических нагрузок.

Таблица 2.3

Термическая обработка и механические свойства  
улучшаемых легированных сталей

Марка стали	Температура закалки, °С	Отпуск		$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	$t_{50}^B$	$t_{50}^H$
		t, °С	Среда	МПа		%			°С	
				не менее						
40Х	860	500	Вода, масло	1000	800	10	45	0,6	0	–100
50Х	830	520	То же	1100	900	9	40	0,4	20	–60
30ХГСА	880	540	»	1100	850	10	45	0,5	20	–60
40ХН	820	500		1000	800	11	45	0,7	–30	–100
40ХН2МА	850	620	»	1100	950	12	50	0,8	–40	–120
38ХН3МА	850	600	Воздух	1200	1100	12	50	0,8	–60	–140

**Хромокремнемарганцевые стали** 30ХГСА, 35ХГСА содержат по 1% Cr, Mn и Si и называются *хромансилями*. Это дешевые стали, сочетающие хорошие технологические и механические свойства. Хромансили свариваются всеми видами сварки, хорошо штампуются, удовлетворительно обрабатываются резанием, прокаливаются в деталях сечением 30–40 мм. Их широко применяют в автомобилестроении (*валы, сварные конструкции, детали рулевого управления*).

**Хромоникелевые стали** 40ХН, 45ХН, 50ХН обеспечивают высокий комплекс механических свойств в деталях сечением 40–50 мм. Из-за присутствия никеля эти стали, в отличие от хромистых, имеют более высокий температурный запас вязкости и меньшую склонность к хрупкому разрушению.

**Хромоникельмолибденовые (хромоникельвольфрамовые)** стали 40ХН2МА, 38ХН3МА, 38ХН3МФА, а также 18Х2Н4МА (18Х2Н4ВА) относятся к глубокопрокаливаемым сталям, предназначенным для деталей с поперечным сечением 100 мм и более. Они имеют сильно выраженную склонность к отпускной хрупкости. Для ее устранения в деталях большого сечения недостаточно быстрого охлаждения от температуры высокого отпуска. Поэтому хромоникелевые стали легируют молибденом (вольфрамом).

Стали относятся к мартенситному классу, закаливаются на воздухе, обладают малой склонностью к хрупкому разрушению, *хорошо работают при динамических нагрузках и в условиях пониженных температур*. Кроме того, стали слабо разупрочняются при нагреве и могут применяться при температурах до 300–400°C. Они предназначены для деталей наиболее ответственного назначения (*валы и роторы турбин, тяжелонагруженные детали компрессорных машин, редукторов*).

### **2.4.3. Легированные высокопрочные стали**

В лучших низко- и среднеуглеродистых сталях после типичной для них термической обработки прочность, оцениваемая временным сопротивлением, ограничивается значениями ниже 1500 МПа. При  $\sigma_B \geq 1500$  МПа эти стали имеют высокую чувствительность к концентраторам напряжений и эксплуатационно ненадежны.

Развитие техники, стремление к созданию машин наименьшей массы требуют применения высокопрочных сталей, имеющих  $\sigma_B > 1500$  МПа. Для предупреждения хрупкого разрушения таким сталям необходим определенный запас вязкости (*KCU* не менее 0,2 МДж/м<sup>2</sup>). При использовании высокопрочных сталей важно также соблюдение определенных тре-

бований к конструированию деталей и технологии обработки их поверхности. При проектировании необходимо избегать конструктивных концентраторов напряжений, а при изготовлении не допускать на поверхности глубоких рисок, царапин, обеспечивать минимальную ее шероховатость.

Высокопрочное состояние в сочетании с достаточно высоким сопротивлением хрупкому разрушению может быть получено при использовании: 1) среднеуглеродистых комплексно-легированных сталей после низкого отпуска или термомеханической обработки; 2) мартенситно-старяющих сталей; 3) метастабильных аустенитных сталей.

**Среднеуглеродистые комплексно-легированные низкоотпущенные стали.** После закалки и низкого отпуска уровень прочности стали определяется содержанием углерода и практически не зависит от присутствия легирующих элементов. Увеличение содержания углерода до 0,4% повышает временное сопротивление до 2400 МПа, но углеродистая сталь имеет полностью хрупкое разрушение. Необходимый запас вязкости при такой или несколько меньшей прочности достигается совокупностью мероприятий, главные из которых направлены на подбор рационального состава стали, получение мелкого зерна, обязательного для высокопрочного состояния, повышение металлургического качества металла.

Повышение вязкости достигается, прежде всего, легированием никелем (1,5–3%). Хром и марганец вводят для обеспечения нужной прокаливаемости.

К распространенным высокопрочным сталям относятся 30ХГСНА, 40ХГСНЗВА, 40ХН2СМА, 30Х2ГСН2ВМ, 30Х5МСФА. Характерные механические свойства двух сталей, определенные на образцах с трещиной (значения приведены в скобках) и без нее, приведены ниже:

	30ХГСНА	40ХГСНЗВА
$\sigma$ , МПа	1850 (1670)	2000 (1200)
	1650 (1570)	1850 (1560)
$\delta$ , %	13/15	11/12
$\psi$ , %	50/53	43/45
$K_{CU}$ , МДж/м <sup>2</sup>	0,55/0,62	0,45/0,5
$K_{1C}$ , МПа м <sup>1/2</sup>	60/65	45/60

**Примечание.** В числителе – свойства после закалки с 900°С и низкого отпуска при 250°С, в знаменателе – после изотермической закалки.

**Среднеуглеродистые стали, упрочненные термомеханической обработкой.** Термомеханическая обработка (ТМО) совмещает два механизма упрочнения – пластическую деформацию аусте-

нита и закалку – в единый технологический процесс. Такое комбинированное воздействие применительно к среднеуглеродистым легированным сталям (30ХГСА, 40ХН, 40ХН2МА, 38ХН3МА и др.) обеспечивает высокую прочность (на образцах небольшого размера  $\sigma_B = 2000\text{--}2800$  МПа) при достаточном запасе пластичности и вязкости.

В зависимости от условий деформации аустенита – выше или ниже температуры рекристаллизации – различают соответственно высокотемпературную (ВТМО) и низкотемпературную (НТМО) термомеханическую обработку.

При ВТМО (рис. 2.6, а) сталь деформируют при температуре выше температуры  $A_3$  и сразу закаливают с тем, чтобы не допустить развития рекристаллизации аустенита. При НТМО (рис. 2.6, б) деформация проводится в области повышенной устойчивости аустенита ( $400\text{--}600^\circ\text{C}$ ). Рекристаллизация при этих температурах не происходит, однако необходимо избегать образования бейнитных структур.

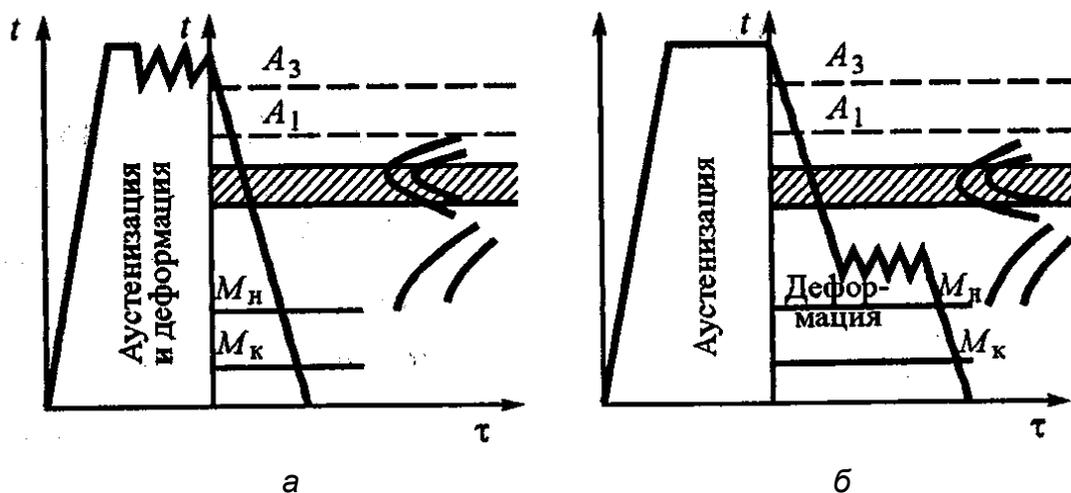


Рис. 2.6. Схема термомеханической обработки стали: а – ВТМО; б – НТМО (заштрихованная зона – интервал температур рекристаллизации)

ТМО обоих видов заканчивается низким отпуском при  $100\text{--}200^\circ\text{C}$ . При ТМО повышается весь комплекс механических свойств и особенно пластичность и вязкость, что наиболее важно для высокопрочного состояния. Наибольшее упрочнение ( $\sigma_B < 2800$  МПа) достигается при НТМО. НТМО пригодна для легированных сталей с большой устойчивостью переохлаждённого аустенита.

ВТМО обеспечивает меньшее упрочнение ( $\sigma_B < 2400$  МПа), но более высокие пластичность и вязкость. Она уменьшает также чувствительность к трещине ( $K_{1c}$  возрастает на  $20\text{--}50\%$ ), снижает порог хладноломкости, повышает сопротивление усталости и затрудняет

разупрочнение при отпуске. Кроме того, ВТМО более технологична, так как аустенит выше точки  $A_3$  пластичен и стабилен. Наиболее высокая прочность ( $\sigma_B \approx 3000$  МПа) получена сочетанием ВТМО с последующей холодной пластической деформацией низкоотпущенных среднеуглеродистых сталей.

**Мартенситно-стареющие стали.** Это особый класс высокопрочных материалов, превосходящих по конструкционной прочности и технологичности рассмотренные выше среднеуглеродистые стали.

*Их основа* – безуглеродистые ( $< 0,03\%$  С) сплавы железа с 8–25% Ni, легированные Co, Mo, Ti, Al, Cr и другими элементами (табл. 2.4).

Высокая прочность этих сталей достигается совмещением двух механизмов упрочнения: мартенситного  $\gamma \rightarrow \alpha$  – превращения и старения мартенсита. Небольшой вклад вносит также легирование твёрдого раствора.

*Упрочнение стали происходит в результате закалки и последующего старения.* Мартенситно-стареющие стали закалывают от 800–860°C на воздухе. При нагреве легирующие элементы Ti, V, Al, Cu, Mo, обладающие ограниченной и переменной растворимостью в  $Fe_\alpha$ , переходят в  $\gamma$  – раствор и при охлаждении не выделяются. После закалки образуется пересыщенный железоникелевый мартенсит. Благодаря высокому содержанию никеля, кобальта и малой концентрации углерода дислокации в нем обладают высокой подвижностью. Поэтому железоникелевый мартенсит при прочности  $\sigma_B = 900...1000$  МПа имеет высокую пластичность ( $\delta = 18...20\%$ ,  $\psi = 75...85\%$ ), вязкость ( $KCU = 2-3$  МДж/м<sup>2</sup>) и малую способность к упрочнению при холодной деформации. Последнее позволяет деформировать стали с большими степенями обжатия.

Основное упрочнение достигается при старении (480–520°C), когда из мартенсита выделяются мелкодисперсные частицы вторичных фаз ( $Ni_3Ti$ ,  $NiAl$ ,  $Fe_2Mo$ ,  $Ni_3Mo$  и др.), когерентно связанные с матрицей. Для мартенситно-стареющих сталей характерен высокий предел текучести (табл. 2.4) и более высокий, чем у лучших пружинных сплавов, предел упругости ( $\sigma_{0,002} = 1300$  МПа), низкий порог хладноломкости.

При прочности  $\sigma_B = 2000$  МПа и более стали разрушаются вязко, хотя сопротивление распространению трещины у них невелико ( $KCT \approx 0,2$  МДж/м<sup>2</sup>). Малая чувствительность к надрезам, высокое сопротивление хрупкому разрушению обеспечивают высокую конструкционную прочность изделий в широком диапазоне температур от криогенных до 450–500°C. При содержании Cr около 12% стали являются коррозионно-стойкими.

Таблица 2.4

Химический состав и механические свойства мартенситно-стареющих сталей

Марка стали	Содержание элементов, %	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$K_{1c}$	$\delta$	$\psi$	$KCU$	$KCT$
		МПа		МПа·м <sup>1/2</sup>	%		МДж/м <sup>2</sup>	
03Н18К9М5Т	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,9 Ti	2100	1900	75–85	8	50	0,5	0,20
03Н12К15М10	12 Ni; 15 Co; 10 Mo	2500	2400	–	6	30	0,3	–
03Х11Н10М2Т	11 Cr 10 Ni; 2 Mo; 0,9 Ti; 0,2 Al	1600	1550	90-105	8	50	0,5	0,2

Стали со стареющим мартенситом применяют для наиболее ответственных деталей в авиации, ракетной технике, машиностроении, судостроении и как пружинный материал в приборостроении.

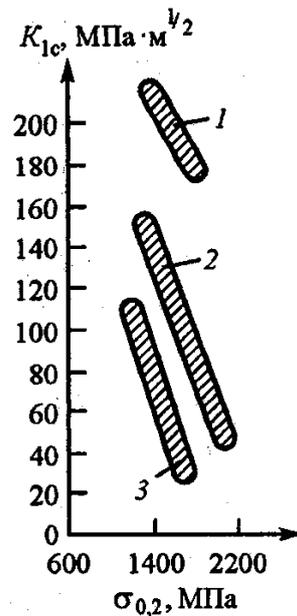


Рис. 2.7. Вязкость разрушения высокопрочных сталей: 1 – метастабильных аустенитных; 2 – мартенситно-стареющих; 3 – хромоникелевых

**Метастабильные аустенитные стали** (трипстали) 25Н25М4Г, 30Х9Н8М4Г2С2 – новый класс высокопрочных материалов повышенной пластичности. Их подбирают таким образом, чтобы после закалки при температуре 1000–1100°С стали имели устойчивую аустенитную структуру ( $M_n$  лежит ниже 0°). Аустенитная структура обладает высокой вязкостью, но низким пределом текучести. Для упрочнения стали подвергают специальной тепловой обработке – пластической деформации с большими степенями обжатия (50–80%) при температуре 400–600°С. В ре-

зультате деформационно-термического упрочнения предел текучести повышается до 1800 МПа. При этом сталям свойственны высокая пластичность ( $\geq 20\%$ ) и трещиностойкость. Значения  $\delta$  и  $K_{1c}$  у этих сталей больше, чем у высокопрочных сталей (см. рис. 2.7). *Области применения сталей:* броневой лист, проволока тросов и др.

На рис. 2.8 показаны области значений прочности и пластичности высокопрочных сталей различных классов. Видно, что наибольшей прочностью обладают среднеуглеродистые стали после термо-механической обработки, а наибольшей пластичностью при одинаковой прочности – метастабильные аустенитные стали.

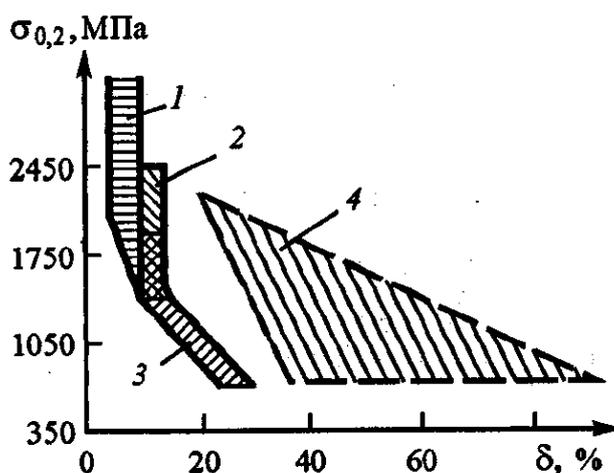


Рис. 2.8. Соотношение между пределом текучести и пластичностью высокопрочных сталей: 1 – среднеуглеродистых, упрочнённых ТМО; 2 – мартенситно-старяющих; 3 – среднеуглеродистых легированных без ТМО; 4 – метастабильных аустенитных

#### 2.4.4. Легированные стали с повышенной циклической прочностью

**Циклическая прочность стали** определяет работоспособность большой группы ответственных деталей машин – валов, осей, шатунов, штоков, валов-шестерен и др. Основой выбора стали для таких деталей служит предел выносливости  $\sigma_{-1}$ . Наряду с  $\sigma_{-1}$ , используют и такие параметры статической прочности, как  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ . Это допустимо, так как для большой группы сталей установлена тесная корреляционная связь между циклической и статической прочностью, характеризующая коэффициентом выносливости  $k_b = \sigma_{-1}/\sigma_B$ .

Кроме значений  $\sigma_{-1}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ , при выборе марки стали учитывают ударную вязкость, сопротивление износу, прокаливаемость. Высокая

циклическая прочность стали достигается в том случае, если она оказывает высокое сопротивление зарождению трещин усталости и их развитию.

Увеличению сопротивления зарождению трещины усталости способствует структурное состояние, препятствующее движению дислокаций и их выходу на поверхность. Наиболее эффективно его создают поверхностным упрочнением.

Циклическая прочность зависит от большого числа факторов, из которых решающее значение имеют структура и напряжённое состояние поверхностного слоя, качество поверхности и воздействие коррозионной среды. Наличие на поверхности остаточных напряжений сжатия затрудняет образование и развитие трещин усталости и, как следствие, способствует увеличению предела выносливости. Резко отрицательное влияние оказывают напряжения растяжения и многочисленные концентраторы напряжений: *конструктивные, технологические, металлургические*.

Влияние концентраторов напряжений оценивают эффективным коэффициентом концентрации напряжений  $K_\sigma = \sigma_{-1}/\sigma_{-1к}$ , под которым понимают отношение предела выносливости гладкого образца  $\sigma_{-1}$  к пределу выносливости такого же образца с концентратором напряжений  $\sigma_{-1к}$ .

Совместное влияние различных факторов на предел выносливости в расчетах оценивается коэффициентом  $(K_\sigma)_д = \sigma_{-1}/(\sigma_{-1})_д$ , показывающим, во сколько раз предел выносливости гладкого образца диаметром 10 мм больше предела выносливости детали:

$$(K_\sigma)_д = (K_\sigma/\varepsilon_\sigma + 1/\beta - 1)/\beta_{упр},$$

где  $\varepsilon_\sigma$  – масштабный фактор, характеризующий уменьшение несущей способности детали при увеличении ее поперечного размера;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности (в коррозионных средах заменяется на  $\beta_{корр}$ );  $\beta_{упр}$  – коэффициент, характеризующий эффективность поверхностного упрочнения.

В соответствии с закономерностями усталостного разрушения изменение предела выносливости стали с ростом ее статической прочности подчиняется сложной зависимости (рис. 2.10), учитывающей влияние не только прочности, но и пластичности стали. Снижение пластичности стали обуславливает замедление роста предела выносливости (рис. 2.9) при повышении прочности выше 1200 МПа.

Для деталей, работающих при циклических нагрузках, преимущественно применяют стали нормальной и повышенной статической прочности. Из них предпочтение отдают улучшаемым сталям: углеро-

дистым 35, 40, 45, 50, 55 и низколегированным 40X, 50X, 40XН, 50XН, 40XН2МА, 35XГСА, 38XНЗМА, обрабатываемым на структуру сорбита. В отдельных случаях углеродистые стали из-за низкой прокаливаемости применяют в нормализованном состоянии с ферритно-перлитной структурой.

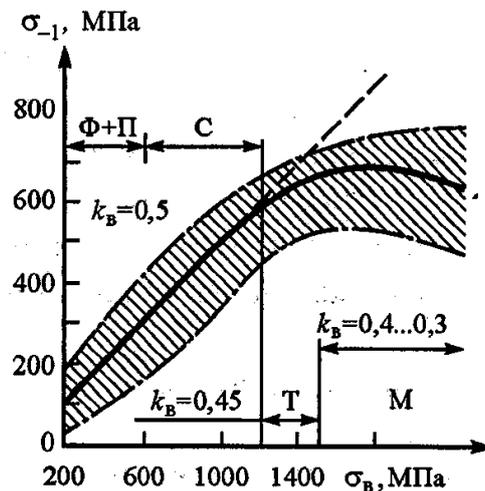


Рис. 2.9. Зависимость предела выносливости при изгибе от временного сопротивления среднеуглеродистых сталей с различной структурой

**Для улучшаемых сталей**, имеющих невысокую твёрдость (< 350 НВ), характерны раннее пластическое течение и повреждение тонких (5–10 мкм) поверхностных слоев. Субмикроскопические трещины усталости у них возникают на ранней стадии, составляющей 3–10% от общего времени до разрушения. Остальное время приходится на их развитие.

Характерная особенность улучшаемых сталей – высокая надёжность, обусловленная низкой скоростью роста трещины усталости (СРТУ).

Кроме высокой надёжности важное достоинство улучшаемых сталей – малая чувствительность к качеству поверхности и случайным ударным нагрузкам.

Недостаток улучшаемых сталей – невысокий предел выносливости, значение которого растёт по мере увеличения статической прочности стали (рис. 2.9). Наиболее низкий предел выносливости имеют среднеуглеродистые стали (35, 40, 45, 50, 55, 40X и др.), применяемые в нормализованном состоянии с ферритно-перлитной структурой (рис. 2.9). В таком состоянии эти стали используют при больших вибрационных нагрузках, когда от материала требуется высокая демпфирующая способность.

**Стали повышенной прочности** ( $\sigma_b = 1300\text{--}1500$  МПа) и **твердости** (40–50 HRC) со структурой троостита (рис. 2.9) относятся к материалам функционального назначения – *рессорно-пружинным сталям*. Циклические нагрузки в них вызывают слабое деформационное упрочнение поверхности и развитие ее усталостной повреждаемости. Повышенная чувствительность к надрезам служит причиной более заметного разброса значений  $\sigma_{-1}$  (рис. 2.9), замедления их роста с увеличением статической прочности и, как следствие, снижения коэффициента выносливости до 0,4.

**Твердые (> 50HRC)** высокопрочные стали с мартенситной структурой обладают особо высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, что нейтрализует их основное свойство – высокое сопротивление образованию трещин усталости. По этой причине увеличение их статической прочности не сопровождается повышением выносливости (рис. 2.9).

Вместо объемно-упрочненных высокопрочных сталей применяют средне- и низкоуглеродистые стали, подвергнутые поверхностному упрочнению. Его проводят следующими технологическими методами: 1) закалкой с индукционным нагревом; 2) химико-термической обработкой – цементацией (нитроцементацией), азотированием; 3) поверхностным пластическим деформированием (ППД): обкаткой роликами, обдувкой дробью и др.; 4) комбинированными методами, включающими химико-термическую обработку и ППД.

Благоприятное влияние технологических методов обусловлено действием двух факторов – повышением сопротивления пластической деформации поверхностного слоя и созданием в нем остаточных напряжений сжатия.

Влияние этих факторов особенно значительно для деталей машин, работающих на изгиб, кручение, т.е. когда напряжения максимальны на поверхности (*валы, оси, зубчатые колеса и др.*). Упрочненный поверхностный слой в виде жесткой оболочки затрудняет выход дислокаций на поверхность и тем самым препятствует развитию на ней повреждений и образованию трещин усталости. Этому же способствуют и остаточные напряжения сжатия. Суммируясь с напряжениями от внешней нагрузки, они уменьшают на поверхности неблагоприятные напряжения растяжения.

Эффективность технологических методов количественно оценивается коэффициентом упрочнения  $\beta_{упр}$ , показывающим, во сколько раз снижается эффективный коэффициент концентрации напряжений

$(K_{\sigma})_d$  и увеличивается предел выносливости конкретной детали. Влияние способа поверхностного упрочнения на  $\beta_{упр}$  показано в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Повышение предела выносливости валов при поверхностном упрочнении

Вид поверхностной обработки	$\sigma_b$ , МПа (сердцевины)	Коэффициент упрочнения валов $\beta_{упр}$		
		гладких ( $K_{\sigma} = 1$ )	с малой концентрацией напряжений ( $K_{\sigma} < 1,5$ )	с большой концентрацией напряжений ( $K_{\sigma} = 1,8...2$ )
Индукционная закалка с нагревом ТВЧ	600–800	1,5–1,7	1,6–1,8	2,4–2,8
	800–1000	1,3–1,5	–	–
Азотирование	900–1200	1,1–1,3	1,5–1,7	1,7–2,1
Цементация	400–600	1,8–2,0	3	–
	700–800	1,4–1,5	–	–
	1000–1200	1,2–1,3	2	–
Дробеструйный наклёп	600–1500	1,1–1,3	1,5–1,6	1,7–2,1
Накатка роликом	–	1,1–1,3	1,3–1,5	1,6–2,0

Видно, что эффективность технологических методов тем значительнее, чем острее концентратор напряжений (выше  $K_{\sigma}$ ).

Выбор метода поверхностного упрочнения детали зависит от условий ее эксплуатации, формы, размеров, марки выбранной стали и других факторов.

Наиболее напряженные детали (*зубчатые колеса, вал-шестерни и др.*) подвергают цементации, применяя для их изготовления низкоуглеродистые стали. После насыщения углеродом, закалки и низкого отпуска эти стали при высокой поверхностной твердости сохраняют вязкую сердцевину, способную воспринимать ударные нагрузки.

*Комбинированное упрочнение* характеризуется высокой эффективностью, поскольку ППД дополнительно увеличивает твердость поверхностных слоёв (на 10–20%) и формирует в них высокие остаточные напряжения сжатия. В итоге предел выносливости цементованных деталей увеличивается в 1,5–2 раза. ППД эффективно также для деталей, закалённых с нагревом ТВЧ, особенно при обрыве упрочнённого слоя у концентратора.

В коррозионных средах сопротивление усталости рассмотренных выше некоррозионно-стойких сталей резко снижается и не зависит от их статической прочности (рис. 2.10). Такие стали применяют с поверхностным покрытием из цинка, кадмия, хрома или никеля. Широко используют также специальные коррозионно-стойкие стали.

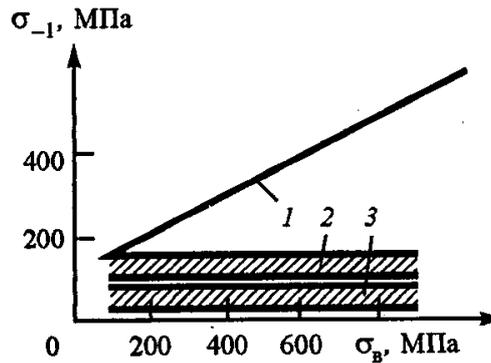


Рис. 2.10. Зависимость предела выносливости углеродистых сталей от временного сопротивления при испытании в различных средах: 1 – на воздухе; 2 – в пресной воде; 3 – в морской воде

## 2.5. Стали с высокими упругими свойствами

### 2.5.1. Основные требования к пружинным материалам

Стали и сплавы с высокими упругими свойствами находят широкое применение в машино- и приборостроении. В машиностроении их используют для изготовления рессор, амортизаторов, силовых пружин различного назначения.

Требования к этим сталям:

- высокий предел упругости и предел текучести;
- высокий предел выносливости;
- релаксационная стойкость (релаксация – это самопроизвольно затухающее падение рабочих напряжений в изделии при постоянной деформации);
- достаточная пластичность и вязкость;
- сквозная прокаливаемость при закалке в масле или на воздухе.

Особенность их работы состоит в том, что при больших статических, циклических или ударных нагрузках в них *не допускается остаточная деформация*. В условиях кратковременного статического нагружения сопротивление малым пластическим деформациям характеризуется пределом упругости, при длительном статическом или циклическом нагружении – релаксационной стойкостью.

Релаксация напряжений характеризуется снижением рабочих напряжений в изделии от  $\sigma_1$  до  $\sigma_2$  при заданной упругой деформации  $\varepsilon_1$  (рис. 2.11). Релаксация напряжений опасна тем, что при переходе части упругой деформации в пластическую ( $\varepsilon_{ост}$ ) упругие элементы после разгрузки изменяют размеры и форму.

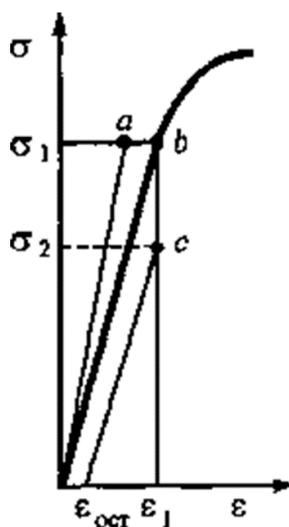


Рис. 2.11. Диаграмма деформации, объясняющая релаксацию и упругое последействие

Для достижения в сплаве высокого предела упругости и релаксационной стойкости необходимо создать стабильную дислокационную структуру, в которой прочно заблокированы все дислокации и перемещение дислокаций. Для закрепления дислокаций используют все средства создания эффективных барьеров: легирование, повышение плотности дислокаций, выделение дисперсных частиц вторичных фаз. Наиболее благоприятную субструктуру, обеспечивающую высокие упругие свойства, формирует термомеханическая обработка. Ее успешно применяют для всех пружинных сплавов.

### 2.5.2. Рессорно-пружинные стали

Для обеспечения работоспособности силовых упругих элементов рессорно-пружинные стали должны иметь высокие пределы упругости, выносливости и релаксационную стойкость. Этим требованиям удовлетворяют стали с повышенным содержанием углерода 0,5–0,7% (табл. 2.6), которые подвергают закалке и отпуску при 420–520°C.

Закаленная на мартенсит сталь имеет невысокий предел упругости. Он заметно повышается при отпуске, когда образуется структура троостита (рис. 2.12). В этой структуре феррит из-за сильного фазового наклепа имеет высокую плотность малоподвижных дислокаций, которые, кроме того, эффективно блокируются дисперсными карбидными частицами. Поэтому троостит отличается стабильной дислокационной структурой.

Кроме высоких упругих свойств, отпуск на троостит обеспечивает некоторое повышение пластичности и вязкости разрушения.

## Рессорно-пружинные стали

Марки сталей	$\sigma_B$ , МПа	HRC	Применение
Углеродистые 65, 70, 75, 80,	1100–1150	40–50	Рессоры, буфера, жалюзи радиатора, подушки сиденья, круглые и плоские пружины
Кремнистые 55ГС, 55С2, 60С2А, 70С3А	1200–1800	38–50	Клапанные пружины, пружины нажимного диска, задней и передней подвески
Кремнистые дополни- тельно легированные 65С2ВА, 60С2ХФА, 70С2ХА, 60С2Н2А	1750–1900	42–49	Высоконагруженные пружины и рессоры ответственного назначения
Без кремния 50ХФА, 50ХГФА	До 1400	42–48	Клапанные пружины и рессоры автомобилей и тракторов

Хорошие результаты дает также изотермическая закалка на структуру нижнего бейнита. Она обеспечивает высокие механические свойства при малой деформации изделий.

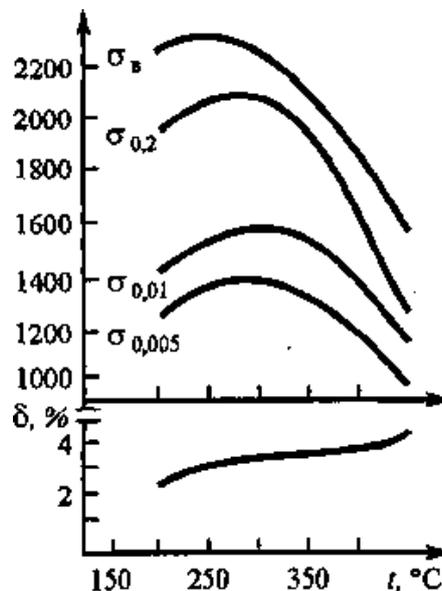


Рис. 2.12. Зависимость механических свойств пружинной стали (0,6% C, 2% Si) от температуры отпуска

Рессорно-пружинные стали 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г характеризуются невысокой релаксационной стойкостью, особенно при нагреве. Они непригодны для работы при температурах выше 100 °C. Из них изготавливают пружины небольшого сечения.

Легированные рессорно-пружинные стали относятся к перлитному классу. Основными легирующими элементами в них являются

Si (1–3%), Mn (~ 1%), а в сталях более ответственного назначения – Cr (~ 1%), V (~ 0,15%) и Ni (< 1,7%). Легирование (за исключением Si и Mn) мало влияет на предел упругости. Более существенно оно проявляется в повышении прокаливаемости, релаксационной стойкости, предела выносливости. В связи с этим легированные стали предназначены для больших по размеру упругих элементов и обеспечивают их более длительную и надежную работу.

*Кремнистые стали 55С2, 60С2, 70С3А* применяют для пружин и рессор толщиной до 18 мм.

*Стали, не содержащие кремния 50ХФА, 50ХГФА*, которые по сравнению с кремнистыми и кремнемарганцевыми сталями подвергаются более высокому нагреву при отпуске (520°С), обладают теплостойкостью, меньшей чувствительностью к надрезу. Они *предназначены для рессор легковых автомобилей, клапанных и других пружин ответственного назначения, которые могут работать при температурах до 300 °С.*

Стали 60С2ХА и 60С2Н2А прокаливаются в сечениях соответственно до 50 и 80 мм и применяются *для крупных тяжело нагруженных и особо ответственных пружин и рессор.* Механические свойства сталей определяются содержанием углерода и температурой отпуска.

Наиболее высокие механические свойства имеют стали 70С3А, 60С2ХА и 60С2Н2А:  $\sigma_B > 1800$  МПа;  $\sigma_{0,2} \geq 1600$  МПа;  $\delta \geq 5\%$ ;  $\psi > 20\%$ . Их предел упругости составляет  $\sigma_{0,01} = 880–1150$  МПа, а твердость – 38–48 HRC. При такой прочности и твердости стали чувствительны к концентраторам напряжений, поэтому на сопротивление усталости большое влияние оказывает состояние поверхности. При отсутствии поверхностных дефектов (обезуглероживания, окалины, грубых рисок и др.) предел выносливости сталей при изгибе не ниже 500 МПа, а при кручении – 300 МПа. Для уменьшения чувствительности к концентраторам напряжений готовые пружины и листы рессор подвергают поверхностному наклепу обдувкой дробью. После упрочнения дробью предел выносливости увеличивается в 1,5–2 раза.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. По каким признакам классифицируют конструкционные стали?
2. Опишите влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали.
3. Дайте характеристику углеродистым сталям. Назовите виды углеродистых сталей.

4. Назовите сферы применения углеродистых сталей обыкновенного качества и качественных.
5. Как влияют легирующие элементы на механические свойства стали?
6. Какие легированные стали относятся к сталям нормальной и повышенной прочности? Укажите марки сталей и назовите их термообработку.
7. Какие легированные стали относятся к высокопрочным? Назовите требования, предъявляемые к ним.
8. Какие характеристики необходимы для выбора легированной стали с повышенной циклической прочностью?
9. От чего зависит циклическая прочность стали?
10. Назовите виды сталей с повышенной циклической прочностью, их термообработку.
11. Какие требования предъявляются к пружинным материалам?
12. Дайте характеристику сталям с высокими упругими свойствами. Назовите оптимальный интервал твердости для рессор.

## Глава 3. МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

### 3.1. Хладостойкие материалы

*Явление хладноломкости*, т.е. хрупкого разрушения, связанного с действием низких температур, впервые стало предметом широкого обсуждения в связи с бурным строительством железных дорог в конце XIX в. Было отмечено, что рельсы, изготовленные из литого металла, внезапно разрушались при понижении температуры. Уже тогда была признана актуальной проблема хладноломкости металлов, необходимость изучения ее природы и выработки мероприятий по ее устранению.

Особую актуальность проблема хладноломкости приобрела в связи с освоением арктических и антарктических районов. Эффективность работы оборудования и транспорта в зимнее время в этих районах резко падает. Анализ работы автотранспортных организаций северных районов показал, что срок службы автомобилей обычного типа по сравнению с зоной умеренного климата сокращается в 2 раза, а аварии и поломки, связанные с климатическими условиями, выводят из строя до 25% парка машин.

Важнейшим фактором дальнейшего развития техники низких температур является создание материалов, пригодных для работы в этих условиях. Конструирование и выпуск хладостойкой техники должны быть основаны на глубоком знании поведения материалов при низких температурах, надёжных методах оценки работоспособности и долговечности материалов, научно обоснованных рекомендациях по выбору материалов.

#### **3.1.1. Критерии хладостойкости стальных материалов**

Под *хладостойкостью материала* понимают его способность сопротивляться деформации и разрушению при понижении температуры от 0 до  $-269^{\circ}\text{C}$  ( $273 - 4 \text{ K}$ ).

Особенностью низкотемпературной службы является ужесточение требований к материалу по *пластичности* и *вязкости*. Определенную сложность представляет выбор необходимого уровня пластических и вязких свойств. *Обычно минимальная рабочая температура определяется температурой вязко-хрупкого перехода, при которой вязкость падает до неприемлемо малых значений.*

По хладостойкости металлические материалы, используемые при низких температурах, условно могут быть разбиты на четыре основные группы:

1. Металлы и сплавы, характеристики механических свойств которых позволяют использовать их до температур климатического холода ( $-60^{\circ}\text{C}$ ). Они являются основными конструкционными материалами холодильного машиностроения. Их используют также для изготовления изделий так называемого северного исполнения. К этой группе относятся качественные углеродистые и низколегированные стали ферритного и перлитного классов с ОЦК-решеткой.

2. Ко второй группе относятся сплавы, сохраняющие вязкость и пластичность при охлаждении до 170 К. Это стали с 0,2–0,3% С, дополнительно легированные Ni, Cr, Ti, Mo. К этой группе относятся, например, низкоуглеродистые ферритные стали с 2–5% Ni, используемые при температурах 210–150 К.

3. К третьей группе относятся сплавы, способные без ухудшения свойств выдерживать температуры до 77 К (температура кипения жидкого азота). Сюда относятся стали типа 12X18H10T, 0H9A, большинство сплавов на основе Al, Ti, Cu, не обнаруживающих склонности к хрупкому разрушению. Для ненагруженных конструкций с целью экономии Ni применяют Cr–Mn и Cr–Ni–Mn стали типа 10X14Г14H4Т (ЭИ711), 03X13АГ19 (ЧС36), 07X21Г7АН5 (ЭП222).

4. К четвертой группе относятся сплавы, используемые для работы при температуре ниже 77 К. К этой группе принадлежат материалы, используемые в космической технике, производстве и потреблении водорода, экспериментальной физике. Для работы при таких температурах пригодны лишь высоколегированные коррозионностойкие стали типа 10X11H23Т3МР (ЭП33), 03X20H16АГ6, некоторые бронзы, никелевые, алюминиевые сплавы, легированные Mg, и сплавы титана.

Важнейшее требование, определяющее пригодность материала для работы при низкой температуре – *отсутствие хладноломкости*. Хладноломкость характерна для железа, стали, металлов и сплавов с ОЦК и ГП-решетками. Металлы с ГЦК-решеткой (аустенитные стали, медь, алюминий, никель) не склонны к хладноломкости.

### **3.1.2. Хладостойкие стали климатического холода**

Стали являются основным конструкционным материалом для изготовления механизмов, машин и конструкций, работающих при низких температурах. *Стали для этих условий должны обеспечивать необходимую прочность в сочетании с высокой вязкостью и пла-*

*стичностью, обладать малой чувствительностью к концентраторам напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению.*

С понижением температуры прочностные характеристики стали растут, а вязкость и пластичность уменьшаются. Поэтому при выборе стали для работы в этих условиях определяющими показателями являются: прочность при максимальной температуре эксплуатации – обычно комнатной; вязкость и пластичность – при минимальной температуре. Механические свойства и работоспособность сталей, применяемых для хладостойких конструкций, а также в холодильном и криогенном машиностроении, зависят от многих факторов. К ним, прежде всего, относится тип кристаллической решетки, размер зерна и состояние его границ, содержание легирующих элементов и примесей, форма и размеры неметаллических включений. Насыщение металла водородом увеличивает хрупкость стали. Сварка способствует росту зерна и дополнительному наводороживанию, что увеличивает хладноломкость сварных соединений. Кроме того, нагрев при сварке может способствовать фазовым превращениям и выделением примесей по границам зерен, что также повышает хрупкость стали.

Для надежной работы материала при низких температурах необходимо обеспечить температурный запас вязкости. Это достигается тогда, когда *порог хладноломкости материала расположен ниже температуры его эксплуатации. Чем больше температурный запас вязкости, тем меньше опасность хрупкого разрушения материала, выше его эксплуатационная надежность.*

Для деталей машин, предназначенных для эксплуатации в районах с холодным климатом (ХЛ), применяют стали с гарантируемой ударной вязкостью при отрицательных температурах (табл. 3.1, 3.2).

Низколегированные стали (в зависимости от механических свойств и химического состава) разделены на 15 категорий. Основной характеристикой металлических материалов является ударная вязкость до и после механического старения. Стали категории 6–9 имеют гарантированную ударную вязкость при температуре  $-40\dots-70^{\circ}\text{C}$ . Стали категорий 12–15 дополнительно подвергают испытаниям на механическое старение. Стали поступают на машиностроительные заводы в термообработанном состоянии (нормализация или закалка и отпуск).

*Склонность сталей к хрупкому разрушению зависит в основном от размера зерна, структуры, состава и наличия вредных примесей.* Менее склонны к хрупкому разрушению стали, имеющие мелкозернистую структуру. Для получения этих сталей применяют моди-

фицирование добавками *алюминия, титана, ниобия и ванадия* при выплавке; раскисление неметаллических включений; термическую обработку горячекатаного металла (нормализацию и улучшение); контролируемый режим прокатки и др. Улучшение структуры сталей для обеспечения более низкого порога хладноломкости достигается улучшением (закалкой и отпуском) непосредственно после прокатки.

Таблица 3.1

Хладостойкие низколегированные стали для ответственных сварных деталей машин КХ (ГОСТ 19281-73)

Группа хладостойкости	Минимально допустимая температура, °С	Марка стали	Максимально допустимая толщина, мм	Гарантируемая ударная вязкость	
				KCU	При температуре, °С
1	-40	09Г2, 09Г2Д, 10Г2С1, 10Г2С1Д	30	3 (4)	-40
		09Г2С, 09Г2СД	30	3,5 (4)	-40
		10ХСНД	15	4,5	-40
		15ХСНД	30	3 (4)	-40
2	-50	09Г2С, 09Г2СД, 10ХСНД, 15ХСНД	11	3 (3,5)	-50
		09Г2, 09Г2Д, 10Г2С1, 10Г2С1Д	11	3 (3)	-50
3	-60	09Г2С, 09Г2СД, 15ХСНД, 10ХСНД	11	3 (3,5)	-60
		09Г2, 09Г2Д	11	3 (3)	-60
		10Г2С1, 10Г2С1Д	11	2,5 (3)	-60
4	-70	09Г2С, 09Г2СД, 10ХСНД, 15ХСНД	11	3 (3,5)	-70
		09Г2, 09Г2Д	11	3 (3)	-70
		10Г2С1, 10Г2С1Д	11	2,5 (3)	-70

Таблица 3.2

Стали для деталей машин исполнения КХ

Марка стали	Термическая обработка (закалка + отпуск) при температуре, °С	Предел прочности, ГПа	Температура применения не ниже, °С	Использование по толщине (мм) не более
1	2	3	4	5
1802Н4ВА	200	1,30	-100	200
18Х2Н4ВА	550-600	1,00	-120	200
12ХН3А	200	1,00	-80	40
12ХН2	200	0,90	-80	30
12Х2Н4А	200	1,20	-70	100

1	2	3	4	5
15ХМ	200	0,90	-60	20
20М	200	1,00	-50	15
15Х	200	0,80	-50	10
20Х	200	0,90	-40	15
20ХГНР	200	1,30	-20	70
30ХГТ	500–550	1,00	-30	30
30ХН3А	550	1,00	-80	100
30ХМА	350	0,95	-80	30
38ХМ10А	600–650	1,00	-80	60
40ХН	500	1,00	-80	50
40ХНМА	580–600	1,10	-80	70
38ХА	500	0,95	-60	25
40ХФА	600–650	1,00	-60	30
40Х	500	1,00	-60	25
35ХРА	550	0,95	-50	40
20Г	500	0,50	-70	10
35	500	0,70	-60	15
45	500	0,90	-50	20
40Г	500	1,00	-40	20

*Состав стали должен иметь перлитно-ферритную структуру, так как легирующие элементы (никель, марганец, молибден и др.) понижают порог хладноломкости.*

Из всех легирующих элементов никель в наибольшей степени понижает хладноломкость стали. Никель и железо полностью растворимы друг в друге, имеют близкое строение кристаллических решеток. Он находится в твердом растворе в феррите или аустените. Никель упрочняет феррит и одновременно увеличивает его вязкость, а также увеличивает прокаливаемость стали, измельчает зерно, снижает концентрацию примесей на дислокациях и уменьшает блокирование дислокаций примесными атомами внедрения.

На рис. 3.1 приведена зависимость критической температуры хрупкости от содержания никеля в стали. Введение 1% никеля снижает порог хладноломкости примерно на 20 К.

Введение молибдена до 0,5% существенно снижает порог хладноломкости. Молибден оказывает сдерживающее влияние на диффузионную подвижность фосфора и уменьшает отпускную хрупкость.

Действие никеля на хладноломкость особенно эффективно в сочетании с молибденом.

Резко отрицательное действие на хладноломкость оказывают фосфор, сера, растворенные газы: кислород, азот, водород (рис. 3.2).

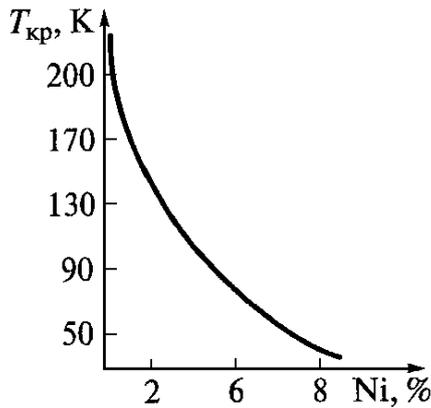


Рис. 3.1. Влияние содержания никеля на критическую температуру хрупкости низкоуглеродистой стали

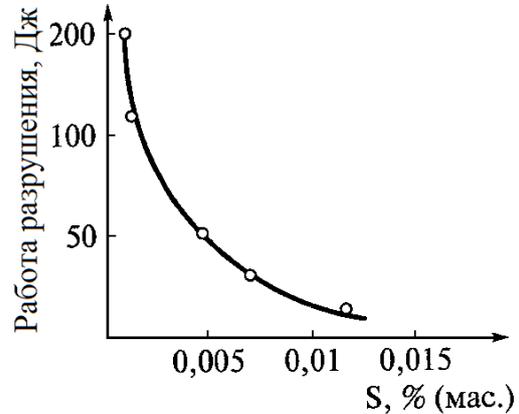


Рис. 3.2. Влияние содержания серы на работу удара поперечных образцов Шарпи из микролегированной мелкозернистой стали

С увеличением содержания серы растет количество сульфидных включений, играющих роль концентраторов напряжений. Так, увеличение содержания серы в литой стали 25Л от 0,02 до 0,05% более чем в 2 раза снижает ударную вязкость при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  (233 К). Повышение содержания серы на 0,01% увеличивает порог хладноломкости примерно на 15 К.

Фосфор охрупчивает сталь за счет образования фосфидной эвтектики. При увеличении содержания углерода охрупчивающее влияние фосфора возрастает. Повышение содержания фосфора на 0,01% для литой стали 35Л увеличивает критическую температуру хрупкости примерно на 20 К. Вредное влияние фосфора подавляется за счет легирования молибденом.

Глубокая десульфурация и дефосфорация являются необходимыми условиями обеспечения высокой сопротивляемости хрупкому разрушению.

Отрицательное влияние вредных примесей уменьшается при введении редкоземельных металлов, а также кальция и циркония. Они снижают отпускную хрупкость конструкционных сталей.

Контролируемая прокатка, являющаяся разновидностью ТМО, позволяет повысить вязкость металла. При контролируемой прокатке строго регламентируют степень обжатия на последних стадиях деформации, проводимых при более низкой температуре. Эффект кон-

тролируемой прокатки возрастает при микролегировании стали ванадием и ниобием. Так, например, сталь 09ХГ2НФБ в результате контролируемой прокатки с последующим регулируемым охлаждением в процессе прокатки на стане имеет преимущественно бейнитную структуру, а критическая температура хрупкости  $t_{50} = -100^{\circ}\text{C}$ . Сталь, хорошо сваривается и может быть использована в сварных конструкциях ответственного назначения в строительстве и машиностроении.

Любая сталь обладает стойкостью против перехода в хрупкое состояние. Для её определения испытывают образцы при разных температурах. Сталь, имеющая более низкую температуру перехода в хрупкое состояние, считается более качественной.

На рис. 3.3, а показана схема перехода хрупкого разрушения сталей в пластическое. Кривая 1 характеризует изменение хрупкой прочности, а кривая 2 – изменение предела текучести в зависимости от температуры.

Выше пересечения кривых 1 и 2, в точке А, разрушение будет пластичным, ниже – хрупким.

На рис. 3.3, б показан также характер изменения ударной вязкости в зависимости от температуры. При понижении температуры наступает момент, когда ударная вязкость резко снижается. Температуры  $t_1$  и  $t_2$  называют соответственно верхней и нижней критической температурой перехода стали в хрупкое состояние.

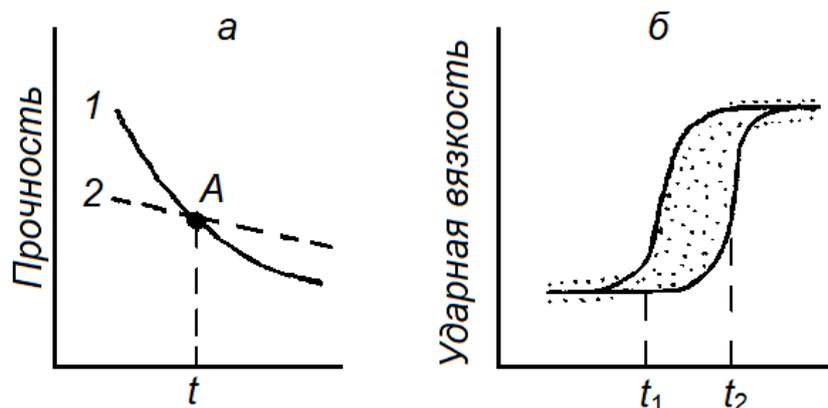


Рис. 3.3. Изменение прочности (а) и ударной вязкости (б) стальных материалов при понижении температуры

Повышение хладостойкости конструкционных сталей достигается термоупрочнением (закалкой и отпуском). Низколегированные хладостойкие стали, применяемые для деталей машин, – 09Г2, 09Г2С, 09Г2СНД, 10Г2С1, 10Г2С1Д, 10ХСНД, 15ХСНД, легированные – 30ХМА и 40ХНМА, с карбонитридным упрочнением – 14ХГ2АФ, 16Г2АФ и др.

Особую сложность представляет повышение хладостойкости литых сталей. Литая сталь отличается от деформированной наличием дефектов в виде раковин и трещин. Литые стали имеют крупное первичное зерно, и его измельчение представляет сложную задачу.

Хладостойкость литых сталей может быть повышена при условии:

- создания равномерной мелкозернистой структуры, предотвращающей образование пиков локальных напряжений;
- уменьшения количества и размеров неметаллических включений и перлитной составляющей, а также их глобуляризации;
- уменьшения количества вредных примесей, способных образовывать сегрегации на структурных неоднородностях.

Наиболее перспективным способом измельчения зерна в литых и деформированных сталях является микролегирование карбидообразующими элементами: ванадий, титан, ниобий, цирконий.

Для литых сталей наиболее целесообразно легирование ванадием, который полностью растворяется в аустените, обеспечивая измельчение зерна и дисперсионное твердение.

При совместном использовании ванадия и алюминия карбонитриды или карбиды ванадия обеспечивают упрочнение по механизму дисперсионного твердения, а нитриды алюминия способствуют измельчению аустенитного зерна и препятствуют его росту при нагреве.

Дополнительное введение вместе с ванадием и алюминием титана может дать положительный эффект в результате образования нитридов алюминия при более низких температурах.

Повысить хладостойкость литых сталей можно за счет введения щелочноземельных металлов.

Однако десульфидирующая способность подобных лигатур в значительной мере определяется степенью раскисления стали. Щелочноземельные металлы обладают высоким сродством как к кислороду, так и к сере, и в случае низкого содержания алюминия в стали в основном расходуются на раскисление, а с увеличением концентрации алюминия содержание несвязанного кислорода в стали уменьшается и, следовательно, вероятность взаимодействия щелочноземельных металлов с серой возрастает.

При концентрации алюминия в стали менее 0,03% наблюдается снижение ударной вязкости, связанное с наличием в структуре металла пленок сульфидных эвтектик, располагающихся по границам зерен (рис. 3.4). При концентрации алюминия более 0,03% щелочноземельные металлы активно участвуют в формировании окисульфидных глобулярных включений.

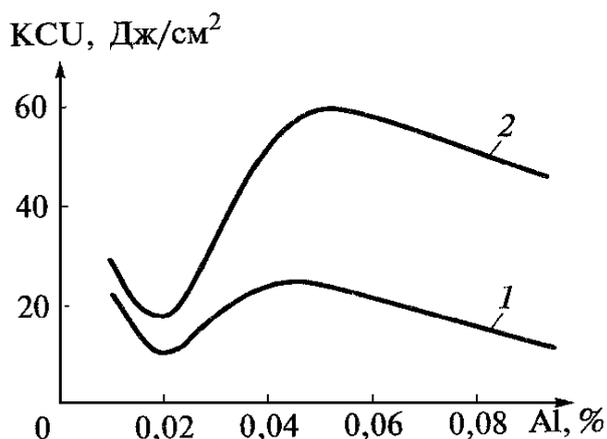


Рис. 3.4. Влияние содержания алюминия на ударную вязкость стали 12ХГФЛ: 1 – без обработки щелочноземельными металлами, 2 – с обработкой

Наиболее важные технологические свойства сталей для холодного климата – свариваемость и пластичность. Сварку широко применяют в производстве конструкций, а пластичность необходима для изготовления тонких листов и тонкостенных элементов, менее склонных к хрупкому разрушению, чем массивные детали.

Для повышения хладостойкости и свариваемости используют стали, легированные азотом в сочетании с различными сильными нитридообразующими элементами, в качестве которых чаще всего применяют ванадий, алюминий, ниобий и титан. Выделение азота из твердого раствора в виде нитридов уменьшает его охрупчивающее действие, что увеличивает прочность стали и, способствуя измельчению зерна, не ухудшает её хладостойкости.

К сталям этой группы относятся стали марок 09Г2С, 09Г2СД, 16Г2АФ, 14Г2АФ, 14Г2САФ и др. Механические свойства при температуре 20°C (293 К), а также значения ударной вязкости листового проката толщиной 10–25 мм из двух марок стали этой группы приведены в табл. 3.3.

При температуре воздуха до –50°C при сварке применяют флюсы АН-348 с проволокой Св-ЮНМ или ОСЦ-45 с Св-08ХИМ. При температуре ниже –20°C обязателен предварительный прогрев места сварки.

Помимо легирующих элементов необходимо учитывать влияние углерода. Углерод, хотя и способствует эффективному упрочнению, но резко снижает вязкость и пластичность стали, способствуя повышению хладноломкости. Принято считать, что увеличение в стали содержания углерода на каждые 0,1% повышает порог хладноломкости на 20°C (рис. 2.2, б). Снижение содержания углерода предотвращает

образование при сварке в зоне термического влияния хрупких закалочных мартенситных структур. В свариваемых хладостойких сталях содержание углерода должно быть ниже 0,2%.

Таблица 3.3

Механические свойства низколегированных свариваемых сталей марок 09Г2С, 14Г2САФ

Марка стали	Термическая обработка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$KCU$ , Дж/см <sup>2</sup> , при температуре, °С		
					20	-40	-70
09Г2С	Состояние поставки	500	350	21	60	40	330
14Г2САФ	Нормализация при температуре 930°С	40	490	25	100	80	660
	Закалка – отпуск	590	410	32	200	40	1120

При конструировании металлоконструкций машин следует учитывать следующие требования: минимальное количество концентраторов напряжений; отсутствие резких изменений сечений; ребра жёсткости не должны доходить до поясов, испытывающих растягивающие напряжения; отсутствие сплошных поперечных швов; использование только наклонных сварочных швов на элементах металлоконструкций, испытывающих растягивающие напряжения.

### 3.1.3. Цветные хладостойкие сплавы

**Алюминий и его сплавы**, не имея порога хладноломкости, остаются вязкими при  $-253...-269^\circ\text{C}$ . При охлаждении  $\sigma_B$  у них повышается на 35–60%,  $\sigma_{0,2}$  – на 15–25%, а ударная вязкость монотонно уменьшается до 0,2–0,5 МДж/м<sup>2</sup>. Вязкость разрушения  $K_{1c}$  практически не уменьшается, а значит алюминиевые сплавы при охлаждении менее чувствительны к надрезам, чем при 25°С. При низких температурах (от  $-253$  до  $-269^\circ\text{C}$ ) используют алюминий и сплавы АМц, АМг2, АМг5. Для несвариваемых изделий, работающих при температурах до  $-253^\circ\text{C}$ , применяют термически упрочняемые сплавы Д16, АК6, АК8, а также литейные сплавы.

**Титан и его сплавы** не охрупчиваются при температурах от  $-196$  до  $-269^\circ\text{C}$  и из-за большой удельной прочности используются в космической технике. Широко применяют технически чистый титан и его однофазные сплавы типа ВТ5-1. Они пластичны, легко сваривают-

ся и после сварки не требуется термическая обработка соединений. Более прочные, но менее пластичные сплавы ВТЗ-1 и ВТ6 применяют при температурах до  $-196^{\circ}\text{C}$ . Эти сплавы свариваются хуже, чем однофазные, и для их сварных соединений необходим отжиг.

**Медь и ее сплавы пластичны**, не имеют порога хладноломкости. Кроме того, вязкость разрушения у них при охлаждении повышается. Их применяют для трубных конструкций, крепежных деталей, сварных корпусов, работающих при температурах до  $-269^{\circ}\text{C}$ . Из-за более высокой стоимости по сравнению с алюминием медь и ее сплавы все больше заменяют сплавами алюминия.

#### **3.1.4. Неметаллические хладостойкие материалы**

Неметаллические хладостойкие материалы имеют более низкую прочность и ударную вязкость по сравнению с металлами. Их используют для изготовления тепловой изоляции, а также отдельных деталей и элементов конструкций. Для тепловой изоляции применяют вспененные полистирол или полиуретан, отличающиеся особенно низкой теплопроводностью ( $\lambda = 0,3-0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ). Для деталей и элементов конструкций используют пластмассы, наполненные стеклянным волокном (полиамиды П-68, поликарбонаты), а для подвижных уплотнений и электроизоляции – фторопласт-3 и 4 (до  $-269^{\circ}\text{C}$ ) и специальные резины ИРП, В и Г (ИРП-1321, ИРП-1346, В-14-1 и др.), применяемые в амортизаторах, уплотнениях, прокладках, манжетах тормозов и пальцев, работающих в масле до  $-70^{\circ}\text{C}$ .

### **3.2. Жаропрочные сплавы**

*Жаропрочностью* называется способность материала длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при повышенных температурах. Жаропрочность важна при выборе материала, когда рабочие температуры деталей превышают  $0,3T_{\text{пл}}$ .

*Критерии жаропрочности материалов:* рабочая температура; длительность работы под нагрузкой; величина напряжений.

При длительном нагружении при высоких температурах поведение материала определяется диффузионными процессами. Для этих условий характерны процессы *ползучести и релаксации напряжений*.

*Ползучесть* представляет собой медленное нарастание пластической деформации под действием напряжений, меньших предела те-

кучести. Аналогично влияет повышение напряжения при неизменной температуре испытания.

*Предел текучести, определяемый при кратковременных испытаниях, не может быть критерием жаропрочности, так как он не учитывает поведение материала при длительном нагружении.*

Критериями жаропрочности являются *предел ползучести и предел длительной прочности.*

*Пределом ползучести* называется напряжение, под действием которого материал деформируется на определённую величину за определённое время при заданной температуре. **Например:**  $\sigma_{1/100000}^{550} = 100$  МПа означает, что под действием напряжения 100 МПа за 100000 ч при температуре 550°C в материале появится пластическая деформация 1%.

*Пределом длительной прочности* называют напряжение, которое вызывает разрушение материала при заданной температуре за определённое время. *В обозначении предела длительной прочности указывают температуру и время до разрушения.* **Например:**  $\sigma_{10000}^{600} = 130$  МПа означает, что при температуре 600°C материал выдержит действие напряжения 130 МПа в течение 10000 ч.

Предел длительной прочности всегда меньше предела прочности, определяемого при кратковременных испытаниях при той же температуре.

*Когда между перемещением дислокаций, зернограничным скольжением и диффузионным переносом нет соответствия, на границах зёрен появляются поры и быстро наступает разрушение.*

*Для обеспечения жаропрочности требуется ограничить подвижность дислокаций и замедлить диффузию. Это достигается повышением прочности межзатомных связей, созданием препятствий для перемещения дислокаций внутри зёрен и на их границах, увеличением размеров зёрен.*

**Основной путь повышения жаропрочности** – создание в материалах крупнозернистой структуры с однородным распределением мелких частиц упрочняющих фаз внутри зёрен и на их границах. Это получается при помощи *закалки и отпуска*, а во многих жаропрочных сплавах – *после закалки и старения*. Для получения оптимальной структуры в жаропрочных сталях и сплавах используют комплексное легирование, и по химическому составу эти материалы сложнее обычных легированных сталей и сплавов.

*Дополнительные меры повышения жаропрочности:*

- термомеханическая обработка;
- увеличение прочности межатомной связи в сталях, когда благодаря легированию ОЦК-решётка заменяется ГЦК-решёткой;
- создание анизотропной структуры.

### **3.2.1. Основные группы жаропрочных материалов**

**Перлитные, мартенситные, аустенитные жаропрочные стали** используют при температуре 450–700°C и по масштабам применения занимают ведущее место. Ниже 450°C вполне пригодны обычные конструкционные стали и нет необходимости заменять их жаропрочными сталями.

Жаропрочные сплавы на основе *алюминия, магния, титана* легче сталей, однако они менее жаропрочны и используются при следующих температурах:

- 1) сплавы алюминия – до 500–550°C;
- 2) сплавы магния – до 300–350°C;
- 3) сплавы титана – до 500–600°C.

Указанные сплавы, несмотря на более высокую стоимость, применяют там, где из-за повышенных эксплуатационных температур невозможно использовать обычные сплавы этих металлов и нельзя применить стали из-за более высокой плотности.

Сплавы на основе *никеля* или *кобальта* жаропрочнее сталей. Сплавы на основе никеля применяют при температурах 700–1000°C, а кобальтовые сплавы не получили широкого применения из-за дефицитности.

*Материалы высокой жаропрочности*, применимые при температуре выше 1000°C, – это тугоплавкие металлы и их сплавы, керамика на основе SiC и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, графит.

В транспортном машиностроении применяют мартенситные и аустенитные стали, которые используют чаще всего в двигателях внутреннего сгорания.

**Мартенситная сталь 40X10C2M** – *сильхром* отличается повышенной стойкостью к окислению в атмосфере. Благодаря высокому содержанию легирующих элементов сталь глубоко прокаливается даже при нормализации (до 120–200 мм) и поэтому пригодна для деталей крупных сечений.

*Термообработка* – закалка или нормализация с температур 950–1100°C (для растворения карбидов) и отпуск при  $T = 600–740^\circ\text{C}$ . В машиностроении применяется для клапанов двигателей, а также крепёжных детали моторов. *Сильхромы* можно применять до рабочих температур 600–650°C. Однако есть недостаток – затруднена сварка, требуется подогрев перед сваркой и последующая термическая обработка.

**Аустенитные стали** типа **45X14H14B2M** отличаются большим содержанием легирующих элементов и углерода. Эти стали по жаропрочности превосходят перлитные и мартенситные и используются при температурах выше 600°C. Аустенитные стали отличаются большой пластичностью, хорошо свариваются, однако по сравнению с перлитными сталями труднее обрабатываются давлением и резанием.

*Термообработка* – закалка с температур 1100–1150°C и старение при температурах 700–750°C в течение 10–20 ч. *Аустенитные стали охрупчиваются при эксплуатации из-за выделения избыточных фаз по границам зёрен и особенно после образования хрупкой  $\sigma$ -фазы в интервале температур 600–750°C, особенно в сталях с повышенным содержанием хрома и молибдена. Для растворения образовавшейся  $\sigma$ -фазы проводят дополнительную термическую обработку после некоторого срока службы детали и тем самым устраняют охрупчивание и восстанавливают первоначальные свойства.*

**Неметаллические жаропрочные материалы.** *Графит и специальная керамика* – наиболее важные неметаллические материалы, используемые при температурах выше 1000°C.

**Графит** – один из перспективных материалов высокой жаропрочности. Уникальной особенностью графита является увеличение модуля упругости и прочности при нагреве. До 2200–2400°C прочность графита повышается максимально на 60%. При нагреве графит мало расширяется, хорошо проводит теплоту и поэтому устойчив против тепловых ударов. Ползучесть у графита проявляется при 1700°C и характеризуется небольшой скоростью. Материал легко прессуется в горячем состоянии и хорошо обрабатывается резанием. *Недостатки:* графит легко окисляется, уже при 520–560°C потеря массы составляет 1% за 24 ч, поэтому поверхность графитовых изделий защищают покрытиями.

**Керамические материалы** на основе SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и системы Si–Al–O–N являются лёгкими, прочными и износостойкими веществами. Они способны работать при  $T = 1500–1800^\circ\text{C}$ , стойки против коррозии

и эрозии, не боятся перегрева и не нуждаются в принудительном охлаждении. Керамика изготавливается из недефицитных материалов.

*Применение:* в двигателях внутреннего сгорания для изготовления поршней, головок блока цилиндров и других теплонапряжённых деталей.

*Недостатки:* хрупкость, сложность получения плотного беспористого материала и трудности изготовления деталей.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое хладостойкость?
2. Материалы с какими кристаллическими решетками подвержены хладноломкости?
3. Назовите основные группы хладостойких материалов.
4. Что является главным критерием хладостойкости?
5. Какие показатели являются определяющими при выборе хладостойких сталей и как определяется минимальная рабочая температура хладостойкой стали?
6. Объясните влияние углерода и легирующих элементов на свойства сталей климатического холода.
7. Как влияют на хладноломкость сера, фосфор, газы? В чём заключается десульфурация и дефосфорация хладостойкой стали?
8. Назовите особенности повышения хладостойкости литых сплавов. Какую роль играет алюминий на ударную вязкость в этих сталях?
9. Дайте характеристику цветным хладостойким сплавам.
10. Дайте описание неметаллическим хладостойким материалам.
11. Жаропрочные сплавы. Назовите критерии жаропрочности материалов.
12. Назовите основные группы жаропрочных материалов. Их применение.
13. Что относится к неметаллическим жаропрочным материалам?

## Глава 4. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

### 4.1. Стали с высокой технологической пластичностью и свариваемостью

**Технологическая пластичность** – способность подвергаться горячей и холодной пластической деформации.

В горячем (аустенитном) состоянии большинство сталей обладают высокой пластичностью, что позволяет получать фасонный прокат и поковки без дефектов (трещин, разрывов и т.п.). Более того, горячей обработкой давлением (в сочетании с последующим отжигом) измельчают микроструктуру, устраняют литейные дефекты и, формируя волокна вдоль контура поковок, создают благоприятно ориентированную макроструктуру. В результате этого горячедеформированный металл в отличие от литого имеет примерно в 1,5 раза более высокую конструкционную прочность.

Высокий запас технологической пластичности необходим листовым сталям, предназначенным для холодной штамповки. Холодная штамповка находит широкое применение в автомобилестроении.

Листовая сталь для холодной штамповки должна обладать способностью к глубокой вытяжке и иметь хорошее качество поверхности для последующего нанесения покрытия. Различают четыре категории вытяжки: ВГ – весьма глубокая; СВ – сложная; ОСВ – особо сложная; ВОСВ – весьма особо сложная. Способность к вытяжке зависит от многих факторов: химического состава и концентрации углерода, структуры и механических свойств стали. Чем меньше концентрация углерода, тем легче идет технологический процесс вытяжки. Для глубокой вытяжки содержание углерода в стали ограничивают до 0,1%; при 0,2–0,3% С возможны только незначительные изгиб и вытяжка, а при 0,35–0,45% С – изгиб большого радиуса.

Микроструктура стали должна состоять из феррита с небольшим количеством перлита. Выделение по границам зерен структурно свободного (третичного) цементита строго ограничено во избежание разрывов при штамповке. Лучше всего деформируется сталь с мелким зерном, соответствующим 7–8 номеру зернистости по ГОСТ 5639-82. При большем размере зерна получается шероховатая поверхность в виде так называемой апельсиновой корки, при меньшем – сталь становится слишком жесткой и упругой. Также нежелательна разнородная структура, поскольку она способствует неравномерности деформации и образованию трещин.

Контролируемыми параметрами механических свойств стали являются относительное удлинение  $\delta$  и отношение  $\sigma_T/\sigma_B$ . Чем больше  $\delta$ , ниже  $\sigma_T$ , тем меньше отношение  $\sigma_T/\sigma_B$  (рекомендуется 0,55–0,66), тем выше способность низкоуглеродистых сталей к вытяжке.

Для глубокой, сложной и особо сложной вытяжки используют малопрочные  $\sigma_B = 280\text{--}330$  МПа, высокопластичные  $\delta = 33\text{--}45\%$  низкоуглеродистые стали. Их поставляют в виде тонкого холоднокатаного листа, подвергнутого рекристаллизационному отжигу при  $650\text{--}690^\circ\text{C}$ .

Широко применяют кипящую сталь 08кп. Способность этой стали хорошо штамповаться обусловлена низким содержанием углерода и почти полным отсутствием кремния, который сильно упрочняет феррит и затрудняет его деформируемость. Из стали 08кп штампуют детали кузова автомобиля, корпуса приборов и другие детали сложного профиля.

Кипящая сталь 08кп обеспечивает только первую категорию вытяжки (ВГ). Ее недостаток – склонность к деформационному старению. Следствием деформационного старения является образование на поверхности изделия после вытяжки полос скольжения своеобразных складок.

Методом контроля склонности стали к деформационному старению служит запись диаграммы кривой растяжения. Кривая растяжения должна быть плавной, со слабым деформационным упрочнением и не иметь площадки или зуба текучести (рис. 4.1). Наличие последних указывает на то, что в стали прошло деформационное старение.

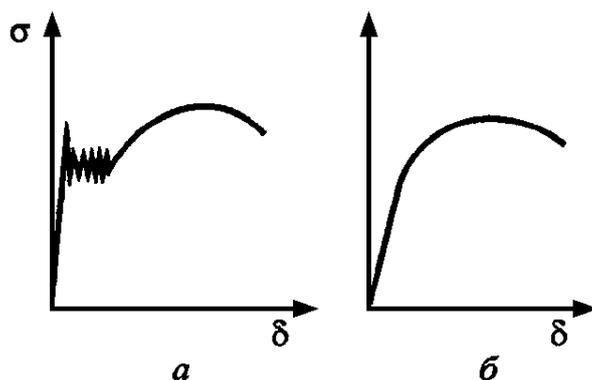


Рис. 4.1. Диаграммы растяжения холоднокатаной отожженной стали, склонной к деформационному старению (а) и нестареющей (б)

Для исключения брака в виде полос скольжения применяют нестареющие стали:

- кипящую 08Фкп, микролегированную ванадием (0,02–0,04%);
- спокойную 08Ю и 10ЮА с присадкой алюминия (0,02–0,5%);

– спокойную (08ГСЮФ) с присадками алюминия и ванадия (ванадий и алюминий в этих случаях связывают углерод и остаточный азот в карбиды и нитриды, выводят примеси внедрения из твердого раствора и предупреждают развитие старения).

Основное применение имеет сталь 08Ю, которая допускает все четыре категории качества.

Для штампованных деталей и изделий, которые должны иметь повышенную прочность (например, диски колес), применяют двухфазные стали 12ХМ, 18ХГ2ФТЮДР с ферритно-мартенситной структурой, состоящей из мягкого феррита и прочного мартенсита (20–30%). Получают такую структуру закалкой из межкритического интервала ( $A_1$  –  $A_3$ ) после горячей прокатки. Стали достаточно легко штампуются, но при этом сильно упрочняются (после штамповки  $\sigma_T = 450$ – $600$  МПа).

**Свариваемость** – способность получения сварного соединения, равнопрочного с основным металлом.

Большинство неразъемных соединений получают сваркой плавлением с использованием мощного теплового источника – электрической дуги. При этом основной металл и электрод плавятся, образуя жидкую ванну. Температуры сварочной ванны и примыкающего металла достигают высоких значений. После кратковременного нагрева следует достаточно быстрое охлаждение, т.е. возникает своеобразный термический цикл, который определяет строение сварного шва и околошовной зоны. При сварке углеродистой стали структура околошовной зоны (зоны термического влияния) формируется в соответствии с диаграммой состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C (рис. 4.2). Шов имеет структуру литого металла, которая образуется в процессе первичной кристаллизации. Из-за направленного отвода теплоты кристаллы здесь приобретают столбчатую форму, вытянутую перпендикулярно линии сплавления.

Зона термического влияния состоит из четырёх участков:

1) участок перегрева с крупным зерном и повышенной хрупкостью. В углеродистых сталях здесь формируется видманштеттова структура, состоящая из сетки феррита и пластинчатого перлита; в легированных сталях возможно образование структур закалки: бейнита, мартенсита или смеси мартенсита с бейнитом (табл. 4.1). Этот участок предрасположен к образованию холодных трещин;

2) участок полной перекристаллизации, образующийся после нагрева выше критической точки  $A_3$ . На этом участке в углеродистых сталях образуется мелкое зерно, они имеют повышенный запас пластичности и вязкости; в легированных сталях здесь также возможно образование структур закалки;

3) участок неполной перекристаллизации, образующийся после нагрева стали в межкритическом интервале температур  $A_1 - A_3$ . После нагрева углеродистых сталей здесь сохраняется крупное зерно феррита и измельчается перлитная составляющая; в легированных сталях возможно образование структур неполной закалки;

4) зона низкого отпуска, испытывающая нагрев ниже температур фазовых превращений (точка  $A_1$ ). Происходящие на этом участке изменения зависят от исходной структуры стали, которая может не изменяться, испытывать рекристаллизацию, если предварительно была проведена холодная деформация, или отпуск, если металл был предварительно закален.

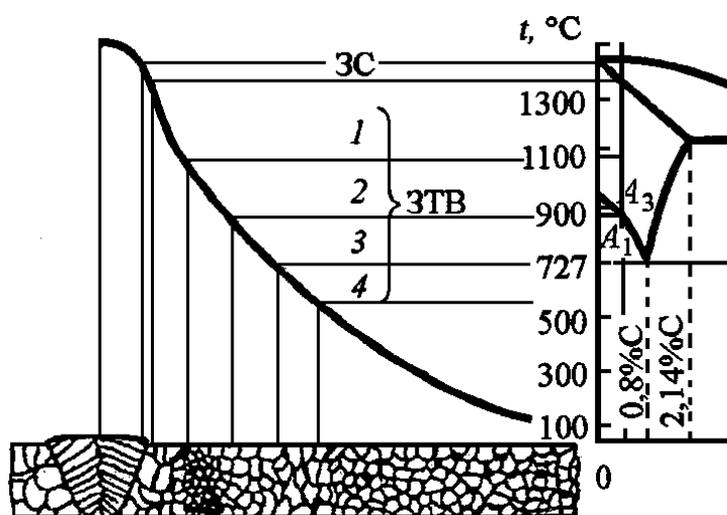


Рис. 4.2. Схема строения сварного соединения при сварке стыкового шва: ЗС – зона сплавления; ЗТВ – зона термического влияния; 1 – участок перегрева; 2 – участок полной перекристаллизации; 3 – участок частичной перекристаллизации; 4 – зона низкого отпуска

Таблица 4.1

Структура стали в различных участках зоны термического влияния сварного шва

Номер участка	Сталь		
	низкоуглеродистая	низколегированная	средне- и высоколегированная*
1	Ф + П (крупное зерно)	Б (крупное зерно)	М + $A_{ост}$ (крупное зерно)
2	Ф + П (мелкое зерно)	Б (мелкое зерно)	М + $A_{ост}$ (мелкое зерно)
3	Ф + П	Б + Ф	М + Ф
4	То же	Ф + карбиды	Продукты отпуска

\* В высоколегированных аустенитных сталях зона термического влияния сохраняет структуру аустенита.

Ширина характерных участков зоны термического влияния зависит от режима сварки и толщины свариваемого металла. Свариваемость стали тем выше, чем меньше в ней углерода и легирующих элементов. Влияние углерода является определяющим. С увеличением его концентрации усиливается склонность к образованию горячих и холодных трещин.

*Горячие трещины* образуются непосредственно в сварном шве в процессе кристаллизации, когда металл находится в двухфазном состоянии. Причинами их возникновения являются кристаллизационные усадочные напряжения, а также образование сегрегаций примесей (серы, фосфора, кислорода), ослабляющих связи между формируемыми зернами. Углерод расширяет интервал кристаллизации и усиливает склонность стали к возникновению горячих трещин.

*Холодные трещины* образуются при охлаждении сварного шва ниже 200–300°C преимущественно в зоне термического влияния. Это наиболее распространенный дефект при сварке легированных сталей. Причина их образования – внутренние напряжения, возникающие при структурных превращениях (особенно мартенситном) в результате местной закалки (подкалки). Увеличивая объемный эффект мартенситного превращения, углерод способствует появлению холодных трещин.

Высокой свариваемостью обладают стали, у которых содержание углерода до 0,2% С. В эту группу входят углеродистые стали Ст1–Ст4, 0,5, 08, 10, 15, 20; низколегированные стали 09Г2(Д), 09Г2С, 14Г2, 15ГФ(Д), 16ГС, 17ГС и др., применяемые для изготовления различных металлоконструкций (трубопроводов, мостов, вагонов, судов), а также стали с карбонитридным упрочнением 14Г2АФ(Д), 15Г2СФ(Д), 16Г2АФ и др., применяемые для изготовления металлоконструкций (мостов, цехов, кранов, резервуаров). Все они содержат небольшие добавки ванадия в сочетании с повышенным содержанием азота (до 0,025%).

Сварка полуфабрикатов из этих сталей при толщинах до 15 мм не вызывает затруднений. Сварка при больших толщинах и в термически упрочненном состоянии требует подогрева и термической обработки.

#### **4.2. Железоуглеродистые сплавы с высокими литейными свойствами**

Литейные свойства сплавов оценивают жидкотекучестью, усадкой, а также склонностью к образованию пористости, ликвации, горячих и холодных трещин. От литейных свойств зависит не только возможность получения сложной отливки, но и ее конструкционная проч-

ность, так как многие дефекты литой структуры – пористость, ликвационная неоднородность, микротрещины – эффективные концентраторы напряжений.

Литейные свойства сплавов тем выше, чем меньше их температурный интервал кристаллизации. В связи с этим наиболее высокими литейными свойствами обладают сплавы, испытывающие эвтектическое превращение. Из сплавов на основе железа лучшие литейные свойства имеют чугуны.

#### **4.2.1. Разновидности чугунов**

Уже много веков человечество использует чугун. Он отличается достаточной прочностью, обладает антифрикционными свойствами и имеет относительно невысокую стоимость. Единственным недостатком чугунных деталей является их хрупкость. Но при правильной технологии получения чугуна этот недостаток минимизируется, поэтому чугунные детали так широко применяются в промышленности.

Чугун представляет собой сплав железа с углеродом (более 2,14%) и другими элементами. В зависимости от состава, условий кристаллизации и скорости охлаждения углерод в чугуне может находиться в химически связанном состоянии в виде цементита (белые чугуны) или в структурно свободном состоянии в виде графита (серые чугуны).

*В белых чугунах* весь углерод, как сказано выше, находится в виде карбида железа, поэтому они отличаются высокой твердостью, хрупкостью и практически не поддаются обработке резанием. Белый чугун не находит применения в качестве конструкционного материала. Обычно белые чугуны идут в переплавку для выплавки стали или применяют так называемые *отбеленные чугуны*, в которых поверхностные слои имеют структуру белого, а сердцевина – серого чугуна. Высокая твердость поверхности отбеленного чугуна (НВ 400...500) обеспечивает хорошую сопротивляемость изнашиванию.

В машиностроении используют, главным образом, *серые, высокопрочные чугуны, чугуны с вермикулярным графитом и ковкие чугуны*.

Для работы при повышенных температурах и в окислительных средах применяют *жаростойкие, коррозионностойкие и жаропрочные чугуны*, которые предназначены для эксплуатации при температурах до 1100°C. Их химический состав и механические свойства регламентированы ГОСТ 7769-82. Применяют *модифицированный чугун*, который отличается от обычного чугуна более высокими механическими и особыми свойствами: жаропрочностью, коррозионной стойко-

стью, возможностью термической обработки и др. Его получают добавкой в ковш небольшого количества графитизирующих (ферросилицид, силикокальций или силикоалюминий) и легирующих (молибден, никель и др.) элементов.

Для чугунов широко применяется термическая обработка. При этом необходим строгий учет структуры и механических свойств материала в исходном состоянии. В результате изотермической закалки чугунных изделий значительно повышаются прочность, ударная вязкость, износостойкость и другие свойства.

При выборе марки чугуна следует учитывать, что с уменьшением прочности чугунов улучшаются их литейные свойства и уменьшаются остаточные напряжения и коробление, а с увеличением толщины стенок (диаметра) отливок механические свойства изделий понижаются вследствие ухудшения структуры металла.

#### 4.2.2. Серые чугуны

*Серыми* называются чугуны с пластинчатой формой графита, они являются основным литейным машиностроительным материалом. Обладают хорошими литейными свойствами, средней прочностью, малым удлинением при разрушении, ограниченной ударной вязкостью, удовлетворительной износостойкостью, хорошей обрабатываемостью резанием. Показателем механических свойств серых чугунов, в соответствии с ГОСТ 1412-85, является прочность при статическом растяжении.

Марка серого чугуна состоит из букв СЧ (серый чугун) и цифры, показывающей уменьшенное в 10 раз значение (в мегапаскалях) временного сопротивления при растяжении (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Механические свойства чугунов

Марка чугуна	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	НВ	Структура металлической основы
	МПа				
1	2		3	4	5
<i>Серые чугуны (ГОСТ 1412-85)</i>					
СЧ 10	100	–	–	190	Ф
СЧ 15	150	–	–	163–210	Ф
СЧ 25	250	–	–	180–245	Ф + П
СЧ 35	350	–	–	220–275	П

1	2	3	4	5	
<i>Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293-85)</i>					
ВЧ 35	350	220	22	140–170	Ф
ВЧ 45	450	310	10	140–225	Ф + П
ВЧ 60	600	370	3	192–227	Ф + П
ВЧ 80	800	490	2	248–351	П
ВЧ 100	1000	700	2	270–360	Б
<i>Чугуны с вермикулярным графитом (ГОСТ 28394-89)</i>					
ЧВГ 30	300	240	3	130–180	Ф
ЧВГ 35	350	260	2	140–190	Ф + П
ЧВГ 40	400	320	1,5	170–220	Ф + П
ЧВГ 45	450	380	0,8	190–250	П
<i>Ковкие чугуны (ГОСТ 1215-79)</i>					
КЧ 30-6	300	–	6	100–163	Ф + до 10% П
КЧ 35-8	350	–	8	100–163	
КЧ 37-12	370	–	12	110–163	
КЧ 45-7	450	–	7	150–207	
КЧ 60-3	600	–	3	200–269	П + до 20% Ф
КЧ 80-1,5	800	–	1,5	270–320	

В серых чугунах весь углерод находится в свободном состоянии в виде пластинчатого графита. Эти чугуны могут иметь структуру, состоящую из ферритной основы (рис. 4.3, б) и включений графита. Такие чугуны содержат, кроме углерода, примеси кремния, марганца и фосфора. С уменьшением содержания кремния цементит, находящийся в составе перлита, распадается лишь частично, при этом образуется так называемая ферритно-перлитная структура с включениями графита. Путем модифицирования повышают прочностные характеристики серых чугунов за счет образования мелких графитных включений.

Из серых чугунов изготавливают литые детали простой конфигурации (крышки, стойки, кожухи, шкивы и т.п.). Серые чугуны также используют в узлах трения в качестве заменителя цветных металлов. Основными условиями применения антифрикционного чугуна в узлах трения являются качественная смазка и увеличение зазора по сравнению с цветными металлами на 15–30%. Химический состав и механические свойства этих чугунов регламентированы ГОСТ 1585-79.

Для машиностроения в основном применяется серый чугун, имеющий в своем составе графит. Детали, изготовленные из такого материала, не реагируют на возникающие напряжения, они поглоща-

ют колебания, появляющиеся в случае вибрации механизмов. Из него изготавливают детали ответственного назначения: втулки, станины станков, тяжелые основания.

В качестве конструкционного материала его применяют практически на всех предприятиях машиностроительной отрасли.

Детали тракторов, материалом которых стал серый чугун, достигают 20% от всего количества его деталей. Такое использование этого сплава связано с высокой износостойкостью. Он не задирается в случае большого трения и при отсутствии смазки обладает демпфирующей способностью. Из него изготавливают: блоки, крышки подшипников, тормозные диски, феррадо.

Для изготовления головки блока различных двигателей используют низколегированный сплав следующих марок: СЧ20, СЧ25.

Для моторов автомобилей любой конструкции используются гильзы цилиндров, изготовленные из специального легированного сплава. В большинстве случаев используется его фосфористая фракция. Главными требованиями, предъявляемыми к СЧ при производстве гильз, являются перлитная структура, графит, высокая твердость. Такие же требования соблюдаются при изготовлении отливок гильз, материалом которых является низколегированный сплав. Химический состав этого материала зависит от нескольких технологических характеристик: способа плавки, габаритов отливки и технологичности формы.



Рис. 4.3. Микроструктуры серых чугунов,  $\times 300$ : а – перлитного; б – ферритного

Дизельные двигатели при работе создают большую нагрузку на блок цилиндров, поэтому для них используют легированные чугуны. Головки цилиндров изготавливают из высокоуглеродистых легированных марок.

На автомобилях устанавливают чугунные распределительные валы, отличающиеся высокой износостойкостью. Этот параметр достигается благодаря поверхностной закалке, которой подвергают металл.

Когда деталь эксплуатируется на больших скоростях, когда имеет место сухое трение, необходимо чтобы была повышенная износостойкость материала и высокий коэффициент трения. Именно в таких условиях данный сплав просто незаменим. *Тормозные барабаны*, работающие в таких условиях, изготавливают из СЧ20. Когда деталь испытывает высокие нагрузки и возможно появление термических трещин, используют специальный термостойкий сплав с высоким содержанием углерода и высоким уровнем легирования.

Для особо тяжелых условий устанавливают детали, материалом которых является перлитный чугун (рис. 4.3, а). В его составе находится вермикулярный графит (рис. 4.4).

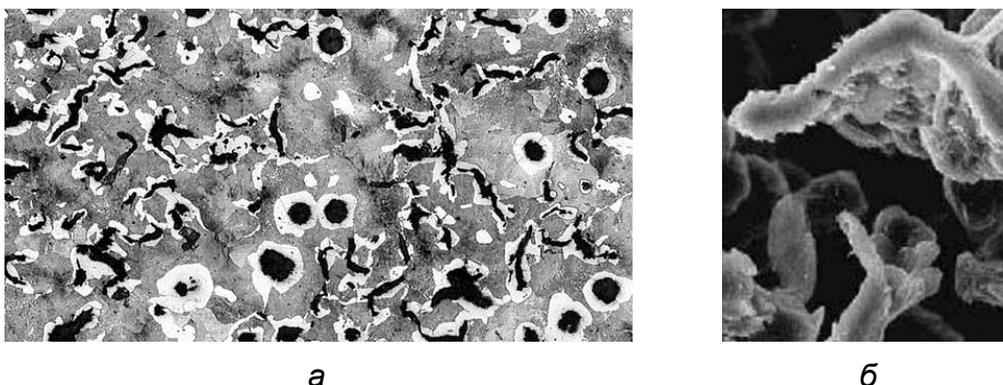


Рис. 4.4. Микроструктура вермикулярного чугуна: а – общий вид, б – формирование ответвлений кораллоподобного графита

Вращение маховика при работе достигает 7000 об/мин. Такая скорость вызывает появление растягивающих напряжений. Вращающаяся поверхность маховика постоянно касается рабочей поверхности другой детали. Такое трение вызывает сильное выделение тепла, в результате возникают термические трещины, которые отрицательно влияют на прочность детали.

Чтобы повысить прочность, учитывая большой вес маховика и размер его сечения, он изготавливается из различных марок: СЧ25, СЧ30, СЧ35. Он должен обеспечивать прочность заготовки выше  $250 \text{ Н/мм}^2$ . Иногда СЧ 35 имеет прочность, которой не хватает для обеспечения нормальной работы маховика. В этом случае используют чугун, в который добавляют шаровидный графит.

В легковых автомобилях чугунными крышками закрывают коренные подшипники. Эта конструкция встречается в большинстве случаев

на машинах с карбюраторным двигателем. Чтобы обеспечить перлитную структуру, а также высокую твердость, превышающую 200 НВ, для изготовления крышек подшипников применяют СЧ25.

В автомобиле на выпускные коллекторы действуют выхлопные газы, температура которых доходит до 90°. Коллекторы под воздействием агрессивной среды окисляются, деформируются и трескаются. Использование серого чугуна обеспечивает долговечность таким деталям и высокую экономичность. В связи с тем, что толщина стенок коллектора мала, для его изготовления применяют СЧ15. Чтобы повысить его жаростойкость, проводят легирование чугуна хромом или никелевыми добавками. Для изготовления коллекторов, испытывающих большие термические нагрузки, используют ковкий чугун с добавками шаровидного графита.

### 4.2.3. Высокопрочные чугуны

*Высокопрочными* называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Их получают модифицированием магнием, который вводят в жидкий чугун в количестве 0,02–0,08%. Ввиду того что модифицирование чугунов чистым магнием сопровождается сильным пироэффектом, чистый магний заменяют лигатурами (например, сплавом магния и никеля).

По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть ферритным или перлитным. Ферритный чугун в основном состоит из феррита и шаровидного графита, допускается до 20% перлита. Структура перлитного чугуна – сорбитообразный или пластинчатый перлит и шаровидный графит, допускается до 20% феррита (рис. 4.5).

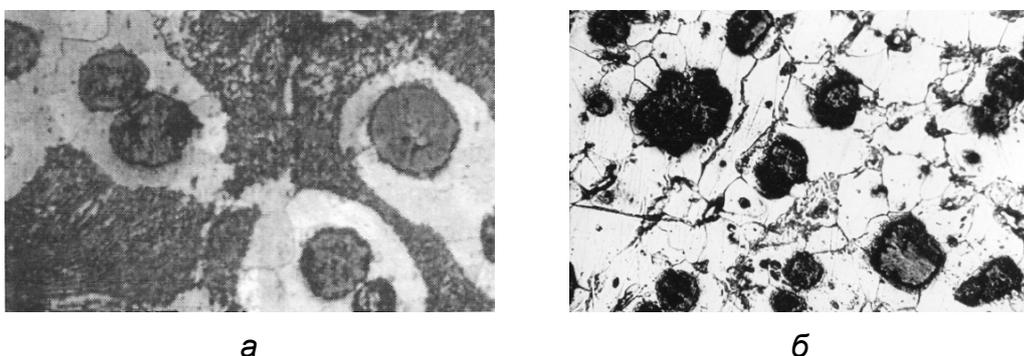


Рис. 4.5. Микроструктура высокопрочного чугуна, х300:  
а – перлитного; б – ферритного

Шаровидный графит – менее сильный концентратор напряжений, чем пластинчатый, поэтому он меньше снижает механические свойства

металлической основы. Чугуны с шаровидным графитом обладают более высокой прочностью и некоторой пластичностью. Марка высокопрочного чугуна состоит из букв ВЧ и числа, обозначающего уменьшение в 10 раз значение его временного сопротивления (табл. 4.2).

Высокопрочные чугуны применяют в машиностроении: в дизеле-, тракторо- и автомобилестроении – *коленчатые валы, поршни и многие другие ответственные детали, работающие при высоких циклических нагрузках и в условиях изнашивания.*

В некоторых случаях для улучшения механических свойств применяют термическую обработку отливок: закалку и отпуск при 500–600°C для повышения прочности; отжиг, способствующий сфероидизации перлита, для увеличения пластичности.

#### **4.2.4. Чугуны с вермикулярным графитом**

В чугунах с вермикулярным графитом (ЧВГ) структура формируется под действием комплексного модификатора, содержащего магний и редкоземельные металлы. Графит приобретает шаровидную (до 40%) и вермикулярную – в виде мелких тонких прожилок – форму (рис. 4.4). Такая форма графита препятствует возникновению и распространению трещин и, как следствие, повышает механические свойства и теплопроводность.

По механическим свойствам чугуны с вермикулярным графитом занимают промежуточное положение между серыми и высокопрочными чугунами. Они прочнее серых чугунов, особенно при циклических нагрузках, механические свойства этих чугунов в меньшей степени зависят от массы отливок. Они отличаются хорошей теплопроводностью (40–50 Вт/(м·К)), что обеспечивает их стойкость к теплосменам. Чугуны с вермикулярным графитом заменяют серые чугуны в отливках, подвергаемых циклическим нагрузкам и частым теплосменам. При введении в состав чугунов до 1,2% Ni и 0,4% Mo они хорошо противостоят изнашиванию и кавитации.

Чугун с вермикулярным графитом (*в Европе данный чугун называют «Чугун с компактным графитом», сокращенно CGI*) обладает редким сочетанием высоких показателей специфических свойств (*прочность, пластичность и теплопроводность*), необходимых для производства деталей в автомобилестроении, работающих в условиях теплосмен и значительного перепада температур, таких как: *поршни, гильзы, крышки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, блоки цилиндров, головки блоков цилиндров дизельных и крупных*

бензиновых двигателей, к которым дополнительно предъявляются высокие требования по низкой металлоемкости деталей, что вызывает заметный интерес к данному виду чугуна и стимулирует его широкое применение в автомобилестроении, тракторостроении, тепловозостроении, судостроении, в первую очередь для производства тяжело нагруженных дизельных двигателей.

Более полный список применения ЧВГ представлен в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Области применения чугуна с вермикулярным графитом в машиностроении

Марка чугуна	Область применения	Примеры отливок
ЧВГ 30 ЧВГ 35 ЧВГ 40	Детали общего машиностроения (взамен серого чугуна), работающие при повышенных циклических механических нагрузках. Детали двигателей внутреннего сгорания, работающих при переменных повышенных температурах и механических нагрузках: в автомобилестроении и тракторостроении, дизелестроении, транспортном машиностроении, энергетическом машиностроении, металлургическом машиностроении	Маслоприводы для тракторов, опорные детали, головки цилиндров, крепежные детали рам, бандажные кольца шестерен автомобилей повышенной грузоподъемности, тормозные рычаги тракторов, тормозные кронштейны, вентиляционная подушка, соединительные фланцы, крышки коробки передач, корпуса, крышки и головки цилиндров, корпуса турбокомпрессоров, выхлопные патрубки, ступицы колес, балансиры, V-образные блоки 12-цилиндровых двигателей, блоки 6-цилиндровых двигателей. Тормозные диски для высокоскоростных поездов, корпуса выпускных клапанов. Корпусы газовых турбин, корпуса компрессоров
ЧВГ 40	Детали, работающие при значительных механических нагрузках, в условиях трения, износа, гидрокавитации и при повышенных термоциклических нагрузках	Корпусы винтовых передач, поршни и гильзы ДВС, корпуса гидроаппаратуры высокого давления, эксцентриковые зубчатые колеса и др.

Условное обозначение марки включает: букву Ч – чугун; буквы ВГ – вермикулярный графит (форма графита).

Чугуны с вермикулярным графитом производят четырех марок: ЧВГ 30; ЧВГ 35; ЧВГ 40; ЧВГ 45 (табл. 4.2). Число в марке обозначает уменьшенное в 10 раз значение временного сопротивления.

#### 4.2.5. Ковкие чугуны

*Ковкими* называются чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают отжигом белых доэвтектических чугунов. По этой причине графит ковких чугунов называют углеродом отжига. Такой графит, в отличие от пластинчатого, меньше снижает механические свойства металлической основы, вследствие чего ковкие чугуны по сравнению с серыми обладают более высокой прочностью и пластичностью. Маркируют ковкие чугуны буквами КЧ и числами, первое из которых указывает уменьшенное в 10 раз значение  $\sigma_B$ , второе – значение  $\delta$ . Из табл. 4.2 следует, что ферритные чугуны имеют более высокую пластичность, а перлитные – более высокие прочность и твердость.

По структуре металлической основы, которая определяется режимом отжига, ковкие чугуны бывают ферритными и перлитными (рис. 4.6).

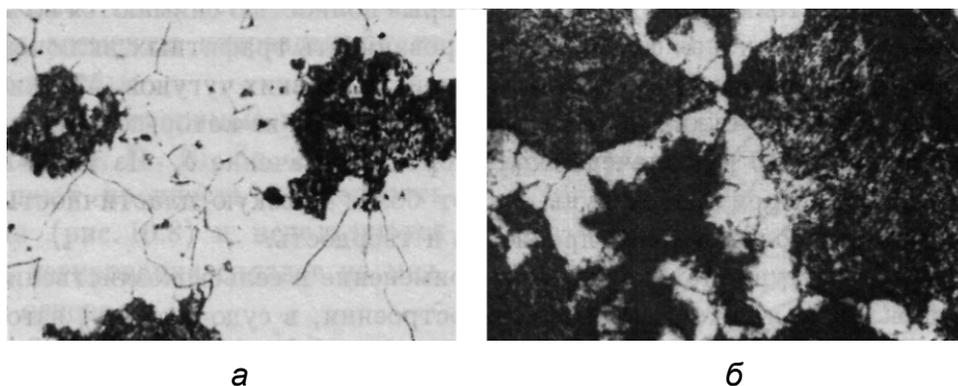


Рис. 4.6. Микроструктуры ковких чугунов,  $\times 300$ : а – ферритного; б – перлитного

Ковкие чугуны нашли широкое применение в транспортном, автомобильном машиностроении, в судо-, котло-, вагоно- и дизелестроении. Из них изготавливают детали высокой прочности, работающие в тяжелых условиях износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки, а также изготавливают детали, работающие при средних и высоких статических и динамических нагрузках (подшипники, кронштейны, картеры редукторов, поршни, ступицы и др.).

Хорошие литейные свойства исходного белого чугуна позволяют производить отливки сложной формы.

Широкое применение ковких чугунов в машиностроении связано с тем, что он дешевле стали и обладает высокой стойкостью к коррозии, недостаток – повышенная по сравнению с остальными чугунами стоимость из-за продолжительного дорогостоящего отжига.

Серые, высокопрочные и ковкие чугуны применяются также в качестве антифрикционных материалов. Металлическая основа таких чугунов является в основном перлитной или перлитно-ферритной. Буква А в марках этих чугунов означает антифрикционный.

Антифрикционные серые перлитные чугуны марок АЧС-1, АЧС-2 и АЧС-3 рекомендуется применять при давлении до 500 МПа. Антифрикционные высокопрочные чугуны с шаровидным графитом марок АЧВ-1, АЧВ-2 и ковкие антифрикционные чугуны с хлопьевидным графитом марок АЧК-1, АЧК-2 применяют в узлах трения при повышенных давлениях от 500 МПа до 1200 МПа. Все виды антифрикционных чугунов предназначены для работы в паре с термообработанными (закаленными или нормализованными) и термически не обработанными валами.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Что такое технологическая пластичность?
2. Что такое свариваемость металла?
3. Объясните процесс кристаллизации металла шва при сварке.
4. Нарисуйте строение сварного соединения и назовите участки зоны термического влияния.
5. Каковы основные причины образования трещин в сварных соединениях?
6. Назовите стали, используемые для сварки.
7. Какие сплавы называют чугунами?
8. Состав, свойства и применение серых чугунов в машиностроении. Маркировка серых чугунов.
9. Высокопрочные чугуны, их получение, состав, свойства, маркировка и применение в машиностроении.
10. Чугун с вермикулярным графитом. Его химический состав, структура, свойства, получение, маркировка и применение.
11. Ковкий чугун. Особенности его получения, структура, свойства, маркировка и область применения.
12. Назовите марки антифрикционных чугунов, их применение.

## Глава 5. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Неметаллические материалы (полимеры, эластомеры, резины, стекло, ткань и др.) в качестве конструкционных материалов служат важным дополнением к металлам, в некоторых случаях с успехом заменяют их, а иногда сами являются незаменимыми. Достоинством неметаллических материалов является сочетание требуемого уровня химических, физических и механических свойств с низкой стоимостью и высокой технологичностью при изготовлении изделий сложной конфигурации. В связи с этим непрерывно возрастает использование неметаллических материалов в машиностроении, автомобилестроении и других отраслях.

### 5.1. Полимеры

#### 5.1.1. Состав и строение полимеров

В основе неметаллических материалов лежат полимеры. **Полимерами** называются высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных низкомолекулярных звеньев (мономеров) одинакового строения. Полимер представляет собой громадную макромолекулу и имеет большой молекулярный вес (от 6000 до миллиона единиц). Макромолекула полимера состоит из множества молекул мономера. Отдельные атомы в мономерах соединены между собой прочными ковалентными химическими связями.

Различают *природные* и *синтетические* полимеры. К полимерам, встречающимся в природе, относятся натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, шерсть и т.д. Однако ведущее место занимают синтетические полимеры, получаемые в процессе химического синтеза из низкомолекулярных соединений двумя способами: полимеризацией или поликонденсацией. **Полимеризация** – это химический процесс многократного соединения мономеров одного состава в макромолекулу, т.е. *состав полимера не отличается от состава мономера*. **Поликонденсация** – процесс образования полимеров из мономеров, когда не все атомы мономера входят в состав макромолекулы полимера. Объединение молекул мономеров при образовании макромолекулы идет с отщеплением отдельных атомов или групп атомов мономера. Эти отщепленные атомы образуют побочные продукты (вода, аммиак,  $\text{CO}_2$ , спирт, смолы и т.п.). Следовательно, при поликонденсации *состав полимера отличается от состава мономера*.

В зависимости от химического состава атомов, входящих в состав мономера (звена), полимеры делятся на органические, неорганические и элементоорганические.

**Органические полимеры** содержат обязательно углерод, водород, а также кислород, азот, фосфор и серу. Примером таких полимеров могут служить искусственный каучук и смолы. Они обладают достаточно высокой прочностью, эластичностью и гибкостью, но у них низкая теплостойкость.

**Неорганические полимеры** – это полимеры, у которых в составе главной цепи находится кремний, алюминий, железо и другие элементы. Это силикатные стекла, керамика, слюда, асбест. Неорганические полимеры имеют более высокую прочность, твердость и теплостойкость, но пониженную хрупкость и плохо переносят динамические нагрузки.

**Элементоорганические соединения** содержат в составе основной цепи неорганические атомы кремния, титана, алюминия и других элементов, которые сочетаются с органическими радикалами (*метильной, этильной группы и т.п.*). Органические радикалы придают полимеру эластичность и гибкость, а неорганические – твердость, прочность и теплостойкость. В природе таких соединений нет. Получают их искусственным способом, т.е. путем введения в органические полимеры атомов неорганических веществ: кремния, алюминия, железа и др.

Своеобразие свойств полимеров обусловлено их структурой. По строению макромолекулы различают следующие типы полимерных структур (рис. 5.1): линейную; линейно-разветвленную; лестничную; пространственно-сетчатую.

**Линейные полимеры** – это длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки, обладают высокой гибкостью (рис. 5.1, а), электростатичностью. Гибкость – основное свойство полимерных цепей, приводящее к качественно новым свойствам: высокой эластичности и отсутствию хрупкости в твердом состоянии.

**Линейно-разветвленные полимеры** имеют боковые ответвления от главной цепи (рис. 5.1, б). Эти полимеры по свойствам близки к линейным, но наличие боковых ответвлений затрудняет взаимное перемещение цепей и тем самым снижает их гибкость и эластичность. К типичным полимерам с линейной структурой относится полиэтилен, с линейно-разветвленной – полизобутилен и полипропилен.

**Лестничные полимеры** состоят из двух цепей, соединенных химическими связями (рис. 5.1, в). Полимеры с лестничной структу-

рой, к которым относятся, например, кремнийорганические полимеры, характеризуются повышенной термостойкостью, жесткостью, они нерастворимы в органических растворителях.

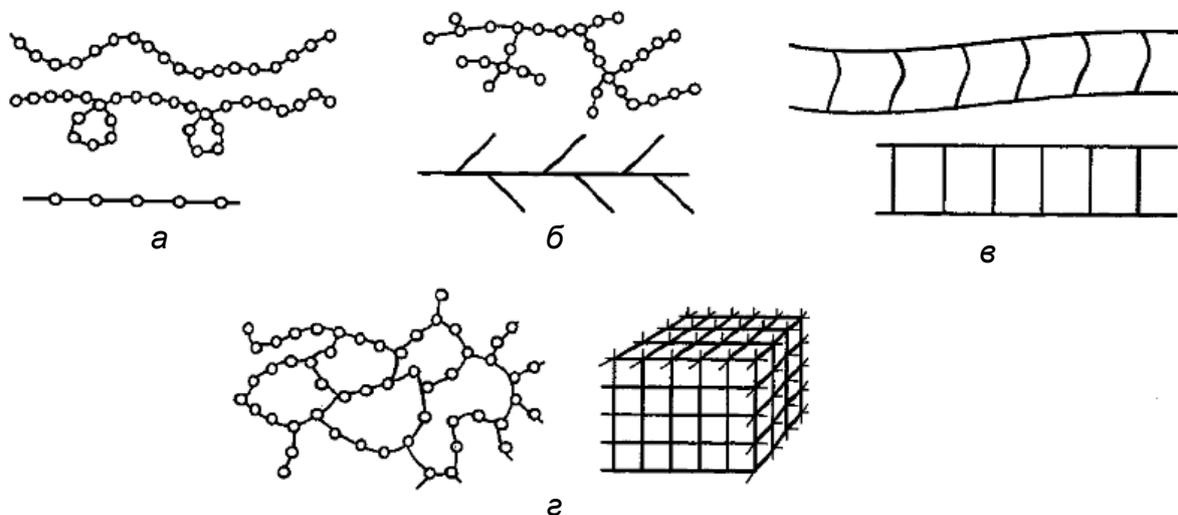


Рис. 5.1. Различные типы структур полимеров: а – линейная; б – линейно-разветвлённая; в – лестничная; г – пространственно-сетчатая

**Пространственно-сетчатые** полимеры (рис. 5.1, г) образуют при соединении макромолекул между собой в поперечном направлении прочные химические связи. В результате такого соединения макромолекул образуется сетчатая структура с различной плотностью сетки или пространственная сетчатая структура. Такие полимеры обладают повышенной прочностью, пониженной пластичностью, иногда хрупкостью, повышенной термостойкостью, влаго- и химостойкостью. Полимеры с пространственной структурой являются основой конструктивных неметаллических материалов.

В зависимости от того, как ведут себя полимеры при нагреве, их подразделяют на термопластичные и термореактивные.

**Термопластичные полимеры** имеют линейную или линейно-разветвленную структуру. Они при нагреве размягчаются, а при последующем охлаждении затвердевают. Процесс этот обратимый. Они обладают низкой термостойкостью (до 60–70°C), пониженной прочностью и хорошей пластичностью. К термопластичным полимерам относятся полиэтилен, полистирол, полиамид и др. Изделия из термопластичных полимеров изготавливают литьем под давлением в водоохлаждаемые формы, прессованием, экструзией, выдуванием и другими способами.

**Термореактивные полимеры** имеют исходную линейную структуру и плавно размягчаются при нагреве до определенной тем-

пературы, при которой под действием химических реакций твердеют, приобретая пространственную структуру. При этом происходят необратимые структурные изменения, т.е. повторный нагрев не приводит к размягчению. Это характерно для густосетчатых полимеров. Термоактивные полимеры обладают высокой твердостью и прочностью до высоких температур (300–400°C), и при этом они остаются хрупкими. К термоактивным полимерам относятся фенолформальдегидная, кремнийорганическая, эпоксидная и другие смолы.

### **5.1.2. Основные свойства полимеров**

Полимеры могут находиться в твердом, жидком состояниях (газообразное состояние для них нехарактерно), кристаллическом и аморфном фазовых состояниях, а также в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем деформационных физических состояниях.

Аморфными и кристаллическими полимеры бывают в зависимости от характера расположения макромолекул в пространстве. *Аморфные полимеры* характеризуются хаотичным расположением макромолекул в пространстве, они *изотропны*. *Кристаллические полимеры* характеризуются упорядоченным расположением макромолекул в пространстве и напоминают кристаллическое строение металлов.

Обычно полимеры имеют смешанное строение, например, в аморфном полимере встречаются участки и с кристаллическим строением, причем четкой границы раздела между ними нет, т.е. переход от аморфного состояния к кристаллическому происходит плавно. Максимальная степень кристалличности в полимерах может достигать 90%. Меняя содержание кристаллической фазы в аморфном полимере, мы можем менять и свойства полимеров в нужном направлении.

Полимеры имеют высокую стойкость в таких средах, как щелочи и концентрированные кислоты. В отличие от металлов они не подвержены электрохимической коррозии. С увеличением молекулярной массы снижается растворимость полимеров в растворителях органического происхождения. Полимеры с пространственной структурой практически не подвержены действию органических растворителей.

Большинство полимеров – диэлектрики и в основном относятся к немагнитным веществам. Из всех применяемых конструкционных материалов полимеры имеют наименьшую теплопроводность и наибольшие теплоемкость и тепловую усадку.

Для полимеров характерен широкий диапазон механических характеристик, сильно зависящих от их структуры. Кроме структурных

параметров большое влияние на механические свойства полимеров оказывают внешние факторы: температура, длительность и частота или скорость нагружения, давление, вид напряженного состояния, характер окружающей среды и др.

Особенностями механических свойств полимеров являются их удовлетворительная прочность, но малая жесткость по сравнению с металлическими материалами.

Характеристики основных полимеров представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

## Свойства основных полимеров

Полимер	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$E$ при 20°С, ГПа	$\sigma_B$ , МПа	$K_{1c}$ при 20°С, МПа м <sup>1/2</sup>	$\varepsilon$ , %	$t_c$ °С
<i>Термопластичные полимеры</i>						
Полиэтилен низкой плотности	0,92	0,15–0,24	7–17	1–2	90–800	0
Полиэтилен высокой плотности	0,96	0,55–1	20–37	2–5	15–100	30
Поливинилхлорид	1,39	2,4–3	40–60	2,4	2–30	80
Полипропилен	0,9	1,2–1,7	50–70	3,5	10–700	–20
Полистирол	1,06	3–3,3	35–68	2	1–2	100
Полиамид	1,14	2–3,5	60–110	3–5	60	70
<i>Терморезистивные полимеры</i>						
Фенолформальдегидная смола	1,4	8	35–55	–	0	
Полиэстер	–	1,3–4,5	45–85	0,5	0	70
Эпоксидная смола	1,6	2,1–5,5	40–85	0,6–1	0	80

**Примечание.**  $\gamma$  – плотность;  $E$  – модуль упругости;  $\sigma_B$  – временное сопротивление;  $K_{1c}$  – вязкость разрушения;  $\varepsilon$  – полное удлинение;  $t_c$  – температура стеклования.

Все полимеры в большей или меньшей степени подвержены процессу старения во времени. *Старением* полимеров называют самопроизвольное необратимое изменение важнейших технических характеристик, происходящее в результате сложных химических и физических процессов, развивающихся в материале при эксплуатации и хранении.

Старению способствует свет, частая смена циклов нагрев – охлаждение, воздействие кислорода, озона и другие факторы. Старение ускоряется при многократных деформациях, менее существенное влияние на старение оказывает влага. При старении повышается твер-

дость, хрупкость, теряется эластичность. При высоких температурах (200–250°C) происходит термическая деструкция – разложение органических полимеров, сопровождающееся испарением летучих веществ.

Для замедленного старения в полимерные материалы добавляются стабилизаторы двух типов: термостабилизаторы (амины, фенолы) и светостабилизаторы (например, сажа).

Длительность эксплуатации стабилизированных полимеров значительно возрастает (рис. 5.2). Срок наступления хрупкости полиэтилена, стабилизированного сажей, составляет свыше 5 лет. Изделия из поливинилхлорида могут работать 1–25 лет.

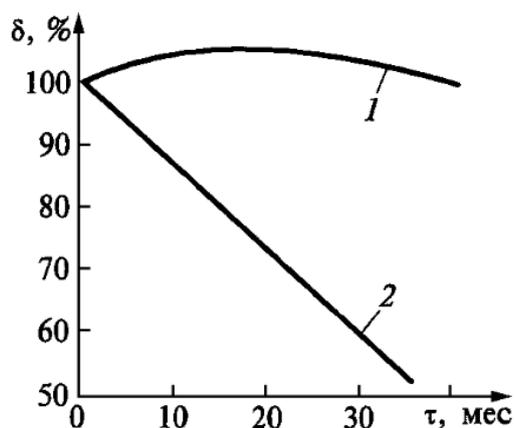


Рис. 5.2. Влияние длительности атмосферного старения на относительное удлинение поливинилхлоридного пластика (исходное удлинение принято за 100 %): 1 – стабилизированное состояние; 2 – нестабилизированное состояние

*Основные достоинства полимерных конструкционных материалов:*

- высокая удельная прочность (отношение прочности к плотности);
- износостойкость;
- устойчивость к химическим воздействиям;
- хорошие диэлектрические характеристики;
- свойства полимерных материалов можно варьировать в широких пределах модификацией полимеров или совмещением их с различными ингредиентами. В частности, при введении в полимеры соответствующих наполнителей можно получать фрикционные и антифрикционные материалы, а также материалы с токопроводящими, магнитными и другими специальными свойствами.

*К недостаткам полимерных материалов относятся:*

- склонность к старению;
- склонность к деформированию под нагрузкой (ползучесть);

- зависимость прочностных характеристик от режимов нагружения (температура, время);
- сравнительно невысокая теплостойкость;
- относительно большой температурный коэффициент линейного расширения;
- изменение размеров при воздействии на материал влаги или агрессивных сред.

## 5.2. Пластмассы

Для получения материалов с заданными свойствами в технике часто используют не сами полимеры, а их сочетания с другими материалами как органического, так и неорганического происхождения (пластмассы, металлопласты, стеклопласты и др.).

### 5.2.1. Общая характеристика пластмасс

**Пластмассы** – это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров. Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, составляющих их основу. Пластмассы состоят из нескольких компонентов: *связующего вещества, наполнителя, пластификаторов* и др.

*Связующее вещество* является обязательным компонентом. Это различные смолы.

*Наполнители* – специальные вещества, которые вводятся для придания требуемых физико-механических свойств.

Наполнители бывают двух видов:

а) *органические наполнители* – это древесная мука, бумага, опилки, хлопок, различные хлопчатобумажные ткани и т.п. Назначение – повысить пластичность;

б) *минеральные наполнители* – кварцевая мука, асбест, тальк, каолин, цемент, стекловолокно, стеклоткани, металлическая фольга, ткани и т.п. Назначение – повысить твердость, прочность, теплостойкость, влаго- и химостойкость.

*Пластификаторы* – нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Придают твердым полимерам мягкость, гибкость, пластичность. Пластификаторами являются: камфара, стеарин, крезол-фосфат и др.). Пластификаторы должны оставаться стабильными в условиях эксплуатации.

В состав пластмасс могут также входить *стабилизаторы, отвердители, красители и другие вещества.*

*Стабилизаторы* вводят для повышения долговечности и увеличения стойкости пластмасс к действию света. Светостабилизаторы предотвращают фотоокисление.

*Отвердители* изменяют структуру полимеров, влияя на свойства пластмасс.

*Красители* придают пластмассам нужный цвет. Их вводят в небольшом количестве, около 1%.

*Смазывающие вещества* вводят для повышения антифрикционных свойств и предотвращения прилипания пластмасс к прессформам при переработке их в изделия методом деформации.

*Ингибиторы* замедляют процесс отвердевания при полимеризации, особенно термореактивных пластмасс.

*Органические яды* – для предохранения пластмасс от образования плесени и поедания насекомыми.

*Инициаторы (активизаторы)* необходимы для ускорения процесса полимеризации;

*Противостарители* – для замедления процессов старения.

Для пластмасс характерны следующие свойства:

– *низкая плотность* (обычно 1–1,8 г/см<sup>3</sup>, в некоторых случаях 0,02–0,04 г/см<sup>3</sup>);

– *высокая коррозионная стойкость*;

– *высокие диэлектрические свойства*;

– *хорошая окрашиваемость* в любые цвета;

– *механические свойства широкого диапазона.* В зависимости от природы выбранных полимеров и наполнителей пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими;

– *антифрикционные свойства.* Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов (оловянных бронз, баббитов и др.);

– *высокие теплоизоляционные свойства.* Все пластмассы, как правило, плохо проводят теплоту, а теплопроводность таких теплоизоляторов, как пено- и поропласты, почти в 10 раз меньше, чем у обычных пластмасс;

– *хорошие технологические свойства.*

*Недостатком* пластмасс является их невысокая теплостойкость (100–120°C). В настоящее время верхний температурный предел для некоторых пластмасс поднялся до 300–400°C. Пластмассы могут рабо-

тать при умеренно низких температурах (до  $-70^{\circ}\text{C}$ ), а в отдельных случаях – при криогенных температурах. Недостатками пластмасс также являются их *низкая твердость, склонность к старению, ползучесть, нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам.*

По характеру связующего вещества пластмассы подразделяют на *термопластичные*, получаемые на основе термопластичных полимеров, и терморезистивные, т.е. неразмывающиеся.

### **5.2.2. Термопластичные пластмассы**

Широкое применение находят термопластичные пластмассы (термопласты) на основе полиэтилена, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида, фторопластов, полиамидов и других полимеров (табл. 5.2). *Все они имеют линейную структуру молекул.* Большинство термопластичных смол обладает высокой ударной вязкостью, водостойкостью и хорошими диэлектрическими свойствами и в то же время низкой теплостойкостью и значительной хладотекучестью. Многие из термопластичных пластмасс могут быть использованы при температуре не выше  $60-80^{\circ}\text{C}$  (рис. 5.3). Для некоторых из этих пластмасс температура использования может достигать  $150-160$  и даже  $260^{\circ}\text{C}$ , как показано на рис. 5.3. Термопласты (особенно фторопласты) подвержены значительному изменению линейных размеров и объема с изменением температуры. Детали, изготовленные из термопластичных масс, поддаются сварке.

**Полиэтилен** – продукт полимеризации, открыт в 1936 г. По строению полиэтилен – линейный термопластичный полимер. По способу получения и плотности различают два вида полиэтилена:

- полиэтилен высокого давления (ПЭВД), с низкой плотностью ( $0,918-0,930 \text{ г/см}^3$ ) и содержащий 55–65% кристаллической фазы;
- полиэтилен низкого давления (ПЭНД) с высокой плотностью ( $0,94-0,97 \text{ г/см}^3$ ), содержащий 75–95% кристаллической фазы.

*Свойства полиэтилена:*

- высокая упругость, гибкость, эластичность;
- высокая влагостойкость и химическая стойкость в щелочах и кислотах;
- высокие диэлектрические свойства;
- невысокая теплостойкость (до  $60-100^{\circ}\text{C}$ ), морозостойкость до  $-70^{\circ}\text{C}$ ;
- прозрачность к ультрафиолетовому излучению.

Области применения некоторых термопластов в машиностроении

Термопласт	Диапазон рабочих температур, °С	Область применения
Полиэтилен низкой плотности	-70...+70	Ненагруженные детали машин и оборудования, покрытия
Полиэтилен высокой плотности	-70...+80	То же
Полипропилен	-20...+130	Детали автомобилей, корпуса аккумуляторов, фильтры масляных и воздушных систем
Полистирол	-40...+65	Электроизоляция, пенящиеся изоляционные материалы (стиропиан)
Поливинилхлорид	-40...+70	Детали машин, элементы насосов, профили, химическое оборудование
Полиамид	-60...+100	Детали машин, канаты, шнуры
Полиметилметакрилат (стекло органическое)	-60...+100	Остекление в самолетостроении, на наземном и водном транспорте, детали освещения
Поликарбонаты	-100...+135	Точные детали машин и аппаратуры
Политетрафторэтилен (тефлон)	-269...260	Машиностроительная, химическая, электротехническая промышленность, криогенная техника

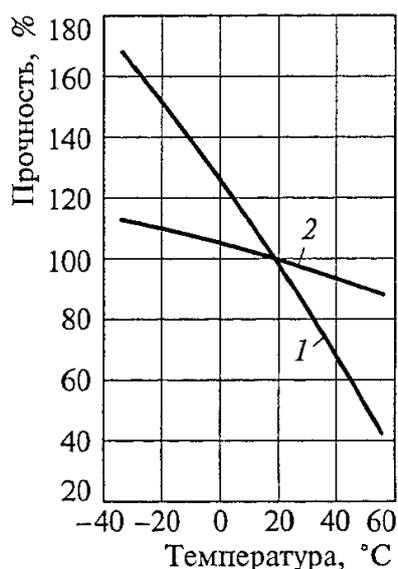


Рис. 5.3. Зависимость прочности пластмассы от температуры:  
1 – термопласты; 2 – реактопласты

Чем выше плотность полиэтилена и доля кристаллической фазы, тем выше прочность, теплостойкость и морозостойчивость.

*Недостатком* полиэтилена является его подверженность старению. Для уменьшения склонности полиэтилена к старению обычно добавляют сажу (2–3%), которая поглощает солнечные лучи и резко замедляет старение (до 30 раз).

Полиэтилен *применяют как конструкционный материал* для изготовления несилowych деталей (вентили, болты, шестерни, втулки и т.п.), защитных плёнок для предохранения металлов от коррозии и влаги, аккумуляторных баков, ёмкостей для хранения химикатов, а также как электроизоляционный материал.

**Полипропилен** является полимером пропилена. Он содержит 55...65% кристаллической фазы, а остальное – аморфная фаза. По сравнению с полиэтиленом полипропилен имеет более высокую механическую прочность и жесткость, большую теплостойкость и меньшую склонность к старению. *Недостатком* полипропилена является его невысокая морозостойкость ( $-20^{\circ}\text{C}$ ).

Полипропилен легко подвергается механической обработке на токарных, фрезерных, сверлильных станках.

*Применение:* для изготовления антикоррозионной футеровки резервуаров, труб и арматуры трубопроводов, электроизоляционных деталей, деталей, применяемых при работе в агрессивных средах. Из полипропилена изготавливают корпусные детали автомобилей и корпуса аккумуляторов, корпуса воздушных фильтров, конденсаторы, вставки демпфирующих глушителей, зубчатые и червячные колеса, ролики, подшипники скольжения, фильтры масляных и воздушных систем, уплотнения, детали кулачковых механизмов, изоляцию проводов и кабелей.

**Полистирол.** Продукт полимеризации стирола. Это – твёрдый, аморфный, прозрачный термопластичный полимер линейного строения.

*Свойства:* на 90% пропускает свет, хорошо окрашивается в различные цвета и хорошо обрабатывается резцом, но обладает повышенной хрупкостью и склонностью к старению, невысокая теплостойкость (до  $80^{\circ}\text{C}$ ).

*Применение:* для изготовления деталей сигнализации, подфарников автомобилей и задних фонарей.

**Ударопрочный полистирол** – сополимер стирола с синтетическим каучуком (10–15%).

*Свойства:* превосходит полистирол по ударной вязкости в 3–5 раз, а по относительному удлинению – в 10 раз, повышенная стойкость к бензину и морской воде, пониженная теплостойкость и диэлектрические свойства.

*Применение:* используется как конструкционный материал (корпусы и ручки приборов, червячные колеса и т.п.), его используют для изготовления пористых материалов.

**Фторопласт-4 (Ф-4)**, другое название **тефлон** – продукт полимеризации тетрафторэтилена. Он содержит 60–75% кристаллической фазы.

*Свойства:* повышенная твёрдость, прочность; высокая теплостойкость (до 250°C); высокие электроизоляционные свойства, особенно на высоких и сверхвысоких частотах; высокая коррозионная и химическая стойкость в концентрированных кислотах и щелочах; высокая морозоустойчивость (до –269°C); высокие антифрикционные свойства, к сожалению, не всегда могут быть использованы, так как этот пластический материал неработоспособен при значительных удельных давлениях и линейных скоростях в подшипнике.

*Применение:* в машиностроении как конструкционный материал для изготовления деталей машин (вентили, насосы, мембраны, уплотнительные прокладки, сальники, клапаны) и антифрикционный материал (подшипники, втулки).

*Недостаток* – высокая стоимость.

**Фторопласт-3 (Ф-3)** – это термопластичный линейный полимер кристаллического строения.

*Свойства:* по диэлектрическим свойствам, химической стойкости и теплостойкости (70°C) фторопласт Ф-3 уступает Ф-4, обладает более высокой пластичностью, что облегчает переработку его в изделия методом деформации.

*Применение:* Ф-3 применяется как электроизоляционный материал при низких частотах, а также как конструкционный материал в виде труб, шлангов, клапанов, насосов, защитных покрытий металлов и др.

**Поливинилхлориды** – продукт полимеризации винилхлорида, линейный аморфный полимер.

*Свойства:* стойкость к химикатам, негорючесть, электроизоляционные свойства при низких частотах. Производится два вида пластмасс – винипласт (непластифицированный поливинилхлорид) и полихлорвиниловый (ПХВ)-пластикат, в состав которого дополнительно входят пластификаторы. Винипласт имеет высокую прочность и упругость. ПХВ-пластик – повышенную пластичность и гибкость.

**Недостатки:** низкая теплостойкость (60–70°C) и повышенная хрупкость ниже –10°C у винипласта, у ПВХ-пластика морозоустойчивость – до –50°C.

**Применение:** из винипласта изготавливают банки аккумуляторных батарей, прокладки, уплотнители, внутреннюю обшивку кузова. ПВХ используют для обивочных материалов (текстовинита, павинола) путем нанесения пленки на хлопчатобумажную ткань, изготовления трубок масло- и топливопроводов, профилей и других деталей, а также как упаковочно-прокладочный материал при хранении деталей автомобильных и авиационных двигателей.

**Полиамиды.** Это группа пластмасс широко используется в промышленности под названиями: *капрон, нейлон, лавсан*.

**Свойства:** антифрикционные свойства, прочность в волокнах – до 600 МПа, ударопрочность, повышенная стойкость к щелочам, бензину, способность к поглощению вибрационных нагрузок.

**Недостатки** – высокая гигроскопичность, особенно у капрона (поглощает до 12% влаги), и подверженность старению.

**Применение:** для изготовления подшипников, работающих без смазки, для антифрикционных покрытий металлов, в качестве электроизоляционного материала и конструкционного материала (зубчатые передачи, уплотнительные устройства, втулки, лопасти винтов, муфты, болты, гайки и др.), волокон для изготовления буксирных канатов.

**Полиуретаны** – наиболее ценные и широко производимые промышленностью термопласты.

**Свойства:** высокий модуль упругости, износостойкий, высокий коэффициент трения, стойкость к вибрациям, атмосферостойкий, а также стойкий к воздействию масла и бензина. Изделия из полиуретана можно эксплуатировать при понижении температуры до –70°C. Волокна из полиуретана малогигроскопичны и имеют высокую химическую стойкость. Их используют для изготовления изоляции, фильтровальных и парашютных тканей.

**Стекло органическое (плексиглас)** получают полимеризацией сложных эфиров метакриловой кислоты. Обычно применяют полиметилметакрилат. Этот термопласт оптически прозрачен (светопрозрачность до 92%), имеет низкую плотность, высокую атмосферостойкость, стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, углеводородного топлива и смазочных материалов. Его **недостаток** – низкая поверхностная твердость, потеря прозрачности при резких перепадах температур. Органическое стекло используют для остекления транспортных средств.

**Поликарбонат** – термопласт на основе дифенилопропана и фостена, выпускаемый под названием «*дифлон*». Поликарбонат характеризуется низкой водопроницаемостью и газопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами, высокой жесткостью, теплоустойчивостью и химической стойкостью. Стоек к световому старению и действию окислителей даже при нагреве до 120°C. Поликарбонат – один из наиболее ударопрочных термопластов, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала, заменяющего металлы. Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, корпуса, крышки, клапаны и другие детали, Его можно использовать в криогенной технике для работы в среде жидких газов.

Физико-механические свойства поликарбонатов улучшаются при введении в них армирующих волокон. Например, при введении в поликарбонат стекловолокна (до 30%) его модуль упругости при растяжении увеличивается в 3 раза, а твердость по Бринеллю – в 1,5 раза. Теплоустойчивость материала также увеличивается, а температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) снижается в 3 раза, усадка материала уменьшается в 2 раза. Армированные поликарбонаты типа эстеран нашли применение в производстве ответственных деталей машин, например подшипников качения, кулачков и т.д. Армированные поликарбонаты сохраняют свои свойства и эксплуатационную надежность в диапазоне температур –200...+110°C, а также в вакууме.

В России, кроме *стеклонаполненного поликарбоната*, хорошо зарекомендовали себя наполненные стекловолокном *полипропилен*, *полистирол* и другие термопласты. Термопласты, армированные стекловолокном, имеют более высокие механические свойства и обеспечивают неизменность формы изделий в условиях повышенных температур. Их применяют при изготовлении разнообразных деталей в электротехнической промышленности, оптическом и точном приборостроении, транспортном машиностроении и т.д.

В технике низких температур наибольшее применение находят термопласты на основе полиэтилена, полистирола, фторопластов, полиамидов и других полимеров.

### **5.2.3. Термореактивные пластмассы**

*Термореактивные пластмассы (реактопласты)* – это наполненные пластмассы, в которых в качестве связующего вещества используют термореактивные смолы: фенолформальдегидные, эпок-

сидные, кремнийорганические. В зависимости от вида наполнителя эти пластмассы делятся на: *порошковые, волокнистые и слоистые*.

### **1. Пластмассы с порошковым наполнителем – пресс-порошки.**

В качестве наполнителя применяют порошки: органические (древесная мука) или минеральные (молотый кварц, асбест, тальк, слюда, графит). К пластмассам с порошковыми наполнителями относятся **фенопласты** (ГОСТ 5689-79) и **аминопласты** (ГОСТ 9359-80).

*Свойства:* изотропность, удовлетворительные электроизоляционные свойства, невысокая механическая прочность ( $\sigma_b = 30\text{--}40$  МПа) и низкая ударная вязкость. Пластмассы с органическими наполнителями отличаются более высокой пластичностью, но пониженной тепло-, влаго- и химической стойкостью. При использовании минеральных наполнителей (молотого кварца) повышаются твёрдость, прочность, электроизоляционные свойства и влагостойкость.

*Применение:* в качестве конструкционного и электроизоляционного материала для несилowych деталей (рукоятки, детали приборов, кнопки и т.д.).

### **2. Пластмассы с волокнистым наполнителем – волокниты.**

Эти пластмассы анизотропны, в направлении волокон механические свойства значительно выше, чем у порошковых пластмасс, они определяются свойствами волокон и их размером. Реактопласты с волокнистыми наполнителями представляют собой композиции, состоящие из связующего вещества (*смолы*) и волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (*волокниты*), асбеста (*асбоволокниты*), стекловолкна (*стекловолокниты*).

**Хлопковые волокниты.** Наполнителем служит длинноволокнистый хлопок или целлюлоза.

*Свойства:* невысокая теплостойкость ( $120\text{--}150^\circ\text{C}$ ) и электроизоляционные свойства, повышенная ударная вязкость по сравнению с пресс-порошками.

*Применение:* стойки, фланцы, рукоятки, корпуса приборов, шкивы, маховики и другие детали, работающие при повышенных ударных нагрузках.

**Асбоволокниты.** Наполнитель – волокна минерала асбеста.

*Свойства:* повышенная теплостойкость до  $200^\circ\text{C}$  и высокие фрикционные свойства, но по водостойкости и диэлектрической прочности уступают пластмассам с порошковым наполнителем.

*Применение:* для изготовления деталей тормозных устройств (тормозные колодки, накладки, диски автомобиля и других машин), коллекторов электрических машин.

**Стекловолокниты.** Наполнитель – стекловолокно, которое получают из расплавленной стекломассы.

**Свойства:** чем длиннее волокно и меньше диаметр волокон, тем выше прочность. На практике используют стекловолокно диаметром от 5 до 20 мкм, и прочность при этом составляет соответственно от 3800 до 600 МПа. С увеличением толщины его показатели снижаются (рис. 5.4). Теплостойкость их высокая (до 300–350°C).

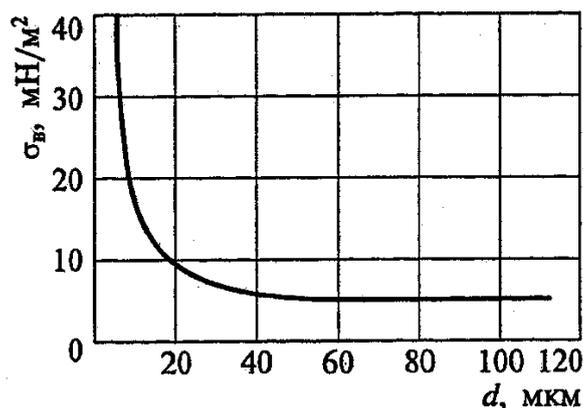


Рис. 5.4. Зависимость прочности  $\sigma_v$  стекловолокна от его диаметра  $d$

**Применение:** прессованные корпуса в машино- и приборостроении, а в последние годы – кузова автомобилей, спортивных лодок и судов. Стекловолокниты имеют высокие физико-механические характеристики и применяются для изготовления деталей высокого класса точности и сложной конфигурации.

**3. Слоистые пластмассы.** Наполнителем служат листы различных материалов, что определяет их слоистую структуру. По свойствам эти пластмассы анизотропны.

**Текстолит** изготавливают, используя в качестве наполнителя хлопчатобумажную ткань, которую пропитывают резольной смолой и опрессовывают в горячем состоянии. Помимо хороших диэлектрических свойств текстолит обладает высокой стойкостью к истиранию и механической прочностью ( $\sigma_v = 120\text{--}150$  МПа); последняя, однако, несколько снижается при повышении температуры (рис. 5.5). Поэтому из текстолита, кроме изоляционных деталей, приборов электрооборудования, изготавливают *шестерни и упорные шайбы распределительного вала, зубчатые колёса с малым износом и высокой виброустойчивостью, бесшумно работающие в паре со сталью шестерён, вкладыши подшипников скольжения*. Для снижения истираемости подшипников и повышения смазывающих свойств добавляют 5% графита.

та. Текстоликовые вкладыши подшипников служат в 10...12 раз дольше, чем бронзовые. Текстоликовые шестерни надежно работают в условиях постоянной циркуляции масла, исключая их перегрев и разрушение вследствие низкой теплопроводности текстолита. Теплостойкость текстолита низкая (до 100°C).

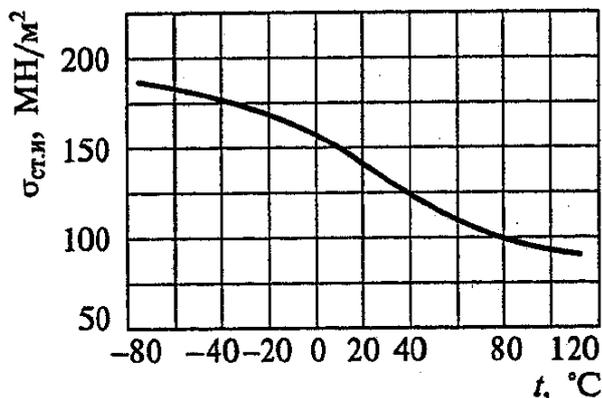


Рис. 5.5. Зависимость предела прочности текстолита при статическом изгибе  $\sigma_{ст.и}$  от температуры  $t$

**Асботекстолит** получают горячим прессованием асбестовой ткани, пропитанной резольной смолой. Иногда асбестовая ткань армируется медной проволокой для повышения прочности и теплопроводности. Асботекстолит обладает высокой теплостойкостью и хорошими фрикционными и теплоизоляционными свойствами. Может работать при 250–500°C в течение нескольких часов или кратковременно при температуре 700°C.

Он используется для изготовления тормозных накладок и накладок дисков сцепления. Асботекстолит не следует подвергать действию температуры свыше 370°C во избежание разрушения асбеста из-за потери им гигроскопической воды, а также следует избегать контакта его с водой и маслом, так как при этом снижается коэффициент трения. Если коэффициент трения сухого асботекстолита составляет 0,30–0,38, то при попадании масла он снижается до 0,05–0,07. Замасленные асботекстолитовые накладки промывают бензином.

**Стеклотекстолитами** называют слоистые пластики на основе тканых стекловолоконистых материалов. Стеклотекстолиты характеризуются высокой тепло- и хладостойкостью, стойкостью к действию окислителей и других химически активных реагентов, высокими механическими свойствами. Стеклотекстолиты применяют для изготовления крупногабаритных изделий, электроизоляционных деталей, длительное время работающих при температуре 200°C и кратковременно – при

250°C. Стеклопластики являются конструкционными материалами, применяемыми для изготовления силовых изделий в различных отраслях техники (несущие детали летательных аппаратов, кузова и кабины машин, железнодорожные вагоны, корпуса лодок, судов и т.п.).

В табл. 5.3 приведены свойства и области применения некоторых реактопластов.

Таблица 5.3

Свойства и область применения реактопластов в машиностроении

Вид пластмассы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность при растяжении, МПа	Диапазон рабочих температур, °С	Область применения
Фенопласт	1,7	30	–60...+140	Малонагруженные детали, корпуса приборов, панели, электроизоляционные детали
Аминопласт	1,8	80	–60...+130	Детали осветительной аппаратуры, электротехнические и электроизоляционные детали
Волокнит	1,6	50	–60...+200	Шкивы, маховики, втулки, диски, кожухи, детали с повышенными антифрикционными свойствами
Текстолит	1,3	95	–40...+160	Шестерни, втулки, подшипники скольжения, конструкционные и электроизоляционные детали
Асботекстолит	1,6	90	–60...+250	Тормозные и фрикционные устройства, лопатки ротационных бензонасосов, детали теплозащиты и теплоизоляции

**Древесно-слоистые пластики (ДСП).** Наполнителем служит древесный шпон (тонкие березовые или буковые листы, ленты).

*Свойства:* хорошие антифрикционные свойства, теплостойкость до 140°C, невысокая химическая стойкость, гигроскопичность (что приводит к разбуханию).

*Применение:* как конструкционный материал для изготовления шестерен, вкладышей подшипников скольжения, втулок (может заменять в некоторых случаях текстолит, баббит и даже бронзу).

#### **5.2.4. Газонаполненные пластмассы**

**Пенопласты** и **поропласты** изготавливают на основе термопластичных (полистирол, полиуретан, поливинилхлорид и др.) и терморезистивных (фенольных, эпоксидных) смол. Они относятся к газонаполненным пластмассам, т.е. к пластмассам с высоким (до 95 об. %) содержанием газовых или воздушных включений. Благодаря этому они отличаются малой плотностью, часто не превышающей 30...40 кг/м<sup>3</sup>, высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами. У пенопластов (ячеистых газонаполненных пластмасс) воздушные макро- и микроскопические ячейки не соединяются между собой, а у поропластов (пористых газонаполненных пластмасс) заполненные воздухом полости сообщаются между собой.

**Пенопласты** (например, пенополиуретан, обладающий высокой эластичностью) в настоящее время используют для изготовления автомобильных подушек и спинок, противоударных прокладок, подлокотников и подголовников. Жесткие пенопласты и поропласты используют для тепло- и звукоизоляции.

#### **5.2.5. Рекомендации по использованию пластмасс в машиностроении**

Работоспособность деталей в значительной степени зависит от старения пластмасс, сущность которого состоит в постепенном разрушении химических связей в главных цепях макромолекул. В зависимости от природы старения различают физическую и химическую деструкцию (разрушение связей в результате термических, механических и фотохимических воздействий). При длительной работе под нагрузкой пластмассы склонны к ползучести. Поэтому *для пластмасс такие понятия, как предел текучести, предел прочности, обычно используемые при расчетах конструкций, весьма условны. Здесь необходимо учитывать время, в течение которого деталь будет работать, и условия эксплуатации.*

Имеются некоторые правила, которых следует придерживаться при проектировании изделий из пластмасс. Прежде всего необходимо, чтобы *направление действия нагрузки совпадало с направлением волокон наполнителя и ориентацией макромолекул. Из пластмасс не рекомендуется изготавливать детали, подвергающиеся постоянным нагрузкам. Такие детали лучше работают в условиях кратковременного нагружения.*

При конкретном выборе пластмасс требуется определить температурный интервал эксплуатации и возможное влияние режима нагружения на технические характеристики материала.

Пластмассы не следует применять при необходимости соблюдения точных размеров в процессе эксплуатации. С учетом изложенных ограничений определяются и области применения пластмасс.

Ниже приведены виды деталей, узлов машин и технологической оснастки и пригодные для их изготовления полимерные материалы:

– **зубчатые и червячные колеса:** полиамиды, полипропилен, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты, волокниты, текстолит, древесные пластики;

– **шкивы, маховички, рукоятки, кнопки:** полиамиды, аминопласты, фенопласты, волокниты, текстолит, древесные пластики;

– **ролики, катки, бегуны:** полиамиды, поливинилхлорид, полипропилен, поликарбонаты, древесные пластики;

– **подшипники скольжения:** полиамиды, полиэтилен, полипропилен, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты, волокниты, текстолит, древесные пластики;

– **детали подшипников качения:** полиамиды, поликарбонаты, полиформальдегид;

– **тормозные колодки, накладки:** фенопласты, волокниты, древесные пластики;

– **трубы, детали арматуры, фильтры масляных и водных систем:** полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, поликарбонаты, стеклопластики;

– **рабочие органы вентиляторов, насосов и гидромашин:** полиамиды, полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, пентапласты, поликарбонаты, стеклопластики;

– **уплотнения:** полиамиды, полиэтилен, фторопласты, поливинилхлорид, полипропилен;

– **кожухи, корпуса, крышки, резервуары:** полиэтилен, аминопласты, поливинилхлорид, полипропилен, полистирол, полиакрилаты, поликарбонаты, фенопласты, стеклопластики;

– **болты, гайки, шайбы:** полиамиды, полиэтилен, аминопласты, поливинилхлорид, полипропилен, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты, волокниты;

– **пружины, рессоры, кулачковые механизмы, клапаны:** полиамиды, поливинилхлорид, полипропилен, поликарбонаты, полиформальдегид, текстолит, стеклопластики;

– **крупногабаритные элементы конструкций, емкости, лотки и др.:** полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол, стеклопластики;

– **электроизоляционные детали, панели, щитки, корпуса приборов:** полиамиды, полиэтилен, фторопласты, аминопласты, поливинилхлорид, полипропилен, полистирол, полиакрилаты, эпоксипласты, пентапласты, поликарбонаты, полиформальдегид, фенопласты, волокниты, текстолит, древесные пластики, стеклопластики;

– **светопропускающие оптические детали (линзы, смотровые стекла и др.):** полиэтилен, аминопласты, полипропилен, полистирол, полиакрилаты, поликарбонаты;

– **копиры, контрольные шаблоны:** полиэтилен, поливинилхлорид, полипропилен, эпоксипласты.

Как показывает мировой опыт [5], в ряде тяжело нагруженных узлов дорожно-строительных машин альтернативы использованию деталей из полимеров нет. Это относится, например, к применению в конструкции балансирного узла дорожной машины «Caterpillar-16G» и автогрейдера ДЗ-140А втулок и шайб из полимеров. Опыт лабораторной отработки балансирного узла в натурных испытаниях автогрейдера ДЗ-140А подтвердил правильность принятых конструктивных решений и перспективность использования полимеров в узлах трения дорожных машин [5, 6].

Пример применения полимерных материалов в строительном и автомобильном машиностроении показан на рис. 5.6, 5.7.



Рис. 5.6. Основные области применения полимерных материалов при производстве дорожно-строительных машин

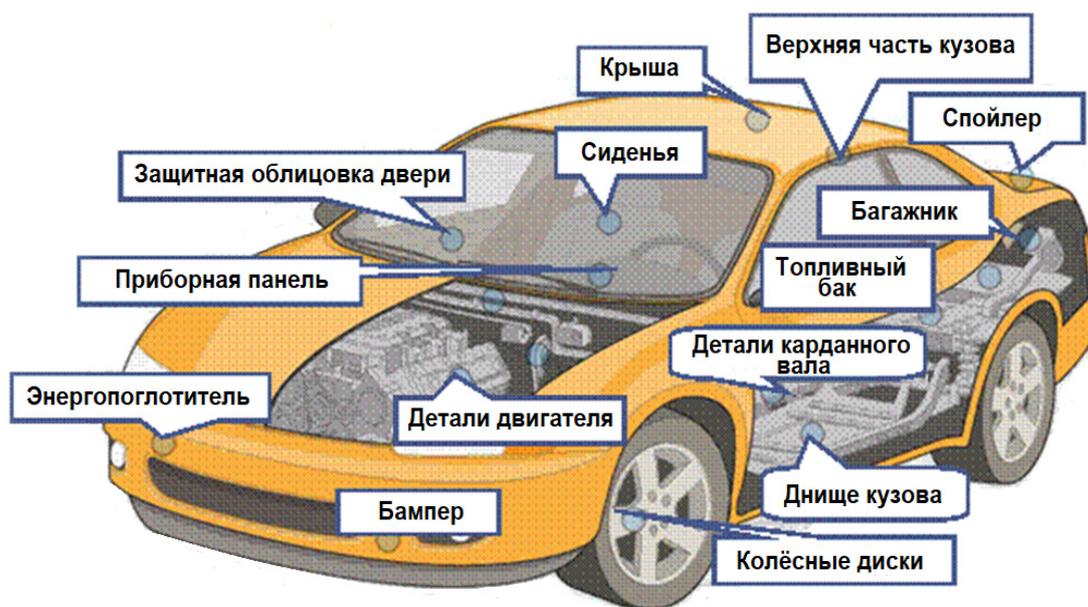


Рис. 5.7. Детали автомобилей, производимые из полимерных материалов

### 5.3. Эластомеры

**Эластомеры** – это полимеры и материалы на их основе, обладающие высокоэластическими свойствами в широком интервале температур, охватывающем практически всю область температур их эксплуатации. Повышенная эластичность таких полимеров обусловлена тем, что они состоят из больших цепных молекул, способных обратимо изменять свою форму под действием внешних нагрузок. Основу цепных молекул эластомеров могут составлять атомы углерода, кислорода, кремния или серы. К типичным эластомерам относятся натуральный и синтетический каучук, а также различные виды резин.

**Вулколлан** относится к классу сложных полимеров, разработан немецким концерном Байер. Вулколлан – материал по своей упругости похож на резину, в классической форме – это полиуретановый эластомер со специальными добавками. Производство продукта осуществляется при помощи горячей штамповки материала. Благодаря исключительным свойствам вулколлан зарекомендовал себя в качестве совершенно незаменимого особо прочного материала, который используется в покрытии валиков, платформ, различных уплотнений и прокладок. Вулколлан обладает долговечностью, износостойкостью и повышенной устойчивостью к трещинам и растворителям, клеям, бензинам, минеральным маслам, лакам и жирам. *Вулколлан может быть ячеистым и массивным.*

**Ячеистый вулколлан.** Ячеистый и массивный вулколлан производится методом литья. В качестве порообразователя применяется вода. Ячеистый вулколлан является дополнением массивного материала вулколлан в тех случаях, когда требуются более высокая деформируемость и более низкая жесткость при сжатии, т.е. вулколлан имеет низкую остаточную деформацию при сжатии. Следовательно, для практического применения наиболее важными свойствами являются, главным образом, характеристики материала при деформации сжатия. Этот многоцелевой материал уже длительное время применяется в промышленности для дополнительных упругих элементов, а также для амортизации вибраций. Используется в дорожно-транспортном машиностроении для снегоуборочных отвалов.

*Основные преимущества ячеистого вулколлана:*

- способность выдерживать большие динамические нагрузки (даже при тестах на длительную нагрузку с 5 млн циклов нагружения остаточная деформация очень небольшая);
- небольшое водопоглощение (обеспечивает исправную работу при воздействии различных атмосферных факторов);
- незначительная зависимость свойств от температуры эксплуатации (от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ );
- высокий модуль объемного сжатия;
- небольшое удлинение в поперечном направлении;
- прогрессивная характеристика зависимости деформации от давления;
- малая остаточная деформация при сжатии.

**Массивный вулколлан** обеспечивает уменьшение износа и оптимизацию производственного процесса за счет применения деталей, выдерживающих большие динамические нагрузки.

*Основные преимущества массивного вулколлана:*

- способность выдерживать большие динамические нагрузки;
- большое сопротивление надрыву;
- хорошая стойкость к действию УФ-излучения, озона, жиров и масел;
- незначительная зависимость свойств от температуры;
- высокая износостойкость;
- небольшая остаточная деформация;
- высокая эластичность по отскоку.

### ***Технические характеристики вулколлана***

Ячеистый вулколлан отличается не только очень низким коэффициентом набухания, его пенообразная структура является также прекрасным хранилищем смазочного материала. Допуски размеров отверстий или рычажных систем могут иметь большее значение, так как они компенсируются благодаря высокой эластичности и модулю объемного сжатия ячеистого материала вулколлан.

Превосходное сочетание свойств ячеистого материала вулколлан, как например, низкая остаточная деформация при сжатии, хорошая устойчивость к действию смазочных материалов и высокая механическая прочность, обеспечивает решение самых разных проблем уплотнения.

Низкий коэффициент деформации при постоянном сдавливании, высокая прессуемость и поглощение жиров и масел являются необходимыми характеристиками для материала, из которого изготавливаются самосмазывающиеся уплотнительные кольца, прокладки и маслосъёмные скребки.

В отличие от прочих материалов вулколлан не содержит пластификаторы и поэтому его характеристики не изменяются при взаимодействии с растворителями различного типа. Характеристики вулколлана остаются постоянными и вполне предсказуемыми.

Вулколлан термически устойчив – его кривые деформации при сдавливании остаются практически постоянными в большом температурном интервале и совсем немного отличаются при температурах от 0 до 80°C.

### ***Применения вулколлана***

– *Соединительные элементы.* Вулколлан отличается большим коэффициентом упругости и высокой износостойкостью. Благодаря низкой амортизации материал почти не нагревается.

– *Уплотнительные кольца, прокладки и маслосъёмные скребки.*

– *Уплотнения для самых разнообразных подшипников* обеспечивают надежную работу многих машин. В тяжелых условиях эксплуатации сельскохозяйственной и строительной техники важное значение имеют большие уплотняющие поверхности и деформируемость уплотняющих элементов. Ячеистый вулколлан удовлетворяет этим требованиям: благодаря своей ячеистой структуре он имеет гораздо большую поверхность, чем более компактные материалы, большой модуль объемного сжатия обеспечивает возможность сильной деформации шарнирных подшипников. Большая деформация и динами-

ческие нагрузки требуют от уплотняющих элементов остаточного упругого натяжения. Очень низкая остаточная деформация при сжатии ячеистого материала обеспечивает длительный срок службы.

– *Для самосмазывающихся узлов* обязательным требованием является, наряду с высокой стойкостью к действию жиров и масел, также наличие запаса смазочного материала. Пенообразная структура ячеистого вулколлана является прекрасным хранилищем смазочного материала.

– *Покрытие роликов.* Ролики, предназначенные для экстремальных нагрузок, нуждаются в эластичном покрытии, обладающем самыми высокими механическими и динамическими свойствами. Изменения направления езды требуют материалов с высокой механической прочностью без остаточной деформации. Большое удельное давление и шероховатые поверхности площадок дополнительно усиливают нагрузки для покрытия колес.

– *Мембраны насосов и переключателей.* Насосы для подачи абразивных сред должны выдерживать экстремальные нагрузки, например, при подаче раствора и цементной пульпы в строительстве. Благодаря своим специфическим свойствам материал вулколлан прекрасно подходит для таких случаев применения.

– *Элементы муфты сцепления.* Упругие муфты одновременно должны служить приводом и демпфирующим звеном. Их задача заключается в безвибрационной передаче приводной энергии от силового агрегата к машине. Решающим преимуществом материала вулколлан при этом применении является его большой модуль упругости, позволяющий передать крутящий момент без усиления.

Элементы муфт сцепления из материала вулколлан отличаются масло- и износостойкостью, а также длительным сроком службы.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Дайте определение полимеров. Разновидности полимеров, их строение и свойства.

2. Какими свойствами обладают пластмассы и в чем их недостатки?

3. Термопластичные, терморезистивные, аморфные и кристаллические пластмассы. Их структура и свойства.

4. Что такое пластмассы? Их свойства, состав и назначение входящих компонентов.

5. От чего зависит работоспособность пластмасс? Каких правил придерживаются при проектировании изделий из пластмасс?

6. Какие свойства пластмасс оценивают для определения условий их применения? Дать их характеристику.

7. Термопластичные пластмассы. Какое строение, свойства и применение имеют полиэтилен, полипропилен, полистирол, ударопрочный полистирол?

8. Термопластичные пластмассы. Какое строение, свойства и применение имеют фторопласт-4, фторопласт-3, полиамиды, органическое стекло?

9. Дайте определение терморезистивных пластмасс, укажите их разновидности от вида наполнителя. Опишите пластмассы с порошковым наполнителем, их свойства и применения.

10. Какое строение, свойства и применение имеют пластмассы с волокнистым наполнителем (волокниты)?

11. Какое строение, свойства и применение имеют слоистые пластмассы?

12. Газонаполненные пластмассы – дать описание пенопластам, поропластам, сотопластам.

13. Что такое вулколлан? Виды вулколлана, основные преимущества и применение.

## Глава 6. ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 6.1. Общие сведения

*Порошковыми называют материалы, изготавливаемые путем прессования металлических порошков в изделия необходимой формы и размеров и последующего спекания сформированных изделий в вакууме или защитной атмосфере при температуре 0,75–0,85 от температуры плавления основного компонента.*

Методы порошковой металлургии (ПМ) позволяют создавать принципиально новые материалы, которые сложно или даже невозможно получить другими способами: многослойные композиции, различные комбинации металлических и неметаллических компонентов, пористые материалы с широким диапазоном контролируемой пористости, изделия из тугоплавких металлов и т.д.

Сегодня из них изготавливаются конструкционные элементы машин и механизмов, металлорежущий и породоразрушающий инструмент, подшипники и прочие компоненты узлов трения, детали электротехнического оборудования и оснащения атомных реакторов, магниты, охладители испарительного типа, множество других незаменимых изделий промышленного назначения.

Основным сырьем порошковой металлургии являются порошки чистых металлов и сплавов, а также порошки некоторых неметаллических элементов и соединений, в которые добавляются пластификаторы для сохранения формы прессовок и смазки для более равномерного уплотнения.

Различают пористые и компактные порошковые материалы.

Пористыми называют материалы, в которых после окончательной обработки сохраняется > 10–30% остаточной пористости. Компактные материалы имеют пористость 1–3%.

#### ***Преимущества порошковой металлургии:***

- возможность создавать принципиально новые материалы и изделия из них, которые невозможно получить традиционными методами (фильтры, пористые подшипники и т.д.);
- возможность изготавливать изделия различной формы, которые не требуют последующей механической обработки;
- возможность свести к минимуму отходы металла в стружку, упростить технологию изготовления деталей и снизить трудоёмкость их производства.

### **Недостатки порошковой металлургии:**

- многие металлокерамические материалы и детали имеют низкие механические свойства (пластичность, ударная вязкость);
- в ряде случаев стоимость металлических порошков выше стоимости литых металлов.

**Технологический процесс изготовления изделий из порошков** включает в себя получение порошков, подготовку шихты, формование, спекание, горячее прессование и штамповку.

Заготовки, полученные после прессования (формирования), как правило, обладают низкими механическими свойствами, а процесс спекания позволяет увеличить поверхность сцепления частиц, повысить плотность и прочность изделий и получить необходимые свойства.

В большинстве случаев спекание является завершающей операцией. В случае необходимости изделия могут быть подвергнуты механической, термической, химико-термической обработке, калибровке и обработке резанием, пропитке маслами, жидкими металлами, гальванической обработке и т.д.

Размеры частиц порошка обычно составляют от 0,1 мкм до 0,1 мм. Более крупные фракции называют *гранулами*, более мелкие – *пудрой*.

**Получение металлических порошков** осуществляют физико-механическими и химико-металлургическими способами.

В основе **физико-механических способов** получения порошков лежат методы механического измельчения металлов в твёрдом и жидком состояниях. К ним относятся:

- дробление и размол стружки в мельницах;
- распыление расплавленного металла струёй сжатого воздуха, газа или жидкости;
- грануляция при литье расплавленного металла в жидкость и др.

К **химико-металлургическим способам** относятся:

- способы восстановления металлов из оксидов;
- осаждение металлов из водных растворов солей;
- термическая диссоциация карбонильных соединений металлов.

При формовании заготовок прессованием из порошков определённого химического состава им придают форму и размеры готовых деталей, после чего направляют на спекание. При спекании непрочные прессованные заготовки превращаются в прочное спечённое изделие со свойствами, приближающимися к свойствам беспористого компактного материала.

Наиболее распространённым является метод прессования в пресс-формах. *При холодном прессовании* и последующем спекании

получают пористые изделия с пористостью 5–20%. *При горячем прессовании* порошков ( $t \geq t_{н.р.}$ ) получают изделия, практически не имеющие пористости и обладающие высокими прочностными и пластическими свойствами.

Температура спекания деталей из конструкционных порошковых материалов на основе железа с добавками графита, никеля и других компонентов составляет 1100–1200°C. Температура спекания изделий антифрикционного назначения на основе железа составляет 1000–1050°C, на основе бронзы – 850–950°C. Спекание проводят в течение 0,5–1,5 ч в нагревательных печах, как правило, в защитной атмосфере или в вакууме для предотвращения окисления частиц порошка. Для получения более высоких характеристик механических и эксплуатационных свойств материалов и повышения точности размеров после формования и спекания дополнительно производят горячее прессование, штамповку, прокатку.

В ряде случаев дополнительно проводят ХТО деталей из порошковых материалов. Цементацию и нитроцементацию применяют для повышения твёрдости и износостойкости поверхностного слоя. Азотирование позволяет получать высокую твёрдость, усталостную прочность и коррозионную стойкость деталей.

*Сульфидирование* применяют с целью уменьшения коэффициента трения для повышения износостойкости и твёрдости железных и железографитовых изделий. Наиболее простой способ сульфидирования – пропитка серой погружением пористых изделий в расплавленную серу при температуре 140–160°C (выдержка 10–15 мин) с последующим нагревом до 400–500°C в герметизированной печи с азотоводородной атмосферой.

*Оксидирование* обработкой паром применяют для повышения износостойкости и коррозионной стойкости порошковых деталей на железной основе. Обычно используют обработку паром при температуре 550°C в течение 1 ч с последующим охлаждением в масле. При взаимодействии паров воды с железом на поверхности деталей и на поверхности открытых пор образуется прочная коррозионно-стойкая плёнка.

*Основными свойствами порошковых материалов являются: химический состав, плотность (пористость), однородность состава и структуры.*

Современные порошковые материалы по видам применения условно подразделяют на следующие функциональные категории:

1) конструкционные (включая группы металлов и их сплавов, металлокерамических твердых сплавов и минералокерамики);

- 2) пористые (включая группы фильтрующих, триботехнических, «потеющих» и пеноматериалов);
- 3) электротехнического назначения;
- 4) специальные материалы для ядерной энергетики и др.

## 6.2. Конструкционные порошковые материалы

Изделия для машиностроения из конструкционных порошковых материалов являются наиболее распространенным видом продукции порошковой металлургии. Обладая набором высоких механических характеристик, они повсеместно используются в машиностроении для производства высоконагруженных шестерен, звездочек, зубчатых колес, червячных пар, клапанов и седел к ним, муфт, фланцев, эксцентриков, накладок, заглушек, храповиков, гаек, ограничителей, кулачков, шайб, крышек, корпусов подшипников, компонентов насосного оборудования и измерительного инструмента, различных дисков, втулок, деталей множества других элементов технических устройств (рис. 6.1).



Рис. 6.1. Конструкционные детали из порошковых материалов

Правильность выбора порошковых конструкционных материалов зависит от того, насколько верно учтены особенности их применения в технолого-экономическом и эксплуатационном аспектах, которые зависят от: *физико-механических свойств, технологических свойств* (обрабатываемости резанием и давлением, термическими способами, методами литья), *эксплуатационных (служебных) свойств, устойчивости к температурным факторам* (жароустойчивость, жаропрочность и т.п.).

Различают конструкционные порошковые материалы общего назначения, заменяющие обычные углеродистые и легированные стали, чугуны и цветные металлы, и материалы, обладающие специальными свойствами – высокой износостойкостью, твёрдостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью. В зависимости от условий нагружения

различают мало-, средне- и тяжело нагруженные детали, которые в свою очередь делятся на тяжело нагруженные статическими и динамическими усилиями.

Чем выше требования по прочности, тем меньше должна быть пористость металла. По плотности (пористости) порошковые детали подразделяют на группы.

*Тяжелонагруженные статическими усилиями* детали изготавливают из порошков углеродистых или легированных сталей и цветных сплавов. Пористость материала не должна превышать 9%. Изделия получают холодным прессованием и спеканием с последующей дополнительной горячей и холодной штамповкой или горячим прессованием. Применяют также пропитку легкоплавкими металлическими расплавами с последующей термической обработкой.

*Тяжелонагруженные динамическими нагрузками* детали изготавливают из порошков углеродистых и легированных сталей и сплавов цветных металлов с пористостью не более 2%. В этом случае проводят холодное прессование, спекание, горячую штамповку, горячее прессование или ХТО.

На рис. 6.2 представлена зависимость относительной прочности  $\sigma_{отн} = (\sigma_{пор}/\sigma_{комп})100\%$  от относительной плотности  $\gamma_{отн} = (\gamma_{пор}/\gamma_{комп})100\%$  порошковых материалов при различных технологических процессах формообразования, где  $\sigma_{пор}$ ,  $\gamma_{пор}$  – прочность и плотность порошковых материалов;  $\sigma_{комп}$ ,  $\gamma_{комп}$  – прочность и плотность композитов.

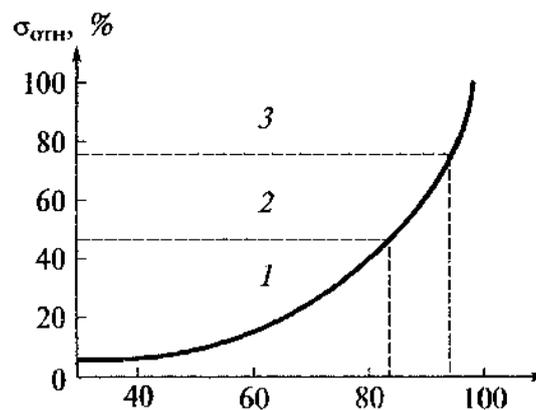


Рис. 6.2. Зависимость относительной прочности порошковых конструктивных материалов от их относительной плотности и технологии формообразования: 1 – статическое холодное прессование; 2 – высокоскоростное холодное прессование; 3 – горячая штамповка

С увеличением плотности одновременно возрастают пластичность и ударная вязкость. Изменяя пористость, можно регулировать

плотность и механические свойства, подбирать материалы с заданными свойствами для конкретных условий работы изделий.

Порошковые стали по механическим свойствам могут не уступать литым и кованым сталям соответствующего состава. Так, мартенситно-старяющие стали благодаря возможности повышения содержания титана до 2...3% имеют временное сопротивление до 2000 МПа при ударной вязкости  $KCU$  30–40 Дж/см<sup>2</sup>.

Основой для получения порошковых коррозионностойких материалов обычно служат порошки сталей и сплавов определённого состава.

Перспективно использование порошков титана и его сплавов для изготовления тяжело нагруженных деталей. Высокие механические свойства порошковых изделий на основе титана ( $\sigma_B = 650\text{--}900$  МПа;  $\delta = 8\text{--}16\%$ ) позволяют применять их для изготовления шатунов автомобильных двигателей, что существенно уменьшает массу, снижает инерционные силы и повышает мощность двигателя.

### **6.2.1. Износостойкие порошковые материалы**

К основным принципам создания порошковых износостойких материалов относятся следующие:

1. Структура материала должна быть гетерогенной и состоять из твердых зерен, равномерно распределенных в упругопластической матрице. В этом случае приложенная нагрузка действует в основном на включения твердой фазы, а в матрице происходит релаксация напряжений.

2. Структура материала не должна существенно изменяться в процессе трения или должна перестраиваться в структуру, выгодную с точки зрения трения и износа.

3. Поверхностный слой трущихся материалов должен иметь меньшую прочность, чем нижележащие слои (правило положительного градиента).

4. Поверхностный слой не должен наклёпываться в процессе трения.

5. Под влиянием окружающей среды в материале не должны происходить структурные изменения, ухудшение характеристик прочности и пластичности.

6. В состав материала рекомендуется вводить вещества, способные работать в качестве твердых смазок.

7. Между структурными составляющими материала должна существовать адгезионная связь.

8. Противозадирные добавки не должны значительно снижать прочность материала.

9. Коэффициент трения твердых включений между собой и по материалу матрицы должен быть минимальным.

Порошковые износостойкие материалы должны быть плотными ( $P < 10\%$ ). Они могут быть получены двойным прессованием и спеканием прессовок, либо горячим прессованием, либо горячей штамповкой, либо пропиткой более тугоплавкой металлической заготовки неметаллическим расплавом и т.д.

**Материалы с неравновесной грубогетерогенной структурой**, формируемой в процессе спекания, представляют собой прочную и пластичную металлическую матрицу и равномерно распределённые в ней твёрдые включения оксидов, тугоплавких соединений или интерметаллидов в количестве 15–20 об. %. Такая гетерогенная структура позволяет исключить макросхватывание и повысить износостойкость материалов.

Созданная как аналог (по химическому составу) стали ШХ15, спеченная сталь ПЖЧ20Х3 обладает большей износостойкостью, несмотря на то, что имеет пористость 10–12% и уступает ей по прочности и твердости. Испытания в режиме граничного трения со сталью Р9 при скорости 2,5 м/с и давлении 3,4 МПа показали, что материал ПЖЧ20Х3 по износостойкости превосходит сталь ШХ15 в 5 раз. Промышленное применение порошковых деталей масляного насоса кузнечно-прессового оборудования, изготовленных из стали ПЖЧ20Х3, позволило повысить ресурс масляного насоса с 3000 до 12000 ч.

Высокой прочностью и износостойкостью обладают порошковые материалы на основе железа, содержащие карбид бора. Легированная матрица и дисперсные твердые включения сложных карбидов и боридов обеспечивают повышенную прочность и износостойкость материалов.

Повышенной износостойкостью характеризуются материалы типа *железо-феррохром, железо-ферромарганец, железо-ферротитан, железо-карбид титана*.

Высокой работоспособностью при высоких температурах обладают износостойкие материалы на основе никеля или кобальта, содержащие в качестве противозадирных добавок оксид магния MgO.

**Самосмазывающиеся подшипники** получают методом порошковой металлургии из материалов различной комбинации: железо-

графит, железо-медь (2–3%) – графит или бронза-графит. Графит вводят в количестве 1–4%. После спекания в материале сохраняют 15–35% пор, которые затем заполняют маслом. Масло и графит смазывают трущиеся поверхности. При увеличении трения под влиянием нагрева поры раскрываются полнее, и смазочный материал поступает обильнее. Тем самым осуществляется автоматическое регулирование подачи смазочного материала (его запас находится в специальной камере). Такие подшипники работают при небольших скоростях скольжения (до 3 м/с), отсутствии ударных нагрузок и устанавливаются в труднодоступных для смазки местах.

**Металлостеклянные материалы** – порошковые материалы, полученные из смеси порошков металла и стекла. Изделия из них получают холодным прессованием шихты с последующим спеканием заготовок, горячим статическим прессованием или горячей штамповкой заготовок, пропиткой расплавленным стеклом пористых металлических заготовок. Metallостеклянные материалы имеют ярко выраженную гетерогенную структуру – металлическую матрицу и равномерно распределенные стеклянные включения (1,2–1,5 мкм). Стеклянные частицы в процессе спекания или нагрева под штамповку изменяют свою форму с осколочной на более округлую.

После термической обработки металлическая матрица на основе углеродистых и легированных сталей имеет микротвердость порядка 5–6 ГПа, стеклянная фаза – 8–12 ГПа, что предопределяет высокую износостойкость металлостеклянных материалов.

Оптимальные фрикционные и физико-механические свойства наблюдаются при введении 15–25 об. % стекла.

Одним из применяемых в технике износостойких материалов, работающих без смазки в вакууме, является металлостеклянный материал ПС5ГШ на основе эвтектоидной стали с 15 об. % стеклянной фазы, внедренной в виде стеклянного порошка. Материал подвергают термической обработке: закалке с 820–840°C в водные растворы солей и отпуску при 200°C в течение 1 ч. Механические свойства при этом:  $\sigma_b = 580\text{--}620$  МПа;  $KCU = 100$  кДж/м<sup>2</sup>;  $\delta = 2\text{--}3\%$ ; HRC 52–58. Фрикционные испытания в условиях трения без смазки показывают, что при отсутствии стекла трущиеся поверхности схватываются, температура в зоне трения превышает 600°C, интенсивность износа возрастает в 20–30 раз.

Металлостеклянные материалы в 1,5–5 раз дешевле легированной стали ШХ15, превосходят ее при равной твердости: при трении без

смазки – в 3–11 раз, при работе в абразивной среде – в 1,9–2,5 раза. Металлостеклянные материалы применяют при изготовлении тяжело-нагруженных узлов трения, работающих при ограниченном подводе смазки или при её отсутствии (*шестерни, кулачки, детали сельскохозяйственных машин* и др.).

**Карбидостали** – это порошковые материалы, состоящие из легированной стальной матрицы и карбидов с массовой долей 20–70%. В качестве карбидной составляющей чаще всего применяют карбид титана. Матрица из легированной стали выполняет роль связки с равномерно распределёнными в ней карбидами. Приготовление порошковой смеси состоит в смешивании порошка карбида титана с порошком стали-связки заданного состава либо со смесью порошка железа с порошками легирующих компонентов. В качестве металла-связки обычно используют легированные инструментальные стали марок Х12М, Х4Н2МВ, Х6В3М, 5Х6ВМ2, Р6М5К5. Карбидостали после закалки и отпуска обладают высокой твёрдостью и износостойкостью. По комплексу свойств карбидостали занимают промежуточное положение между твёрдыми сплавами и быстрорежущими сталями.

Кроме инструментов разного назначения карбидостали можно использовать для изготовления деталей, подвергающихся интенсивному изнашиванию (*штулки, валики, подшипники, зубчатые колеса, кулачки*), а также деталей, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания, при повышенных температурах и в коррозионных средах. В качестве матрицы могут использоваться инструментальные, конструкционные, коррозионностойкие и другие стали, что определяется назначением карбидосталей.

### **Конструкционные металлокерамические материалы**

К данной группе конструкционных материалов относятся отличающиеся сложной структурой металлокерамические твердые сплавы (керметы), содержащие в своем составе более 50% (по объему) твердодозернистой фазы (карбиды, бориды, оксиды, нитриды различных металлов), а также используемое в качестве матрицы для удержания зерен пластичное связующее в виде чистых металлов (никель, кобальт, тугоплавкие металлы). Керметы применяют для производства бурового инструмента.

Металлокерамические твердые сплавы – один из наиболее распространенных классов конструкционных порошковых материалов с уникальным набором физико-механических свойств. Твердые сплавы находят применение в буровом оборудовании. Показатели плотности

керметов (керамики с матричным металлическим связующим) достигают  $3,97 \text{ г/см}^3$ , а твердости – 93 HRA.

В сфере легкого, среднего и тяжелого машиностроения широко используются детали с твердосплавным армированием; из твердых сплавов изготавливают размольные шары для шаровых мельниц.

### ***Конструкционные минералокерамические материалы***

Минералокерамику, структурно включающую в свой состав кристаллиты, соединенные стекловидным аморфным связующим, получают преимущественно на базе порошковых оксидов и высокотвердых безоксидных карбидных, боридных, нитридных и силицидных тугоплавких композиций, а также подобных соединений Al, Ti, Zr и ряда других металлов. Минералокерамические материалы являются высокопрочностными, термостойкими, износостойчивыми. Минералокерамика имеет плотность в диапазоне  $4,2\text{--}4,6 \text{ г/см}^3$  и твердость в пределах 92–94 HRA.

К группе минералокерамики по свойствам причисляют также корунды. Корунды незаменимы при изготовлении износостойчивых насадок к *породоразрушающим долотам гидромониторного типа*, насосных горловин. Весьма результативным оказывается использование корундов для изготовления рабочих кромок *грунтопланировочных машин*.

## **6.3. Триботехнические пористые материалы**

*Триботехническими* (от греч. «трибос» – «трение») называют пористые материалы, используемые для изготовления пар трения. Группа триботехнических материалов в свою очередь подразделяется на подгруппы антифрикционных материалов, обеспечивающих наименьшее сопротивление при взаимодействии трущихся поверхностей, и фрикционных материалов, которые, напротив, применяются с целью сделать силу трения максимальной.

### **6.3.1. Антифрикционные пористые материалы**

Пористые антифрикционные материалы (ГОСТ 26614-85) изготавливают методом формпрессования с последующим спеканием из металлопорошков на основе Fe, Cu и Ti, а также боридных, карбидных и оксидных композиций со смазывающей пропиткой из свинца, графита, дисульфида молибдена, сернистого цинка, селенидов, фторопластов и других мягких наполнителей. Степень пористости таких материалов может быть различной, варьируясь в диапазоне 15–35%.

Большинство изделий из порошковых антифрикционных материалов – самосмазывающиеся (смазывающий компонент содержится в порах матричной основы) (см. раздел 6.2.1). Оптимальную структуру антифрикционных материалов в виде твердой матричной основы с заполняющим ее мягким смазывающим компонентом возможно получить лишь с применением порошковой металлургии. Изготавливаемая таким образом продукция способна обеспечить стабильно малые показатели трения благодаря идеальной прирабатываемости, высоким характеристикам износоустойчивости, теплопроводности, оптимальной вязкости в режиме ударных нагрузок и сопротивляемости схватывающему эффекту.

Из антифрикционных материалов – достойной альтернативы традиционным чистометаллическим сплавам – выпускают широкий ассортимент подшипников скольжения (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Металлокерамический подшипник скольжения

Подшипники изготавливают из пористой металлокерамики с различными значениями пористости, исходя из их условий эксплуатации. В экстремальных условиях (высокоскоростной режим с возможными ударными нагрузками), требующих наличия особенно прочных опор, применяют изделия из мелкодисперсных порошков с невысокой степенью пористости (до 22%). В средненагруженном режиме пористость 22–28%, а для эксплуатации в щадящем режиме нужны изделия из порошков крупной дисперсии (пористость 28–35%). Чем выше показатель пластичности и ниже степень пористости металлопорошка, тем ближе он по набору функциональных свойств к компактному металлу.

При высокотемпературных условиях (до 280°C) металлокерамические подшипники на железографитовой пористой основе могут эксплуатироваться в режиме невысоких скоростей ( $v < 0,11$  м/сек) с использованием графитосмазки.

Возможность пропитывания материалов основы твердыми смазочными наполнителями позволило применять пористые подшипники в случаях, когда применение жидкой смазки не представляется возможным, например, при эксплуатации в режиме высоких температур.

### **6.3.2. Фрикционные пористые материалы**

Фрикционные порошковые материалы (ГОСТ 17359-82) при степени пористости 10–13% имеют высокие показатели коэффициента трения, износо-, тепло-, коррозионной стойкости, прочности, прирабатываемости. Поэтому их используют в составе технических устройств, предназначенных для передачи или рассеивания кинетической энергии (тормозов, фрикционных муфт, демпферов и др.). Как и антифрикционные, фрикционные материалы также являются пористыми композитами, хотя в практическом отношении и выполняют прямо противоположную функцию.

Они состоят из металлических и неметаллических компонентов для деталей, работающих в масле (75%) и при сухом трении, в виде, соответственно, металлической основы (стальной, чугунной, медно-никелевой и т.д.) (рис. 6.4).



*Рис. 6.4. Изделия из спеченных фрикционных металлопорошков, а также припекаемых к основе под давлением керамических фрикционных накладок (рис. 6.5)*

При этом металлокомпоненты позволяют добиться высоких значений теплопроводности и прирабатываемости, а безметаллические составляющие ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , графит и др.) способствуют увеличению силы трения и минимизируют возможность заедания вследствие схватывания.

К наиболее востребованным маркам антифрикционных материалов причисляют: ФМК-8; ФМК-11; МКВ-50А; СМК-80; МК-5; МК-263.

Первые 3 марки разработаны для сильнонагруженных тормозов, муфт сцепления *летательных аппаратов и дорожной техники военного назначения.*



*Рис. 6.5. Керамические фрикционные накладки, представляющие собой спеченную композицию из материалов с высоким коэффициентом трения (металло-, асболокно, кварциты, карбиды, оксиды, бориды), пропитанных твердой смазкой (Pb, Sn, Bi, оксиды Al, сульфаты Ba и Fe, графит)*

Марка СМК-80 используется в составе тормозов и муфт сцепления большегрузной автотехники (например, *карьерные самосвалы грузоподъемностью свыше 70 т*).

Самыми же распространенными являются марки МК-5 и МК-263 на латунно-бронзовой основе, предназначенные для эксплуатации в условиях тяжелых и средних нагрузок при температуре поверхности трения не свыше 550–650°C. Из материалов данных марок производят широчайший ассортимент дисков сцепления и тормозных колодок, которыми комплектуют *автотракторную технику и спецтехнику строительного и дорожно-строительного назначения.*

#### **6.4. Пористые фильтрующие элементы**

Для изготовления фильтрующих элементов обычно применяют ткани, войлок, керамику, фарфор, а также сетчатые фильтры из различных материалов. Их недостатками являются низкая коррозионная стойкость, недостаточная механическая прочность, низкая термостойкость и жаропрочность. В большинстве случаев они не допускают высоких перепадов давлений, с трудом поддаются регенерации.

Высокопористые порошковые металлические материалы (степень пористости 45–55%), благодаря жёсткому пространственному

каркасу имеют более высокую прочность, выдерживают резкие колебания температур, легко обрабатываются, свариваются и паяются, обеспечивают необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость, теплопроводность. Вследствие высокой пористости такие материалы имеют хорошую проницаемость для жидкостей и газов при достаточно тонкой фильтрации (до 30 мкм), легко регенерируются (при этом почти полностью восстанавливают свои первоначальные свойства), не засоряют фильтрующиеся жидкости или газы материалами фильтра.

*Технология изготовления* металлических пористых элементов зависит от их формы и размеров. Фильтры небольших размеров изготавливают спеканием свободно засыпанного порошка. Для более крупных фильтров применяют холодное прессование и последующее спекание. Для получения тонких пористых лент применяют прокатку.

Спекаемые фильтрующие элементы получают из металлопорошков однородной дисперсности и требуемого химического состава. Спеченные пористые фильтры чаще всего изготавливают из сферических порошков, так как такие изделия характеризуются большой степенью проницаемости, а также их можно регулировать и восстанавливать.

Для изготовления пористых проницаемых элементов применяют порошки различных металлов и сплавов: углеродистых и коррозионностойких сталей различных марок, сплавов никеля с хромом и молибденом, сплавов меди, титана, алюминия, вольфрама, молибдена и др. В технике наибольшее распространение получили фильтры из коррозионностойкой стали, бронзы, сплавов никеля и титана.

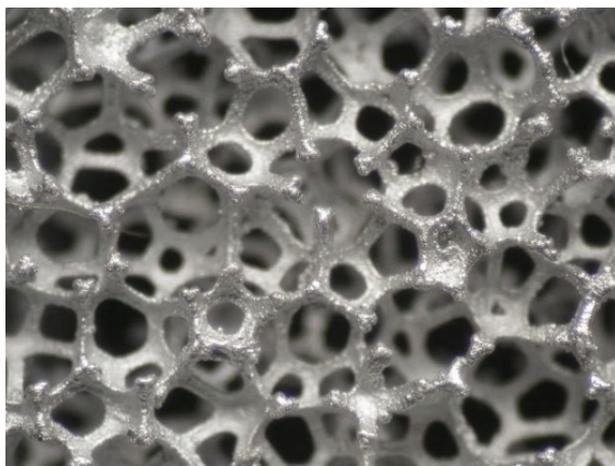
Их изготавливают методом формовки (формопрессование с различными усилиями или свободная засыпка в формы) с последующим спеканием бронзового, никелевого, титанового, вольфрамового, молибденового порошка, а также порошков нержавеющей сталей и тугоплавких композиций. Рабочий температурный диапазон составляет от  $-270$  до  $+1000^{\circ}\text{C}$ . Методами порошковой металлургии в числе прочих изготавливают фильтрующие элементы, степень пористости которых, а значит и очищающую способность, можно изменять и даже регулировать в зависимости от конкретных задач (рис. 6.6).

По форме фильтрующие элементы из спеченных порошковых материалов представляют собой диски, пластинки, цилиндры, втулки, конусы и фасонные изделия более сложной конфигурации (рис. 6.7).

Применение порошковых материалов позволяет увеличить срок службы насосов, двигателей и других агрегатов, работающих на очищенных жидкостях. С их помощью повышается эффективность хими-

ческих процессов и улучшается качество вакуумной продукции, создаются возможности для получения материалов с новыми свойствами.

Пористые фильтры применяются для механической очистки топлива в двигателях самолетов, автомобилей, тракторов и т.д., различных жидкостей и газов от частиц посторонних включений. Они составляют значительную долю продукции, выпускаемой из пористых порошковых материалов.



*Рис. 6.6. Структура пористого фильтра под микроскопом*



*Рис. 6.7. Пористые порошковые фильтрующие элементы*

Порошковые фильтры имеют целый ряд преимуществ перед непорошковыми аналогами, среди которых основными являются:

- несложное изготовление;
- повышенная прочность;
- лучшие очищающие свойства;
- высокие значения жаростойкости, теплопроводности, сопротивления абразивному износу;
- равномерное распределение фильтрации по всей площади фильтрующего элемента.

Определяющими критериями качества пористых фильтроматериалов являются:

- характер пористости;
- степень проницаемости;
- тонкость очистки;
- грязеемкость;
- капиллярность.

Технология производства спеченных пористых фильтров в каждом случае является избирательной. В зависимости от особенностей условий фильтрации учитывают необходимые значения тонкости очистки, степени проницаемости, пропускной способности, прочности и размерных параметров.

### ***Контрольные вопросы***

1. Как получают порошковые материалы?
2. Что такое порошок, гранула, пудра?
3. Какие операции включает в себя технологический процесс изготовления изделий из порошковых материалов?
4. Какую дополнительную обработку проводят для изделий, изготовленных из порошков?
5. Почему подшипники, изготовленные из порошков, могут длительное время работать без добавления смазочного материала?
6. Какие порошковые материалы используют для изготовления тормозов?
7. В чем особенность фильтров, изготовленных из порошков?
8. Что такое карбидосталь?

## Глава 7. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

История возникновения искусственных композиционных материалов (КМ) восходит к истокам цивилизации, когда человек начал сознательно конструировать новые материалы. Уже на ранних стадиях развития цивилизации он использовал для строительства кирпич из глины, в которую замешивалась солома, придававшая повышенную прочность. Использование природных битумов позволило повысить водостойкость природных материалов и изготавливать суда из камыша, пропитанного битумом. Прослеживается аналогия между изготовлением боевых луков у кочевников с использованием нескольких слоев из дерева, рога, шелка, скрепляемых с помощью клея, и современными металлодеревотканевыми слоистыми конструкциями, соединяемыми отверждающимися смолами. Одним из наиболее ярких примеров такого рода является материал *фиберглас из стеклянных волокон, скрепленных полимерным связующим*, структура которого повторяет структуру бамбука, где непрерывные волокна из целлюлозы находятся в более пластичной матрице с низким модулем (рис. 7.1).

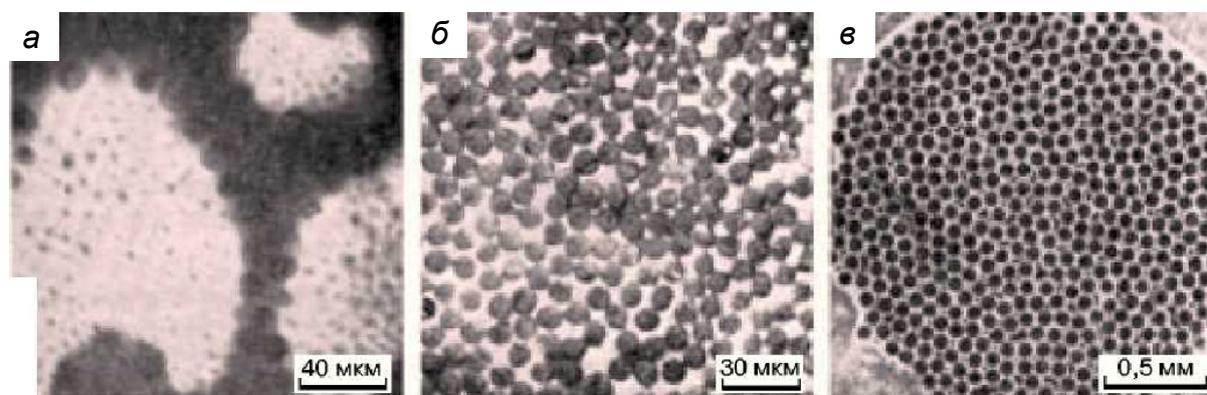


Рис. 7.1. Микроструктура различных КМ (сечение поперек армирующих элементов): а – бамбук; б – стеклопластик; в – КМ из меди, армированной вольфрамовой проволокой

Приведенные примеры позволяют выделить то общее, что объединяет КМ, а именно – эти материалы являются результатом объемного сочетания разнородных компонентов, один из которых пластичен (связующее, матрица), а другой обладает высокой прочностью и жесткостью (наполнитель, арматура), и при этом композиции имеют свойства, которых не имеют отдельные составляющие.

В качестве как первого, так и второго компонента могут выступать самые разнообразные по природе и происхождению материалы.

Известны КМ на базе металлов, керамики, стекол, углерода, пластмасс и других материалов. Практически любой современный материал представляет собой композицию, поскольку все материалы редко применяются в чистом виде. Это создает сложности с точки зрения использования термина – он часто применяется для всех сложных систем, содержащих несколько компонентов.

### 7.1. Общая характеристика и классификация

Традиционно применяемые металлические материалы в значительной мере достигли своего предела конструктивной прочности. Вместе с тем развитие современной техники требует создания материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред, высокого давления. Зачастую требования, предъявляемые к материалам, могут носить противоречивый характер. Удовлетворить эти требования в полной мере можно путем использования композиционных материалов.

**Композиционные материалы (КМ), композиты** – многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью, жёсткостью и т. д. Состав и форма вхождения компонентов в композит предусматриваются заранее, при этом компоненты присутствуют в таких количествах, чтобы обеспечить получение заданных свойств материала. Между компонентами всегда существует граница раздела. Они должны быть взаимно нейтральны и коэффициенты теплового расширения у них должны быть близкими, чтобы не возникали внутренние напряжения при повышении температуры.

В качестве упрочняющей фазы выбирают материалы, которые имеют температуру плавления намного выше температуры плавления матрицы, при нагреве они не должны растворяться в матрице. Это обеспечивает высокие прочностные свойства и жаропрочность композита до 0,9...0,95 от температуры плавления матрицы.

Сочетание разнородных веществ приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Варьируя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентацию наполнителя, получают широкий спектр материалов с требуемым набором свойств.

Высокая надёжность конструкций из композитов связана с особенностями распространения в них трещин. В традиционных мате-

риалах трещина развивается быстро и скорость её роста в процессе работы возрастает. В композитах трещина обычно возникает и развивается в матрице. Граница между матрицей и армирующим компонентом является препятствием на пути распространения трещины, сдерживающим её рост.

Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам и в то же время они легче. Использование композитов обычно позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении её механических характеристик. Их применение дает возможность создать принципиально новые конструкции.

Свойства композитов зависят от свойств основы, наполнителей и прочности связи между ними. Матрица связывает композицию в монолит, придавая ей форму, и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают композиты на металлической, полимерной и керамической основах.

По виду и структуре наполнителя композиты делят на: дисперсно-упрочненные; волокнистые; слоистые (рис. 7.2).

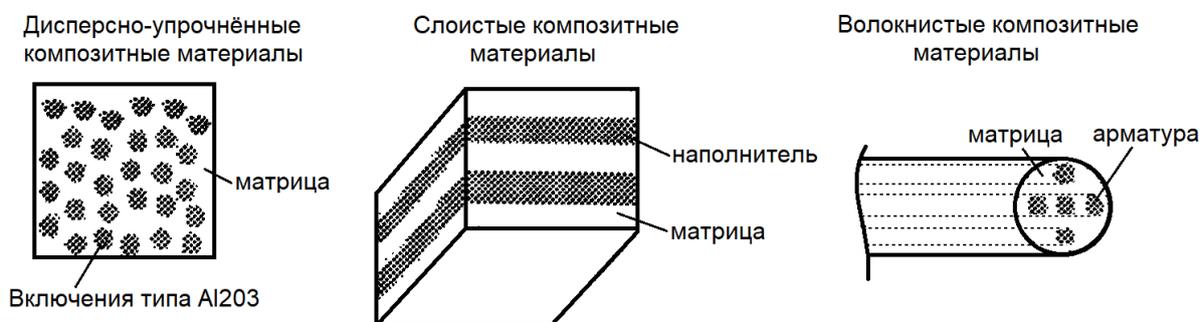


Рис. 7.2. Виды композиционных материалов

## 7.2. Композиционные материалы с металлической матрицей

Композиты с металлической матрицей сохраняют в себе все преимущества и металла и наполнителя. У них высокие значения предела прочности, модуля упругости и ударной вязкости, причём эти свойства они сохраняют до высоких температур. Кроме того, такие композиты можно упрочнять термической обработкой и наклёпом, при этом упрочнение идёт в основном за счёт матрицы.

### 7.2.1. Дисперсно-упрочненные композиты

В дисперсно-упрочненных композитах матрица упрочняется мелкодисперсными частицами второго компонента, который равномерно распределяется по всему объёму матрицы. Эти дисперсные частицы являются мощным тормозом при движении дислокаций. Такими упрочняющими частичками могут быть карбиды, нитриды, оксиды, которые обладают высокой твёрдостью, модулем упругости и химической стойкостью.

Для эффективного торможения дислокаций суммарная поверхность упрочняющих частиц должна быть большой, а размер частичек как можно меньше. Уровень прочности зависит от объемного содержания упрочняющей фазы, равномерности ее распределения, степени дисперсности и расстояния между частицами. Согласно формуле Орована, сопротивление сдвигу увеличивается с уменьшением расстояния между частицами:  $\sigma = Gb/l$ , где  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – межатомное расстояние;  $l$  – расстояние между частицами.

Большое упрочнение достигается при размере частиц 0,01 – 0,1 мкм и расстоянии между ними 0,05 – 0,5 мкм. Объемное содержание частиц зависит от схемы армирования. Преимущество дисперсно-упрочненных композитов по сравнению с волокнистыми – изотропность свойств. Получают такие композиты методом порошковой металлургии.

К дисперсно-упрочненным композитам на алюминиевой основе, нашедшим промышленное применение, относится материал из спеченной алюминиевой пудры (САП); на никелевой основе известны композиции, упрочненные частицами оксидов тория, иттрия и др.

Спекание порошков происходит при температурах ниже температуры плавления, поэтому общим для сплавов, полученных таким путём, будет однородность состава и строения, которых трудно добиться при кристаллизации из жидкого состояния. Такие сплавы имеют более высокий, чем у обычных сплавов, модуль упругости, что является их достоинством.

Кроме композиционных материалов на основе алюминия для деталей, работающих при высоких температурах, используют дисперсно-упрочненные композиционные материалы с матрицей из коррозионностойкой стали, молибдена, бериллия, магния, никеля и его сплавов. Из таких материалов изготавливают лопатки газовых турбин, камеры сгорания, теплозащитные панели.

### **Дисперсно-упрочненные КМ на алюминиевой основе**

Материал САП характеризуется высокой прочностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью свойств.

САП состоит из алюминия и его оксида. Получают САП путём последовательного брикетирования, спекания и прессования окисленной с поверхности алюминиевой пудры.

Исходным материалом при получении пудры служит порошок – пульверизат, который изготавливают распылением расплавленного алюминия А6 (ГОСТ 11069-74). Порошок размельчают в шаровых мельницах в атмосфере азота с добавлением 2–3%  $O_2$  и 0,25–1,2% стеариновой кислоты. Кислород используют для окисления вновь образованных поверхностей пудры, стеарин – для облегчения скольжения и препятствия свариванию частиц пудры. Частицы пудры имеют форму чешуек толщиной менее 1 мкм. Длина и ширина частиц одного порядка, толщина оксидной пленки составляет 0,01–0,1 мкм. Размер частиц зависит от длительности размола: чем продолжительнее время размола, тем мельче частицы пудры, больше их общая поверхность и, следовательно, выше содержание оксида алюминия. Например, пудра марки АПС-1 с размером частиц 30–50 мкм содержит 6–8%  $Al_2O_3$ , а пудра АПС-2, имеющая размер частиц 10–15 мкм, уже 9–12%  $Al_2O_3$ . В настоящее время освоена технология получения алюминиевой пудры четырёх марок и соответствующих им марок САП (табл. 7.1). В сплавах от САП-1 до САП-4 увеличивается количество  $Al_2O_3$  от 8 до 20% и соответственно прочность растёт от 300 до 460 МПа, но относительное удлинение понижается от 8 до 2%. Эти сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, электропроводностью и высокой жаропрочностью. Кроме прочности, САП обладает повышенной жаропрочностью. Так, при 400°C прочность САП в пять раз выше, чем у алюминиевых сплавов.

Таблица 7.1

Механические свойства САП [1]

Материал	Содержание $Al_2O_3$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_B/(\rho g)$ , км	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$E$ , ГПа	$E/(\rho g)10^{-3}$ , км
САП-1	6–8	300	11	220	7	67	2,1
САП-2	9–12	350	13	280	5	71	2,6
САП-3	13–17	400	15	320	3	76	2,8
САП-4	18–22	450	17	370	1,5	80	2,9

Структура САП представляет собой алюминиевую основу с равномерно распределёнными дисперсными включениями  $Al_2O_3$ . С увеличением содержания  $Al_2O_3$  повышаются прочность, твёрдость, жаропрочность САП, уменьшается пластичность (рис. 7.3). Высокая прочность САП объясняется большой дисперсностью оксидной фазы, малым расстоянием между ее частицами. Нерастворимость в алюминии и отсутствие склонности к коагуляции тонкодисперсных частиц  $Al_2O_3$  обеспечивает стабильность структуры и высокую прочность при температурах до  $500^\circ C$ .

САП хорошо деформируется в горячем состоянии, хуже – в холодном, легко обрабатывается резанием и удовлетворительно сваривается контактной, аргонодуговой сваркой. В настоящее время в основном применяют САП-1, САП-2 и САП-3, из них производят все виды полуфабрикатов: листы, профили, штамповые заготовки, трубы, фольгу. САП используют для деталей, работающих при  $300\text{--}500^\circ C$ , от которых требуются высокая удельная прочность и коррозионная стойкость (*поршневые штоки, лопатки компрессоров, лопасти вентиляторов и турбин в химической и нефтяной промышленности, конденсаторы, обмотки трансформаторов в электротехнике*).

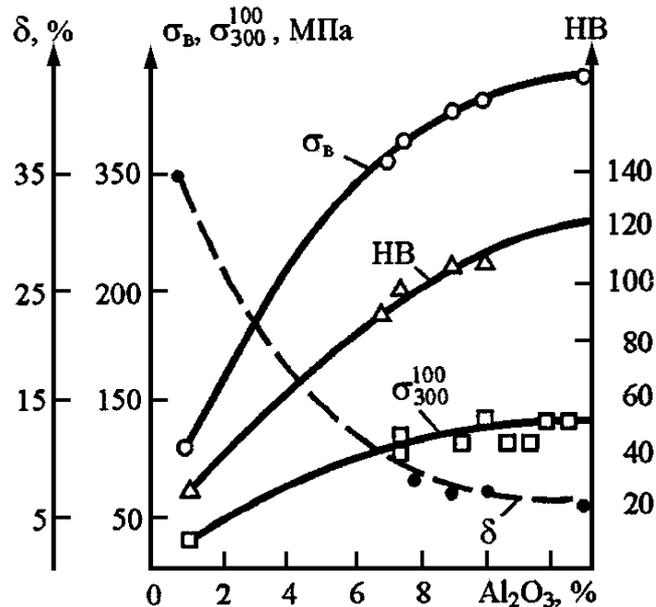


Рис. 7.3. Зависимость механических свойств САП от содержания  $Al_2O_3$

Спечённые алюминиевые сплавы (САС) изготавливают в основном по той же технологии, что и САП – из порошков, полученных распылением сплавов заданных составов. Чаще всего вводят в состав кремний (до 30%), никель или железо (до 7%). Такие сплавы отличаются

высоким модулем упругости и пониженным коэффициентом линейного расширения.

Практическое значение имеют сплавы с низким температурным коэффициентом линейного расширения, близким к коэффициенту линейного расширения стали, и высоким модулем упругости. Эти сплавы заменяют более тяжёлые стали при изготовлении отдельных деталей приборов. Механические свойства САС характеризуются достаточно высокой прочностью, твёрдостью ( $\sigma_B = 260$  МПа, 120 НВ) и низкой пластичностью (8 – 1,5...1%). Преимущества спекаемых алюминиевых сплавов по сравнению с обычными, аналогичного состава, – отсутствие литейных дефектов (ликвации, шлаковых включений и т.д.) и мелкозернистая структура с равномерным распределением фаз.

### ***Дисперсно-упрочненные КМ на никелевой основе***

В качестве матрицы в этих материалах используют никель и его сплавы с хромом (20%) со структурой твердых растворов. Сплавы с хромо-никелевой матрицей обладают более высокой жаростойкостью. Упрочнителями служат частицы оксидов тория, гафния и др. Временное сопротивление в зависимости от объемного содержания упрочняющей фазы изменяется по кривой с максимумом. Наибольшее упрочнение достигается при 3,5–4%  $\text{HfO}_2$  ( $\sigma_B = 750\text{...}850$  МПа;  $\sigma_B/(\rho g) = 9\text{...}10$  км;  $\delta = 8\text{...}12\%$ ). Легирование никелевой матрицы W, Ti, Al, обладающими переменной растворимостью в никеле, дополнительно упрочняет материалы в результате дисперсионного твердения матрицы, происходящего в процессе охлаждения с температур спекания. Методы получения этих материалов довольно сложны. Они сводятся к смешиванию порошков металлического хрома и легирующих элементов с заранее приготовленным (методом химического осаждения) порошком никеля, содержащим дисперсный оксид гафния или другого элемента. После холодного прессования смеси порошков проводят горячую экструзию брикетов.

### ***7.2.2. Волокнистые композиционные материалы***

Свойства таких композитов определяются свойствами матрицы и волокон, а также способом их армирования.

Волокнистые композиционные материалы содержат упрочняющие элементы в виде волокон, нитей, проволоки, сеток, лент, войлока и т.п. Прочность таких композиционных материалов определяется прочностью армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку.

Роль матрицы в таких композиционных материалах заключается в придании изделию требуемой формы и создании монолитной конструкции, защите волокон от окисления и механических повреждений, обеспечении прочности и жёсткости конструкции. Наибольший эффект упрочнения достигается тогда, когда между матрицей и наполнителем возникают прочные связи вследствие химического взаимодействия между ними, при этом резко возрастает адгезионная прочность.

### **Армирующие волокна композиционных материалов**

По механизму армирующего действия волокна делят на *дискретные*, если соотношение их длины к диаметру находится в пределах 10...1000, и *непрерывные*, если соотношение их длины к диаметру намного больше. Дискретные волокна, как правило, располагаются хаотично, а непрерывные имеют одноосную, двухосную и трёхосную укладку (рис. 7.4).

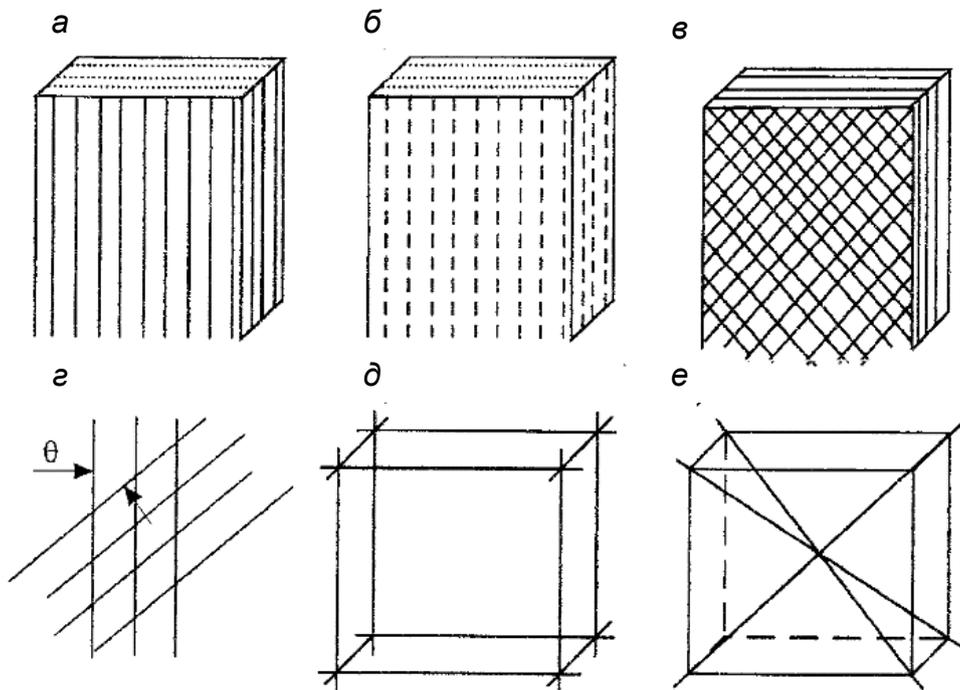


Рис. 7.4. Схемы различных способов укладки волокон: а, б – одноосная (а – непрерывные волокна; б – короткие волокна); в, г – двухосная (в – ткани; г – непрерывные волокна); д, е – трёхосная

Одноосная укладка волокон обеспечивает наиболее полную реализацию свойств вдоль волокна в композите. При двухосной укладке один слой волокон располагается над другим под углом  $9^\circ$ . Такой способ укладки будет обеспечивать большую изотропность свойств, но при этом сопротивление сдвигу между этими слоями резко снижается. Этот недостаток устраняется при трёхосном армировании матрицы.

*Требования, предъявляемые к волокнам:*

- высокая температура плавления; малая плотность;
- влаго- и химическая стойкость во всём интервале эксплуатационных температур;
- высокая прочность и жёсткость;
- минимальная растворимость в матрице;
- отсутствие токсичности;
- хорошая технологичность.

При создании композитов этого типа в качестве армирующего компонента используют высокопрочные волокна из стекла, бора, углерода, металлической проволоки и нитевидных кристаллов (усов) оксидов, нитридов и других химических соединений.

**Стекланные волокна.** При малой плотности они имеют высокую прочность, теплостойкость, влаго- и химостойкость. Их получают методом вытягивания расплавленной стекломассы через фильеры диаметром 0,8...3 мм и дальнейшим вытягиванием их до диаметра 3...20 мкм.

**Углеродные волокна** обладают высокой удельной прочностью и термической стабильностью механических свойств. Прочность достигает 1500...2000 МПа, что соответствует прочности молибденовой проволоки. Их получают путём высокотемпературной термообработки в инертной среде из синтетических органических волокон. Эти волокна используют при создании композитов в виде кручёных и некручёных жгутов с диаметром волокон ~7 мкм и числом волокон в жгуте от 1000 до 160000. Углеродные волокна имеют высокую теплопроводность, электропроводность, коррозионную стойкость, у них низкий коэффициент трения и термического расширения, но они склонны к окислению на воздухе и легко вступают в химическое взаимодействие с металлической матрицей. Для устранения этих недостатков на углеродные волокна наносят защитные покрытия из металлов и керамики.

**Борные волокна.** По сравнению с другими волокнами они обладают очень большим модулем упругости, высокой прочностью (2700...3000 МПа). Бор – это полупроводник, поэтому у него понижена тепло- и электропроводность. Получают борное волокно путём химического осаждения из газовой фазы хлорида бора на вольфрамовую проволоку диаметром 12 мкм при температуре 1100...1200°C. Диаметр волокна после осаждения бора составляет 70...200 мкм. В сердцевине такой проволоки образуются бориды вольфрама, а на поверхности – слой чистого бора. Борные волокна заметно окисляются при нагреве до 400°C, а при более высоких температурах легко взаимодействуют с

алюминиевой матрицей. Поэтому борные волокна защищают покрытиями из карбида кремния.

**Карбид кремния.** Волокна этого карбида получают так же, как и волокна бора. У них при комнатной температуре более низкие механические свойства по сравнению с волокнами бора и углерода, и они более чувствительны к поверхностным дефектам из-за повышенной хрупкости. Но при высоких температурах карбид кремния приобретает достаточную пластичность и при этом не происходит заметного разрушения. Используют эти волокна для металлокомпозитов, работающих при высоких температурах.

**Металлические волокна и проволоки.** Для упрочнения композитов, работающих при низких температурах, используют стальные и бериллиевые волокна и проволоки, а при высоких температурах – вольфрамовые и молибденовые. Стальные волокна изготавливают в основном из высокопрочных коррозионноустойчивых сталей (10X18H10T, 10X17H2, 30X13 и др.). Прочность проволоки зависит от ее диаметра и возрастает с его уменьшением. Бериллиевая проволока обладает более низкой плотностью и, соответственно, более высокой удельной прочностью и упругостью. Применяется она для композитов с алюминиевой, магниевой и титановой матрицами.

### **Применение волокнистых металлических композиционных материалов**

*Волокнистые металлические композиционные материалы* нашли широкое применение при использовании в качестве матрицы алюминия, так как он при малой плотности в первую очередь определяет достоинства композиционного материала по удельной прочности.

Композиционные материалы на алюминиевой основе, армированные углеродными волокнами (ВКУ) малопластичны, в то же время они обладают повышенной прочностью, имеют более высокую жаропрочность и могут использоваться в газотурбинных установках. Кроме того, волокна в композиционных материалах уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, в результате практически полностью исчезают внезапные хрупкие разрушения. Отличительной особенностью волокнистых одноосных композиционных материалов являются анизотропия механических свойств вдоль и поперек волокон и малая чувствительность к концентраторам напряжения.

Производство *поршней двигателей из алюминиевых литейных сплавов с армированием днища поршня керамическими волокнами и волокнами карбида кремния существенно повышает ресурс и основ-*

*ные характеристики двигателей.* В качестве антифрикционных вкладышей шатунов используют ленту из алюминиевых сплавов, армированную графитовыми волокнами.

Широкое применение в промышленности нашли композиты с матрицей из алюминия, магния, титана и их сплавов. Технический алюминий и его сплавы (АМц, Амгб, АД1, Д16 и др.) армируют волокнами бора, карбида кремния, углерода, а также стальной и бериллиевой проволокой.

### ***Свойства волокнистых композиционных материалов***

Неоднородная структура волокнистых композитов определяет их поведение при эксплуатации. Напряжения, воспринимаемые матрицей и волокнами, неодинаковы. *Если приложенные нагрузки совпадают с направлением волокна, то основную нагрузку несут волокна, при этом чем больше объёмная доля этих волокон в композите, тем работоспособность выше.* С увеличением объёмной доли волокон до 80% предел прочности композитов увеличивается, а при большей объёмной доле уменьшается из-за того, что матрицы слишком мало, и она не в состоянии смочить и пропитать каждое волокно. Тем самым сцепление волокон с матрицей ухудшается и появляется проскальзывание волокон в матрице.

*Если приложенная нагрузка перпендикулярна волокну в однонаправленном композите, то предел прочности его будет равен пределу прочности матрицы.* Это указывает на то, что свойства волокнистых композитов анизотропны. При разрушении композитов распространение трещины вдоль волокна идет легче и определяется лишь свойствами матрицы. В поперечном же направлении распространение трещины затруднено, так как ей приходится преодолевать прочность матрицы, волокна и адгезионную прочность между матрицей и волокном.

### **7.3. Композиционные материалы с полимерной матрицей**

В качестве полимерной матрицы используют эпоксидные, фенолоформальдегидные и кремнийорганические смолы, а также полиамидные пластмассы и целый ряд других термопластичных пластмасс. Свойства полимерной матрицы достигаются в результате полимеризации и отверждения (для реактопластов), при этом матрица должна иметь низкую усадку. К недостаткам таких матриц относится низкая прочность и теплостойкость, при этом надо учитывать, что теплостойкость у терморезистивных пластмасс выше, чем у термопластичных. Наиболее теплостойкими (до 350°C) являются кремнийорга-

нические и полиамидные пластмассы. Широко применяются матрицы из эпоксидных смол. У них более высокий уровень механических свойств и небольшая усадка. Предел прочности у полиамидных матриц равен от 40 до 80 МПа.

#### ***Композиционные материалы с дисперсным наполнителем***

Доля наполнителей в термопластичных полимерах достигает 50%, а в терморезактивных – до 90% от общего веса. Широкое применение находит *фторопласт*. В качестве наполнителя в них используют кокс, который повышает износостойкость фторопласта в 600 раз. Применение в качестве наполнителя бронзы, никеля и меди повышает износостойкость в 450, 250, 22 раза соответственно, а алюминиевый порошок уменьшает износостойкость фторопласта. Наряду с повышением износостойкости, введение наполнителей повышает твердость и сопротивление сжатию в 5...10 раз.

Применяются также терморезактивные полимеры на основе различных смол с органическими (древесная мука, хлопок, целлюлоза и др.) и неорганическими (асбест, тальк, каолин, молотый кварц, стекло) порошковыми наполнителями. Такие материалы обладают изотропными свойствами, невысокой прочностью и ударной вязкостью и применяются для изготовления несилевых конструкционных и электроизоляционных деталей.

#### ***Композиционные материалы с волокнистым наполнителем***

Композиты на основе полимерной матрицы с волокнистым наполнителем называют по природе наполнителя. Это органо-, карбо-, стекло- и бороволокониты. Матрицей в волокнистых служат терморезактивные и реже термопластичные полимеры.

#### ***Слоистые композиты***

Слоистыми называются композиционные материалы с полимерной матрицей и листовым наполнителем, который состоит из хаотично ориентированных дисперсных и направленных волокон или тканей. В качестве матрицы используют терморезактивные полимеры, а в качестве наполнителя – хлопчатобумажные, стеклоасботкани, органоткани, органостеклоткани, бороорганостеклоткани. Ткани различаются по соотношению волокон в основе и по типу переплетения, что сказывается на механических свойствах. Выпускаются слоистые композиты в виде листов, труб, заготовок.

К слоистым композитам относятся гетинакс, текстолит, стекло-текстолит, асботекстолит, древесно-слоистые пластики (ДСП).

#### 7.4. Композиционные материалы с керамической матрицей

Композиты с керамической матрицей получают методом порошковой металлургии, а также литьём. В качестве матрицы используют стекла силикатные ( $\text{SiO}_2$ ), алюмосиликатные ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ) и др., а также тугоплавкие оксиды ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ) и др., карбиды ( $\text{SiC}$ ,  $\text{TiC}$ ) и бориды ( $\text{TiB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$ ). В качестве наполнителя используют проволоку из жаропрочных сталей, вольфрама, молибдена, ниобия, а также неметаллические волокна (углеродные, керамические). Металлическая проволока создаёт пластичный каркас в хрупкой керамической матрице и тем самым предохраняет композит от преждевременного хрупкого разрушения. Наиболее перспективным наполнителем являются углеродные волокна. Свойства таких композитов и их жаропрочность во многом зависят от материала матрицы. Так, композиты со стеклянной матрицей могут работать при температурах до  $600\text{--}800^\circ\text{C}$ , с матрицей из тугоплавких оксидов – до  $1000^\circ\text{C}$ , из боридов и нитридов – до  $2000^\circ\text{C}$ , а из карбидов – свыше  $2000^\circ\text{C}$ .

Широко используются в промышленности керамические композиты, армированные волокнами  $\text{SiC}$ , так как у них проявляется химическое сродство матрицы и наполнителя, близкие значения модулей упругости и температурных коэффициентов расширения. Все это обеспечивает высокую прочность таких композитов и стойкость к окислению при высоких температурах. Используются они для ответственных тяжело нагруженных изделий (лопатки газовых турбин, носовые обтекатели ракет и др.).

Находит применение ситалловая матрица для изготовления дисперсно-упрочненного композита.

*Керамические композиционные материалы* получают распространение во многих областях техники, например, в металлообработке в качестве элементов режущего инструмента. Использование керамики при обработке резанием ограничено ее хрупкостью и опасностью разрушения от возникающих напряжений вследствие высокого градиента температуры. Разработанные композиционные керамические режущие материалы (*керметы*) существенно снижают недостатки керамики. Керметы, кроме керамической матрицы ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), содержат порошковые металлы.

Керамические композиционные материалы могут успешно применяться в качестве *износостойких насадок гидромониторных долот, горловин насосов пескоструйных аппаратов, газодинамических подшипников и др.*

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Что такое композиционный материал?
2. Как подразделяются композиты в зависимости от материала матрицы и по типу упрочняющих компонентов?
3. Из каких материалов изготавливаются матрицы для дисперсно-упрочненных и волокнистых композитов?
4. Какие материалы используются для упрочнения дисперсно-упрочненных композитов?
5. Из каких материалов изготавливают армирующие волокна?
6. Какие основные способы укладки армирующих волокон в матрице и как это влияет на свойства композитов?
7. От чего зависит прочность композитов?
8. В чем отличия дисперсно-упрочненных и волокнистых композитов и где они применяются в промышленности?
9. В чем преимущества композиционных материалов перед металлическими сплавами?
10. Из каких материалов изготавливаются матрицы для дисперсно-упрочненных и волокнистых композитов?
11. Дайте характеристику керамическим и полимерным композиционным материалам, укажите виды наполнителей и их влияние на свойства композитов, назовите области применения.

## РАЗДЕЛ II. ИЗНОС И ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### Глава 8. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВИДЫ ИЗНОСА

#### 8.1. Характеристики износа, виды изнашивания деталей и пути уменьшения их износа

С появлением первых простейших механизмов человек встретился с явлениями трения и износа.

Более 80% мирового парка машин выходит из строя в результате износа узлов трения, а интенсивность изнашивания находится в прямой зависимости от материалов, скоростей нагрузки, мощностей и режимов эксплуатации подвижных сопряжений.

Важная роль в надежных и высокоэффективных машинах и механизмах принадлежит различным триботехническим материалам, работающим в узлах трения, способных обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряженных деталей.

**Трение** – явление сопротивления относительно перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей. Трение сопровождается физическими, химическими и механическими процессами.

**Сила трения** направлена тангенциально к контакту и характеризует сопротивление относительно перемещению трущихся тел. **Коэффициент трения  $f$**  – отношение силы трения  $F_{\text{тр}}$  к силе нормального давления  $N$ :  $f = F_{\text{тр}}/N$ .

По виду взаимодействия поверхностей и состоянию смазочного слоя трение классифицируют по следующим признакам: трение ювенильных поверхностей (сухое), трение при граничной смазке и гидродинамической, гидростатической, контактно (эласто)-гидродинамической смазке (рис. 8.1).

**Изнашивание** – процесс поверхностного разрушения и изменения размеров тела при трении вследствие отделения материала с поверхности твёрдого тела, накопления необратимых остаточных деформаций поверхностных слоёв трущихся тел.

**Износ** – результат изнашивания, определяемый в единицах длины, объёма, массы и др. Различают три вида трения, приводящие к различным износам (рис. 8.1).

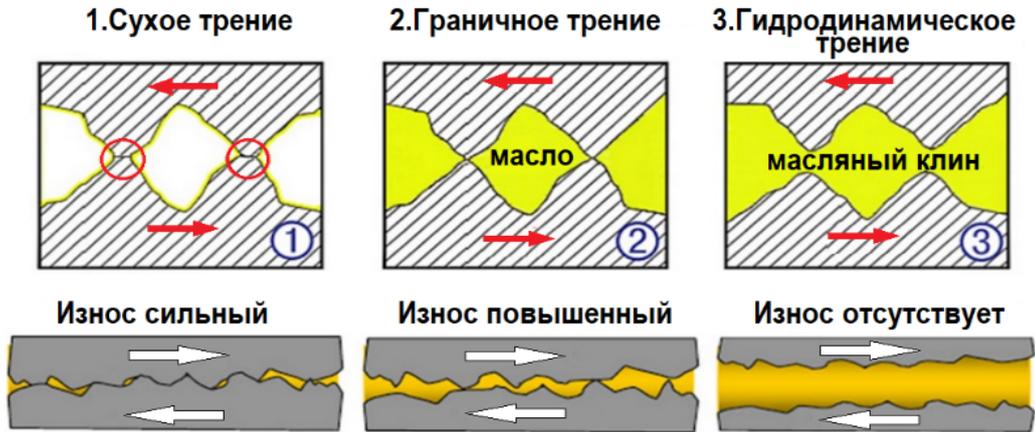


Рис. 8.1. Виды трения

**Износостойкость** – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию, оцениваемое величиной, обратной скорости  $V_h$  или интенсивности изнашивания  $Jh$ . *Скорость и интенсивность изнашивания* представляют собой отношение износа соответственно ко времени или пути. Чем меньше значение скорости изнашивания при заданном износе  $\Delta h$ , тем выше ресурс работы  $t$  узла трения:

$$t = \Delta h / V_h.$$

Скорость изнашивания и износ зависят от времени. Существуют три периода износа (рис. 8.2): I – начальный период, или период приработки, при котором изнашивание протекает с постоянно замедляющейся скоростью; II – период установившегося (нормального) износа, для которого характерна небольшая и постоянная скорость изнашивания; III – период катастрофического износа.

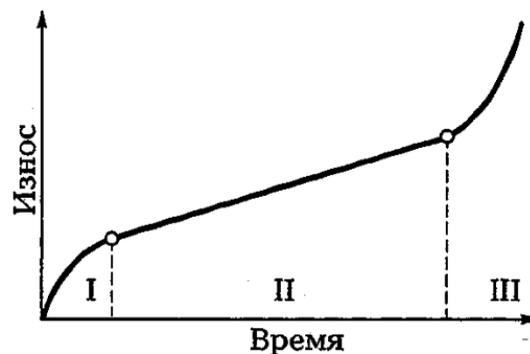


Рис. 8.2. Зависимость износа от времени

Приработка происходит в течение непродолжительного времени, наблюдается быстрое изнашивание выступов на поверхности контакта, выделяется теплота, происходят физико-химические изменения поверхностных блоков и уменьшается шероховатость. В результате при-

работки трибосистема переходит в состояние, для которого характерны максимальная несущая способность и замедленное изнашивание.

Обеспечение износостойкости связано с предупреждением катастрофического износа, уменьшением скоростей начального и установившегося изнашивания. Эта задача решается рациональным выбором материала трущихся пар и способа его обработки. При выборе материала необходимо учитывать, что критерии его износостойкости зависят не только от свойств поверхностного слоя материала, но в сильной степени от условий его работы. Условия работы отличаются таким большим разнообразием, что не существует универсального износостойкого материала. Материал, устойчивый к изнашиванию в одних условиях, может катастрофически быстро разрушаться в других. Износостойкость материала при заданных условиях трения, как правило, определяют экспериментальным путем.

Работоспособность материалов в условиях трения зависит от следующих факторов:

- внутренних, определяемых свойствами материалов;
- внешних, характеризующих вид трения (скольжение, качение) и режим работы (скорость относительного перемещения, нагрузка, характер ее приложения, температура);
- рабочей среды и смазочного материала.

Совокупность этих факторов обуславливает различные виды изнашивания. Детали, подвергающиеся изнашиванию, подразделяют на две группы:

- детали, образующие пары трения (подшипники скольжения и качения, зубчатые передачи и т.п.);
- детали, изнашивание которых вызывает рабочая среда (жидкость, газ и т.п.).

К износу относятся трение металла о горные породы, резание и бурение грунтов, шлифование, царапание, трение шероховатого вала о более мягкий подшипник, процессы опескоструивания и т.п. Износ обычно является чисто механическим процессом, хотя часто он сопровождается коррозией и адсорбцией. В зависимости от соотношения механического и коррозионного воздействия возможны все промежуточные случаи от чисто абразивного износа до коррозионно-механического.

Износ характеризуется потерей массы детали, уменьшением её объёма или линейных размеров.

Различают *допустимый* и *предельный износ*. При допустимом износе сохраняется работоспособность детали. Предельный износ

характеризуется такими изменениями формы и размеров, при которых дальнейшая эксплуатация детали становится невозможной.

В соответствии с ГОСТ 27574-88 различают следующие виды изнашивания: *механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое* (рис. 8.3).

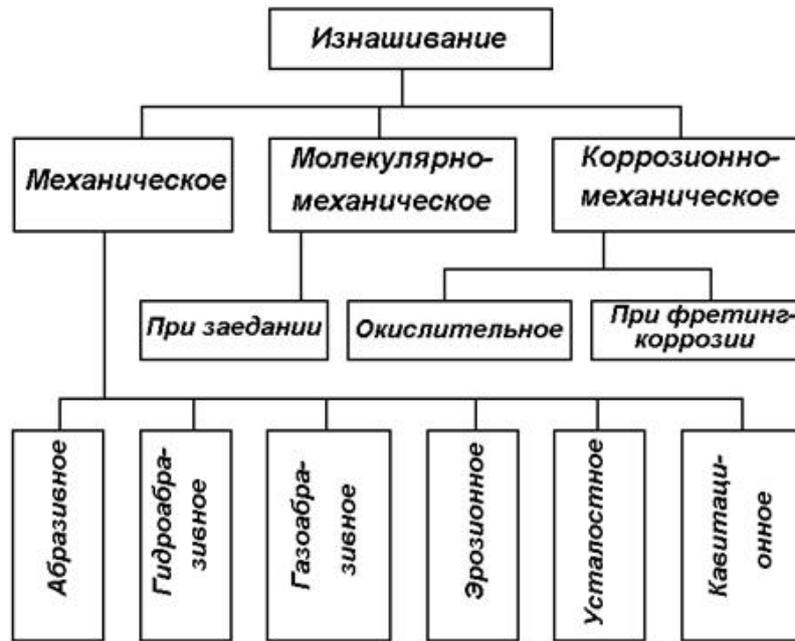


Рис. 8.3. Схема изнашивания

Различные виды изнашивания по закономерностям протекания существенно различаются между собой.

### 8.1.1. Механическое изнашивание

**Абразивное изнашивание металлов** – результат режущего или царапающего действия свободных или закреплённых абразивных частиц. Абразивные частицы, обладая большей, чем металл, твердостью, разрушают поверхность деталей и резко увеличивают износ. Абразивное изнашивание является одним из наиболее распространенных видов изнашивания. В дорожных машинах более 60% случаев износа имеют абразивный характер. Изнашивание этого вида встречается в деталях шкворневых соединений, открытых подшипниках скольжения, деталях рабочих органов дорожных машин, деталях ходовых частей и др. (рис. 8.4).

Если твердость абразивной частицы соизмерима с твердостью основного металла рабочей поверхности детали, то при работе со-

пряжения абразивная частица будет способствовать разрушению окисной пленки (рис. 8.5, а). В обнажившемся в результате этого металле под воздействием окружающей среды (кислорода воздуха и влаги) активизируются коррозионные процессы и происходит коррозионно-механическое изнашивание поверхности.

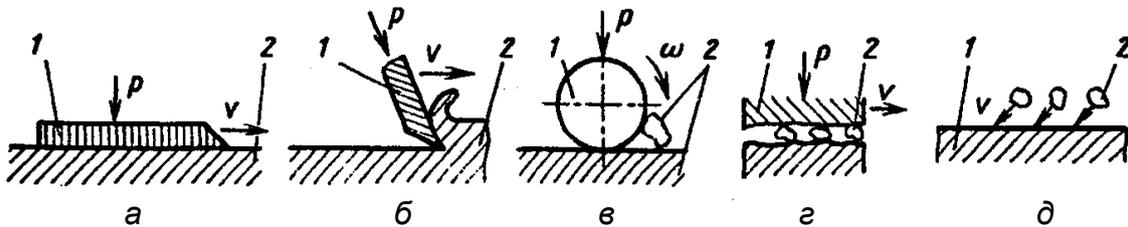


Рис. 8.4. Схемы деталей строительных и дорожных машин, работающих в условиях абразивного изнашивания: а – рабочие органы; б – режущие кромки рабочих органов; в – опорные катки, гусеницы, элементы открытых зубчатых передач, покрышки колёс; г – опоры скольжения; д – детали трубопроводов гидросистем, пневмоинструмента; 1 – деталь; 2 – абразив [6]

Если твердость абразивной частицы превышает твердость основного металла детали ( $H_a \approx 1,7 H_{мет}$ ), то при взаимодействии рабочей поверхности с частицей наблюдается пластическое оттеснение материала (рис. 8.5, б). Если частица внедряется в поверхность детали острой гранью, то пластическое оттеснение переходит в микрорезание (рис. 8.5, в).

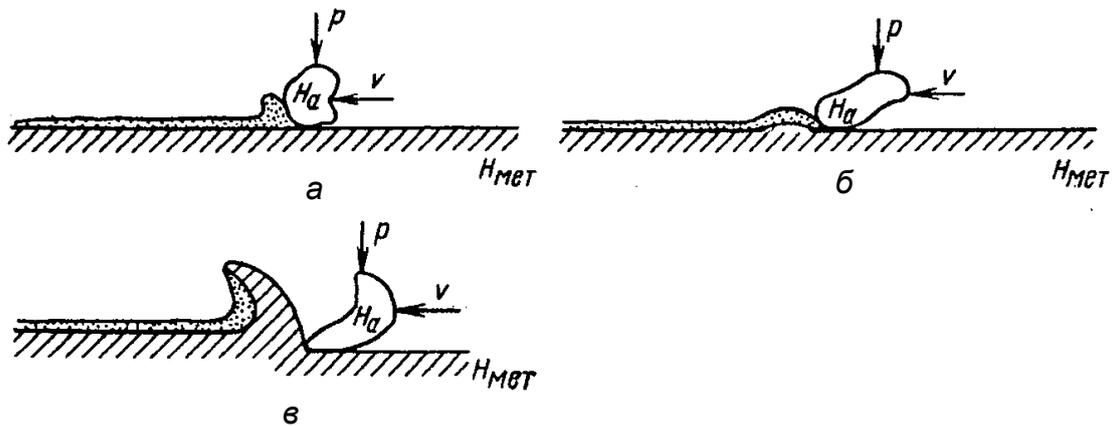


Рис. 8.5. Виды взаимодействия поверхности детали с абразивной частицей: а – при коррозионно-механическом изнашивании; б – при пластическом оттеснении; в – при микрорезании [6]

Интенсивность абразивного износа прямо пропорциональна твердости  $H_a$  абразивных частиц (рис. 8.6) и обратно пропорциональна твердости  $H_{мет}$  поверхности трения. Поверхности большой твердости обладают большой абразивной износостойкостью.

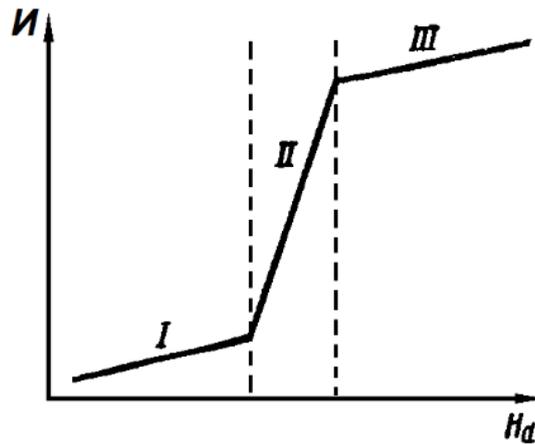


Рис. 8.6. Зависимость износа поверхности от твердости абразивных частиц:  
 I –  $H_a < H_{мет}$ ; II –  $H_a \approx H_{мет}$ ; III –  $H_a > H_{мет}$

Установлено, что относительная абразивная износостойкость  $\varepsilon$  связана с твердостью  $HV$  поверхности трения линейной зависимостью (рис. 8.7)  $\varepsilon = CH$  (где  $C$  – коэффициент, характеризующий физико-механические свойства материала). Относительную износостойкость в этом случае определяют из соотношения износа эталона и образца.

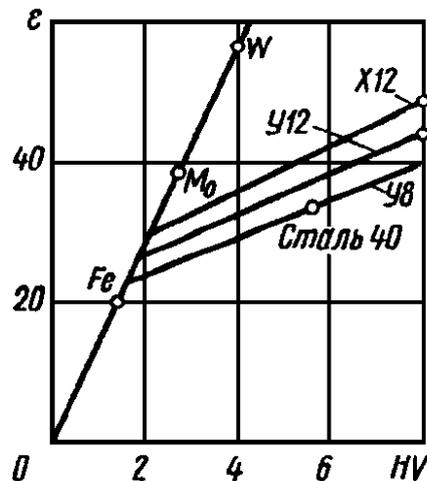


Рис. 8.7. Зависимость относительной износостойкости поверхности при абразивном изнашивании от твердости

Для уменьшения абразивного изнашивания твердость рабочей поверхности детали должна превышать твердость абразива не менее чем в 1,3 раза. Абразивную износостойкость поверхности повышают различными методами (табл. 8.1).

**Абразивное изнашивание полимеров.** В подшипниках скольжения и сопряжениях вал – втулка при шероховатости  $Rz < 0,05$  мкм поверхности металла износ полимеров в основном обусловлен исти-

ранием и адгезией. С увеличением шероховатости поверхности металла наступает абразивное изнашивание. При трении без смазочного материала интенсивность изнашивания может возрастать в  $10^4$  раз и выше по мере увеличения шероховатости в 50 раз.

Таблица 8.1

## Методы повышения абразивной износостойкости поверхности

Метод	Материал детали	Форма проявления
Гальваническое покрытие (хромирование, никелирование)	Большинство черных и цветных металлов	Образование тонкого твёрдого гладкого покрытия
Анодирование	Алюминий	Образование тонкого окисного слоя повышенной твёрдости
Насыщение (цементация, цианирование, азотирование)	Малоуглеродистые стали	Повышение твёрдости поверхности
Напыление (металлизация, наплавка порошкового металла, напыление керамики)	Металлические и полимерные материалы	Формирование слоёв взаимосвязанных частично окисленных частиц
Кокильная отливка	Серый чугун	Образование на поверхности слоя белого чугуна
Плазменная закалка	Чугун, сталь	Повышение локальной твёрдости поверхности
Лазерное упрочнение	Чугун, сталь	Повышение твёрдости материала детали в тонких поверхностных слоях

Износостойкость пластмасс в условиях абразивного изнашивания уменьшается с ростом их модуля упругости в отличие от износостойкости металлов, для которых наблюдается обратная закономерность.

При работе деталей из эластомерных материалов также наблюдается абразивное изнашивание. Причинами этого могут быть не только абразивные частицы, продукты износа, но также и выступы микронеровностей твёрдой поверхности сопряжённой детали. Выступы микронеровностей вызывают истирание и вырывы частиц материала, на поверхности эластомера возникают микропорезы и продольные царапины.

Абразивная износостойкость эластомеров обратно пропорциональна коэффициенту трения. Припудривание поверхности резины тальком или введение в состав материала антифрикционных смазочных масел позволяет значительно повысить износостойкость деталей из эластомеров.

**Гидро- и газоабразивным** изнашиванием называется абразивное изнашивание в результате действия твёрдых частиц, взвешенных в жидкости (или газе) и перемещающихся относительно изнашиваемого тела. Гидроабразивное изнашивание характерно для элементов топливной аппаратуры, двигателей внутреннего сгорания, объёмного гидропривода, а также для деталей гидродинамических передач. В роли жидкости – носителя частиц, как правило, выступают смазочные материалы, топлива, тормозные и рабочие жидкости.

**Газоабразивное** изнашивание наблюдается в элементах компрессоров и пневматического инструмента, где носителем абразивных частиц является сжатый воздух. *Гидро- и газоабразивное* изнашивание имеет общий механизм и характерные признаки проявления.

**Эрозионное изнашивание** – разрушение поверхности под воздействием динамических потоков жидкостей, газов, твёрдых частиц или электрических разрядов. В большинстве случаев при эрозии разрушение материалов происходит с образованием питтингов, каверн и раковин.

**Электроэрозия** – разрушение поверхности под воздействием импульсного электрического разряда (электроды свечей зажигания). В машинах этот вид изнашивания встречается в элементах электрооборудования.

**Космическая эрозия (абляция)** – разрушение поверхности в потоке раскалённых газов.

**Кавитационное изнашивание** – результат многочисленных микрогидравлических ударов, воспринимаемых поверхностью твёрдого тела, когда вблизи неё схлопываются пузырьки пара жидкости. Кавитационный износ типичен для деталей машин, работающих в жидких средах. Кавитационное разрушение имеет вид выдавленных кратеров.

**Усталостное изнашивание (контактная усталость)** – этот вид изнашивания происходит в результате накопления дефектов в металле, возникновения микротрещин, развития какой-либо из них или нескольких до критической величины и последующего быстрого их распространения с отделением микрообъёма материала в зону трения или за её пределы. Количественная оценка контактной усталости выражается в числе циклов нагружения или в часах работы до возникновения усталостных разрушений поверхности. Усталостное изнашивание проявляется при трении качения и в меньшей степени при трении скольжения. Этому виду изнашивания подвержены подшипники качения, зубья колёс и другие детали. Результатом такого контактного воздействия является так называемое усталостное выкрашивание, проявляющееся в появлении питтингов (ямки) на разрушаемой поверхности (рис. 8.8).

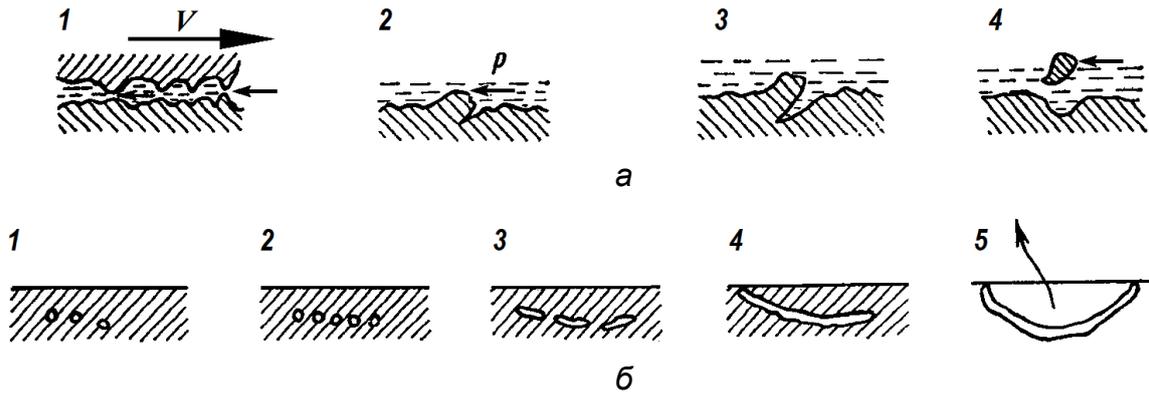


Рис. 8.8. Схема усталостного изнашивания поверхности при  $p < p_{кр}$  и возникновении: а – первичной микротрещины на поверхности; б – микротрещины в подповерхностном слое [6]

Процесс катастрофического усталостного изнашивания протекает следующим образом (рис. 8.8, а). Сначала на трущейся поверхности 1 образуются усталостные микротрещины 2. Смазочный материал, попадая в микротрещины, способствует их расклиниванию 3 и выкрашиванию частиц 4 металла, в результате чего на поверхности детали появляются мелкие оспины (питтинг). Число этих оспин и одновременно их размеры увеличиваются до тех пор, пока увеличивающиеся контактные напряжения на рабочих поверхностях не приведут к пластической деформации и интенсивному изнашиванию детали. Толщина разрушенного слоя металла примерно соответствует глубине распространения под поверхностью максимальных касательных напряжений.

В зависимости от соотношения нормальной и тангенциальной составляющих сил в контакте, а также от структуры материала и его физико-механических свойств первичная микротрещина может зародиться и в подповерхностном слое. В этом случае механизм разрушения поверхности можно представить следующим образом (рис. 8.8, б): 1 – зарождаются поверхностные дислокации; 2 – идет процесс накопления дислокаций; 3 – образуются полости; 4 – слияние полостей ведет к образованию микротрещин, параллельных поверхности трения; 5 – при достижении микротрещиной некоторой критической длины отделяется частица износа. Подповерхностные микротрещины зарождаются, как правило, у деталей с неоднородной структурой материала: азотированных, цементованных, поверхностно закаленных, а также у деталей, работающих при очень больших контактных напряжениях.

*Увеличение контактной выносливости достигается:*

- повышением вязкости масла;
- улучшением чистоты обработки поверхности;

- снижением удельной нагрузки в зоне контакта;
- повышением предела прочности материала детали;
- применением методов поверхностного упрочнения (химико-термическая обработка и поверхностная закалка с нагревом ТВЧ).

### **8.1.2. Молекулярно-механическое изнашивание**

Молекулярно-механическое изнашивание – это изнашивание в результате одновременного механического воздействия и молекулярных сил. В практике встречается во многих узлах трения – в опорах скольжения и качения, зубчатых передачах, муфтах, направляющих, кулачковых механизмах.

Силовое взаимодействие твёрдых тел объясняет молекулярно-механическая или, другими словами, адгезионно-деформационная теория. Из-за шероховатости и волнистости трущихся поверхностей контакт осуществляется в отдельных пятнах касания диаметром от 0,1 до 20...30 мкм, расположенных на вершинах волн, на которых происходит деформация.

Адгезионное взаимодействие связано с образованием на участках контакта адгезионных мостиков сварки.

Различают три вида механического взаимодействия: упругое контактирование; пластическое деформирование и микрорезание (рис. 8.9, а, б, в соответственно).

Интенсивность износа минимальна при упругом контакте.

При пластическом деформировании интенсивность износа резко возрастает. В результате пластической деформации происходит упрочнение участков, что способствует хрупкому разрушению.

Микрорезание относится к недопустимым процессам изнашивания, так как вызывает интенсивное разрушение поверхностного слоя.

Возможны два вида адгезионного взаимодействия: схватывание и разрушение поверхностных плёнок (рис. 8.9, г); схватывание металлических поверхностей, сопровождающееся заеданием и срезом менее прочного материала (рис. 8.9, д).

При первом виде взаимодействия срез адгезионных связей происходит по оксидным плёнкам, которыми всегда покрыты трущиеся поверхности. Это наиболее благоприятный вид адгезионного изнашивания, при котором процессы разрушения локализуются в тончайших поверхностных слоях.

Сцепление металлических поверхностей возникает между чистыми от плёнок (ювенильными) поверхностями трения, например, в ус-

ловиях вакуума или при разрушении плёнок пластической деформацией в местах контакта. Атомы контактирующих материалов сближаются настолько, что начинают действовать межатомные силы сцепления. Этот процесс иногда называют *холодной сваркой*. Между очищенными участками образуются адгезионные связи, которые по прочности превосходят прочность одного из материалов пары трения. Срез происходит в менее прочном материале в глубине от места схватывания.

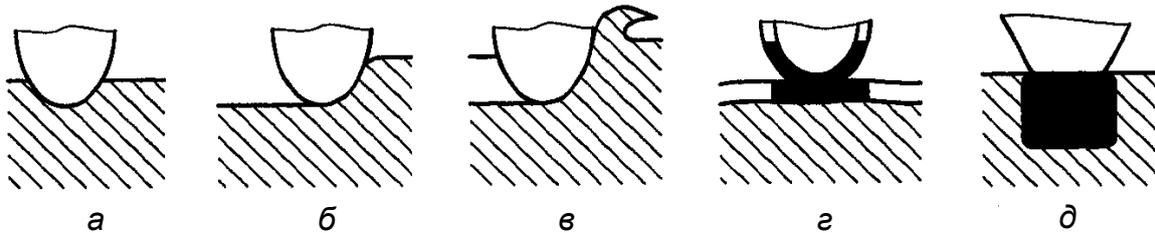


Рис. 8.9. Виды взаимодействия поверхностей трения: а – упругое контактирование; б – пластическое деформирование; в – микрорезание; г – схватывание и разрушение поверхностных плёнок; д – схватывание и глубинное вырывание

На одной поверхности трения образуются углубления, на другой – вырванные частицы, которые повторно схватываются и бороздят трущиеся поверхности, вызывая их интенсивное разрушение (рис. 8.10).

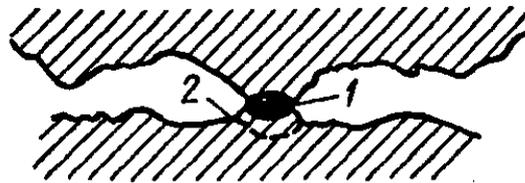


Рис. 8.10. Схема формирования узла схватывания: 1 – узел схватывания; 2 – линия разрыва материала [6]

Если процесс адгезионного износа проходит интенсивно и имеет место перенос значительного количества металла, это явление называется *заеданием* металла. Если оно очень интенсивно, то поверхности могут слипаться на значительном участке, и в этом случае внешние силы уже не смогут вызвать смещения их относительно друг друга; это явление называется *схватыванием*.

В зависимости от условий трения, при которых пластическая деформация разрушает оксидные плёнки, различают две разновидности схватывания: холодное (I-го рода) и тепловое (II-го рода).

**Схватывание I-го рода** развивается при малых скоростях скольжения (0,005–0,2 м/с) поверхностей трения и высоком давлении

(5–100)·10<sup>5</sup> Па, превышающем предел текучести при отсутствии смазки и защитной плёнки окислов.

**Схватывание II-го рода** – при высоких скоростях скольжения (> 0,6 м/с) и давлениях, вызывающих интенсивный разогрев (до 500–1500°С) и разупрочнение поверхностных слоёв.

Для предупреждения схватывания металлические поверхности разделяют жидким, твёрдым (иногда газовым) смазочным материалом. Однако смазочные материалы постепенно расходуются и адгезионное изнашивание часто возникает при недостаточном количестве смазочного материала или его отсутствии. Молекулярно-механическая теория трения определяет два основных *пути повышения износостойкости*:

- *повышение твёрдости трущейся поверхности*, чтобы затруднить пластическую деформацию и исключить микрорезание поверхностей трения;

- *снижение прочности адгезионной смазки*, что необходимо для предупреждения схватывания металлических поверхностей.

В этих условиях решающее значение приобретает *обеспечение совместимости трущейся пары*. Под *совместимостью* понимают свойство материалов предотвращать схватывание при работе без смазочного материала или в условиях нарушения сплошности масляного слоя.

*Совместимость достигается несколькими способами:*

1. *Использование защитных свойств оксидных плёнок*. Если оксид твёрд и прочен, а нижележащий слой мягок, то плёнка легко разрушается и схватывание развивается при малой нагрузке. Тонкие прочные плёнки, способные деформироваться с металлом при большой нагрузке, образуют хром, сталь и медь.

Стойкость к схватыванию закалённых сталей значительно выше, чем нормализованных и отожжённых. По этой причине закалённые стали и стали, упрочнённые химико-термической обработкой, – основной материал для одной из сопряжённых деталей пары трения.

Стойкость к схватыванию таких сталей повышают сульфидированием и фосфатированием. После этих процессов формируется плёнка, которая в начальный момент, легко разрушаясь, улучшает прирабатываемость и снижает коэффициент трения, а в тяжёлых условиях трения способна изменяться, образовывать вторичные структуры сложного состава и повышенной износостойкости.

В условиях теплового схватывания защитные свойства оксидных плёнок зависят от способности подложки сохранять высокую твёр-

дость при нагреве. В таких случаях следует применять теплостойкие материалы.

2. *Подбор материалов пар трения.* Схватывание особо опасно для контакта двух твёрдых материалов. В случае разрушения защитных оксидных плёнок оно приводит к значительному повреждению обеих поверхностей трения. При сочетании твёрдого и мягкого материалов схватывание проявляется в менее опасной форме.

Для сталей и чугунов в условиях трения скольжения лучшими материалами сопряжённой детали служат те цветные металлы и сплавы, которые имеют в структуре мягкую или легкоплавкую составляющую, способную проявлять защитную реакцию и предупреждать повреждение сопряжённой поверхности. Сплавы с мягкой структурной составляющей применяются для червячных передач и подшипников скольжения. Например, для предупреждения схватывания червяк выполняют из стали с высокой твёрдостью поверхности (45–60 HRC), а червячное колесо – из оловянистой бронзы, имеющей мягкую составляющую.

Олово, свинец, а также медь используют в качестве тонкослойных покрытий одной из поверхностей трения. Их создают в сопряжениях сталь–сталь, сталь–чугун, добавляя в жидкий смазочный материал присадки в виде порошков этих металлов. При определённых условиях трения присадки формируют на стальной поверхности плёнку мягкого металла, которая защищает сталь от износа.

3. *Разделение поверхностей трения плёнками полимеров* (фторопласта, полиамида и др.), которые отличаются низкой адгезией металлов.

### **8.1.3. Коррозионно-механическое изнашивание**

Этот вид изнашивания характеризуется процессом трения материала, вступившего в химическое взаимодействие со средой. При этом на поверхности металла образуются новые менее прочные химические соединения, которые в процессе работы сопряжения удаляются с продуктами износа. К коррозионно-механическому изнашиванию относят окислительное изнашивание и изнашивание при фреттинг-коррозии.

**Окислительное изнашивание** возникает вследствие химической реакции материала с кислородом или окружающей средой. Этому виду изнашивания подвергаются детали, работающие без смазки (детали шарнирно-болтовых соединений и рычагов механизмов управления, металлические колёса фрикционных передач и др.), а

также при трении со смазочным материалом. Скорость окислительного изнашивания невелика и составляет 0,05–01 мкм/ч.

В процессе трения в воздушной среде (сухое трение), в условиях контакта со смазкой (граничное или жидкостное трение) контактирующие поверхности металлов окисляются. Наличие окислов позволяет исключить схватывание контактирующих поверхностей, стабилизирует износ, повышает износостойкость. При нормальном окислительном изнашивании окисная плёнка разрушается, после чего она легко восстанавливается, процесс повторяется многократно. При низких скоростях скольжения новые окисные плёнки не успевают образовываться, что сопровождается интенсивным молекулярным взаимодействием поверхностей. С повышением скорости скольжения растёт температура в зоне контакта до 200–900°C, возрастает скорость окисления, и образующиеся окисные плёнки изолируют металлические поверхности, схватывание прекращается.

Нормальный окислительный износ представляет установившийся стационарный процесс динамического равновесия разрушения и восстановления окисных плёнок и характеризует нормальные условия эксплуатации узлов трения. Образование толстых плёнок окислов, предельно насыщенных кислородом и обладающих повышенной хрупкостью, снижает износостойкость.

**Фреттинг-коррозия** – это изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях с амплитудой 0,025 мкм.

Этот вид изнашивания развивается на поверхности валов в местах насадки шестерён, подшипников качения, а также в шлицевых, шпоночных и шарнирных соединениях, на поверхности рессор.

Повреждения поверхностей имеют вид ямок и язв, которые, как и питтинг, опасны тем, что существенно снижают сопротивление усталости.

Механизм фреттинг-коррозии заключается в следующем. Окисление металла происходит с увеличением объёма, что приводит к местному увеличению давления в сопряжённых замкнутых контурах. Это способствует разрушению окисных плёнок и тогда возможно схватывание в зоне контакта с последующим образованием питтингов износа. Кроме того, окислы, имеющие большую твёрдость, чем основной металл, оказывают абразивное действие. Так, например, разрушение закалённой стали при трении алюминия объясняется образованием в зоне контакта корунда ( $Al_2O_3$ ), твёрдость которого больше твёрдости закалённой стали.

*Основные методы защиты* от этого вида изнашивания:

- повышение твёрдости поверхностей (цементация, азотирование);
- применение смазочных материалов и плёночных покрытий из полимеров, затрудняющих металлический контакт поверхностей трения и доступ к нему кислорода.

#### **8.1.4. Избирательный перенос**

*Избирательный перенос (ИП)* – вид трения, который происходит за счет самопроизвольного образованием в зоне контакта поверхностей тонкой неокисляющейся металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу.

Эффект избирательного переноса впервые был обнаружен в середине 1950-х годов советскими учеными Д.Н. Гаркуновым и И.В. Крагельским при трении медных сплавов о сталь в условиях граничной смазки. Был открыт эффект спонтанного образования тонкой пленки меди на поверхности деталей в парах «сталь – бронза», работающих в спиртоглицериновой смазке. Пленка толщиной 1–2 мкм, которая покрывала и сталь и бронзу, в десятки раз снижала силу трения и износ деталей. Это явление также было выявлено в парах «сталь – бронза» со смазкой ЦИАТИМ-201 и в паре «сталь – сталь» в узлах компрессора холодильников при смазке масло-фреоновой смесью.

Позже было установлено, что в паре «сталь – бронза» происходит анодное растворение бронзы (то есть легирующие элементы переходят в смазку), и поверхность бронзовой детали обогащается медью, которая затем в процессе трения переносится на поверхность стальной детали.

Металлическую медную пленку, образующуюся в процессе трения, называют «сервовитной» (от лат. *servo-witte* – спасти жизнь). Она образуется в зоне трения в результате электрохимических процессов, развивающихся при трении в системе сталь – смазочный материал – медный сплав, которую можно рассматривать как гальванический элемент. Электрохимические процессы, протекающие при трении, приводят к резкому изменению структуры поверхностных слоев материала. В результате в поверхностном слое меди зарождается большое число вакансий и дислокаций, которые приводят к образованию в зоне контакта рыхлой медной суспензии, обладающей высокой пластичностью и малыми сдвиговыми сопротивлениями. Вследствие наличия сил молекулярного взаимодействия и схватывания в процессе трения сервовитная пленка переносится на стальную поверхность, способствует

сглаживанию шероховатости поверхности и, заполняя впадины микронеровностей, образует защитный слой. При этом в 100 раз возрастает фактическая площадь контакта и приближается к номинальной, равномерно перераспределяется давление по всей рабочей поверхности.

При деформировании сервовитная пленка не разрушается и не подвергается усталостному разрушению. Она воспринимает все нагрузки, покрывая шероховатость поверхностей стальных деталей, которые практически не участвуют в процессе трения.

Рыхлая структура сервовитной пленки обеспечивает диффузионно-вакансионный механизм сдвига, при котором деформация пленки в процессе трения происходит без накопления остаточных напряжений и дефектов. Поэтому коэффициент трения уменьшается до значения, соответствующего трению со смазочным материалом, а усталостные изменения структуры материала исключаются. Таким образом, при избирательном переносе реализуются условия положительного градиента механических свойств материала по нормали к поверхностям трения.

Избирательный перенос обеспечивает практически безыносную работу сопряжения вследствие эффекта автокомпенсации износа, который заключается в том, что частицы износа не уходят из зоны трения, а взаимодействуя со смазочным материалом, образуют суспензию, покрывающую рабочую поверхность. В условиях избирательного переноса линейная интенсивность изнашивания составляет  $10^{-12}$ .

Для реализации явления избирательного переноса при трении необходимо наличие в смазочной среде поверхностно-активных веществ. Поверхностно-активные вещества (ПАВ) вводят в смазочные материалы в виде присадок. Они характеризуются тем, что их молекулы или ионы концентрируются под действием молекулярных сил (адсорбируются) у поверхности. Поверхностно-активные вещества в составе смазочного материала, вступая в физико-химическое взаимодействие с металлом (медью), вызывают явления пластифицирования. Это явление впервые было обнаружено советским ученым П.А. Ребиндером и получило название «эффект Ребиндера». Эффект Ребиндера заключается в снижении прочности, разрыхлении поверхности твердого тела и облегчении ее деформации под влиянием адсорбции поверхностно-активных компонентов.

Сопоставляя процессы, происходящие в условиях избирательного переноса, и процессы в материалах при обычном трении, можно отметить, что если при обычных процессах трения схватывание явля-

ется вредным, разрушительным явлением, то при избирательном переносе в сопряжениях с автокомпенсацией износа схватывание обеспечивает перенос частиц более мягкого, разрыхленного металла на противоположную твердую (стальную) поверхность и создает условия безызносности. Вследствие разрыхления поверхности металла и создания сервовитной пленки схватывание не увеличивает силы трения и не вызывает повреждения рабочих поверхностей.

Если при обычном трении смазочный материал рассматривается как защитный слой по отношению к твердым поверхностям, то при избирательном переносе он выполняет роль разрыхляющей среды, превращающей верхние слои в квазижидкое состояние.

Если при обычном трении вследствие высоких давлений и температур поверхностные слои материала приближаются к аморфному состоянию из-за пластических деформаций, то при избирательном переносе они сохраняют кристаллическую структуру.

Эффект избирательного переноса возможен не только в парах медь – сталь, но и в сочетаниях: бронза – сталь, пластмасса – сталь, сталь – сталь, алюминий – чугун и др. Для создания условий избирательного переноса в узлах трения применяют: соответствующие жидкие и пластичные смазочные материалы, обеспечивающие возникновение сервовитных пленок; латунирование одного из элементов сопряжения; металлоплакирующие пластичные смазочные материалы для пары сталь – сталь; композиционные материалы; пластмассы с наполнителем  $\text{Cu}_2\text{O}$  для пары пластмасса – сталь.

В настоящее время в условиях избирательного переноса уже работают некоторые узлы трения автомобилей, самолетов, станков и промышленного оборудования. К таким узлам трения относятся тяжело нагруженные шарнирно-болтовые соединения, ступицы колес, подшипники поворотных цапф ходовой части автомобиля, сопряжения винт – гайка и др.

### **8.1.5. Водородное изнашивание**

**Водородное изнашивание** – процесс разрушения металлического элемента пары трения вследствие поглощения металлом водорода. Явление водородного изнашивания также открыто советскими учеными Д.Н. Гаркуновым и А.А. Поляковым.

Водородное изнашивание по масштабам проявления занимает одно из первых мест среди всех видов изнашивания. Водородное из-

нашивание, как правило, сопровождается абразивное, коррозионно-механическое изнашивания, фреттинг-коррозию и др.

Водород присутствует почти во всех химических соединениях. Он попадает в металл при выплавке, в результате коррозии, в ходе химико-термической обработки деталей, гальванических процессов, смазывания, травления. В узлах трения в процессе работы всегда выделяется водород. В зоне контакта в условиях повышенной температуры смазочные материалы, топливо, пластмасса и другие углеводородные соединения, а также вода из воздуха выделяют водород. Водород имеет свойство концентрироваться в нагретых местах, поэтому в процессе трения он сосредоточивается в поверхностных слоях металлов. Некоторая часть водорода просачивается в пространственные дефекты металла. В зародышах микротрещин протоны водорода постепенно образуют молекулы. Увеличиваясь в размерах, они с огромной силой распирают поверхность в месте дефекта. В результате такого расклинивающего действия микротрещины сливаются одна с другой, происходит интенсивное охрупчивание металла и разрушение поверхности.

Водородное изнашивание проявляется в той или иной степени практически во всех узлах трения. Разрушению этого вида подвержены детали из стали, чугуна, титана и других металлических материалов. Вследствие водородного изнашивания часто выходят из строя коленчатые валы двигателей, элементы стальных цистерн. Во влажном и холодном климате процесс водородного разрушения интенсифицируется, поэтому, например, в условиях Севера техника изнашивается в несколько раз быстрее, чем в средней полосе.

Для борьбы с водородным износом необходимо по возможности исключить из состава узлов трения те пластмассы и смазочные материалы, которые склонны к интенсивному выделению водорода. *Введение кремния и органических соединений, содержащих хлор, вызывает связывание водорода в металле в безвредные химические соединения.* Процесс проникновения водорода в поверхностные слои металла можно затормозить, уменьшив рабочую температуру поверхности до 50-60 °С или создав электрический потенциал. Водород из металла после химико-термической обработки деталей удаляют при их нагреве и выдержке при температуре около 250°С.

Эффективной защитой от водородного изнашивания может быть избирательный перенос (ИП). Образующаяся при ИП медная пленка снижает нагрузку до уровней, при которых образование водорода практически не происходит. Кроме того, медная пленка является хорошей защитой от проникновения водорода в сталь.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Что называют износом?
2. Какие процессы сопровождают трение?
3. По каким признакам классифицируют трение?
4. Перечислите виды изнашивания.
5. В каких условиях происходит коррозионно-механическое изнашивание?
6. Назовите три основных периода износа.
7. Что понимают под внешними факторами, приводящими к изнашиванию?
8. Чем обусловлено изнашивание сопряжённых деталей?
9. Какова интенсивность износа при упругом контакте?
10. Почему микрорезание относится к недопустимым процессам изнашивания?
11. Какое явление называется заеданием металла?
12. Опишите сущность избирательного переноса.
13. Как образуется серовитная пленка, её назначение?
14. В чём заключается эффект безыносности?
15. В чём суть «эффекта Ребиндера»?
16. Что такое водородное изнашивание металлов и как оно происходит?
17. Чем опасно водородное изнашивание? Опишите меры борьбы с ним.

## Глава 9. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Смазочный материал* – материал, вводимый на поверхность трения, в контакт трущихся тел для уменьшения силы трения и интенсивности изнашивания. Во фрикционных передачах и устройствах смазочный материал вводят для одновременного увеличения силы трения и уменьшения интенсивности изнашивания. *Смазка* – действие смазочного материала в контакте трущихся тел, приводящее к уменьшению интенсивности (скорости) изнашивания и силы трения. *Смазывание* – подведение смазочного материала к поверхности трения.

*Трибология* – наука о явлениях, закономерностях и процессах трения, изнашивания и смазки. *Триботехника* включает в себя прикладную часть трибологии, методы и средства обеспечения работоспособности узлов трения.

*Виды смазки* различаются по физическому состоянию смазочного материала (газовая, жидкостная, твердая) и по условиям разделения поверхностей трения смазочным слоем: гидродинамическая (газодинамическая), гидростатическая (газостатическая), эластогидродинамическая, граничная, полужидкостная (смешанная). Гидродинамическая (газодинамическая) смазка приводит к полному разделению поверхностей под действием давлений, самовозникающих в слое жидкости (газа) при относительном движении тел. В условиях гидростатической (газостатической) смазки полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате действия жидкости (газа) в зазоре между поверхностями трения путем подвода ее под внешним давлением. При эластогидродинамической смазке на процессы в контакте трущихся тел влияют не только реологические свойства смазочного материала, но и упругие свойства материалов твердых тел. Граничный вид смазки относится к случаю, при котором трение и износ определяются свойствами поверхностей твердых тел и физико-химическими свойствами смазочного материала. Смешанный режим смазки характеризует существование в контакте одновременно нескольких указанных ранее видов смазки. Используются различные методы смазывания: непрерывное, периодическое, циркуляционное, ресурсное, под давлением, погружением, масляным туманом, капельное.

*Магнитопорошковый метод* смазывания применяется при использовании магнитных полей для непрерывной подачи на поверхности трения смазочного материала и циркуляции его внутри механизма. Смазочная пленка не только прочно соединяется с основным материа-

лом, но и постоянно восстанавливается в процессе работы узла трения. Порошкообразные магнитоактивные смазочные материалы получают путем введения в твердосмазочную основу ферромагнитных компонентов, например, эффективны материалы на основе дисульфида молибдена, диселенида молибдена с добавлением никеля, кобальта, железа и др. Применение магнитопорошкового метода смазывания позволило увеличить ресурс зубчатых передач в 10 раз по сравнению с самосмазывающимися материалами и покрытиями.

Существуют *смазочные материалы жидкие, пластичные, газообразные, твердые*. По своему происхождению масла разделяются на минеральные, нефтяные, растительные, животные, синтетические; применяются с присадками (легированные) и без присадок (нелегированные).

*Присадки* представляют собой жидкие или твердые вещества, добавляемые к смазочному материалу для улучшения его качества. Используются различные виды присадок: противоизносные, противозадирные, антикоррозионные, антиокислительные, депрессорные, понижающие температуру застывания смазочного материала, противопенные и др.

*Вязкость смазочного материала* определяет объемное свойство оказывать сопротивление относительно перемещению его слоев. Безразмерная величина, характеризующая по стандартной шкале чувствительность масла к температуре, называется *индексом вязкости*. Высокому индексу соответствует меньшее изменение вязкости и температуры. Применяют смазочные масла моторные, газотурбинные (реактивные), трансмиссионные, промышленные и др. Смазочные масла уменьшают трение, износ, предотвращают задир поверхностей, отводят теплоту от трущихся узлов, защищают детали от коррозионного воздействия внешней среды, удаляют продукты изнашивания.

Наибольшее распространение получили *нефтяные масла*. Для низких и высоких температур все большее применение находят *синтетические масла*, например кремнийорганические жидкости (полисилоксаны), сложные эфиры, полигликоли, фтор- и хлорорганические жидкости.

Антифрикционные, противоизносные, противозадирные присадки к смазочным маслам содержат различные активные элементы: серу, фосфор, хлор и др. Эффективность действия присадок зависит от физико-химических свойств и состава базового масла.

*Пластичные смазки* представляют собой трехкомпонентные коллоидные системы, содержащие дисперсионную среду (70...90%,

жидкая основа), дисперсную фазу (10...15%, загуститель), модификаторы структуры, добавки, присадки, наполнители (1...15%).

В качестве дисперсионной среды используют нефтяные, синтетические масла. Загустителями служат соли высокомолекулярных жирных кислот – мыла, твердые углеводороды и др.

По разнообразию объектов и узлов трения, в которых применяются пластичные смазки, они превосходят жидкие смазочные материалы. Пластичные смазки снижают трение, износ, предотвращают задиры, защищают от коррозии, уплотняют зазоры, снижают вибрацию, шум, удары.

Для фрикционных передач и *высокоскоростных опор качения* создают специальные жидкости (масла), позволяющие получить повышенное значение коэффициента трения скольжения и уменьшить износ. Широкое распространение получили опоры с газовой смазкой, минимальными потерями на трение и повышенной износостойкостью – в турбокомпрессорах, турбодетандерах, гироскопах, быстроходных шпиндельных узлах металлорежущих станков, вентиляторах, приборном и специальном оборудовании. На практике используют различные газовые среды: воздух, аргон, гелий, углекислый газ и др. Возможность применения опор с газовой смазкой в широком диапазоне изменения скоростей (0...100 м/с), температур, в различных газовых средах, практическая безызносность обеспечивает широкую перспективу их промышленного использования.

Для различных узлов машин эффективно применение магнитного подвеса, который открывает возможность создания механизмов, работающих без взаимного механического контакта, бесшумно, с минимальными потерями на трение, практически неограниченно во времени. В качестве подшипниковых материалов наиболее распространены металлические антифрикционные материалы (оловянистые, свинцовые, медные, алюминиевые и цинковые сплавы, антифрикционные чугуны и др.).

В экстремальных условиях работы пар трения широко используются антифрикционные износостойкие покрытия и самосмазывающиеся композиционные материалы. Такими условиями являются, например, трение деталей машин без жидкого смазочного материала в вакууме, при криогенных температурах, при низких (ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ ) и высоких (выше  $+300^{\circ}\text{C}$ ) температурах, при действии радиации, в коррозионных средах, в среде жидкометаллических теплоносителей, при смазывании водой и различными растворами.

**Твердые смазочные материалы** имеют высокую прочность сцепления с основой и низкое сопротивление на сдвиг, радиационно стойки, слабо испаряются в глубоком вакууме. Они не загрязняют другие детали механизмов, просто наносятся на трущиеся поверхности, обладают высокой несущей способностью, особенно для стационарных контактов. Однако в процессе изнашивания твердые смазочные материалы не восстанавливаются, поэтому обладают ограниченным ресурсом, зависящим от толщины смазочной пленки и условий эксплуатации. Применяются при низких, криогенных и высоких (превышающих  $1\ 000^{\circ}\text{C}$ ) температурах, в низкоскоростных узлах трения, в режимах пуска и останова механизмов, когда жидкие и пластичные смазочные материалы не обладают необходимой несущей способностью, защищают поверхности трения от схватывания. К твердым смазочным материалам относят графит, дисульфид молибдена, нитрид бора, сульфиды, селениды, хлориды, фториды, иодиды, оксиды металлов, мягкие металлы (Au, Ag, Pb, In, Cd, Cu, Co и др.), органические вещества (пластмассы, полиамиды, полиимиды и др.). Применяют их в виде пленок, наносимых натиранием, твердых смазочных покрытий, прессованных таблеток и брикетов, в качестве смазывающих карандашей в ротапринтных узлах трения, в составе композиционных самосмазывающихся материалов.

**Антифрикционные самосмазывающиеся материалы** находят широкое применение в различных узлах трения: в подшипниковых опорах, шарнирах, зубчатых передачах, направляющих и др. Используют антифрикционные самосмазывающиеся пластмассы, полимеры, содержащие в своем составе антифрикционные, армирующие и другие наполнители. Широко используют металлофторопластовые ленточные материалы, тканевые антифрикционные материалы, покрывающие трущиеся поверхности. Металлофторопластовая лента имеет высокие несущую способность и антифрикционные характеристики. Детали, изготовленные из ленты (с малым объемом и массой), устойчивы к коррозии при действии растворителей, работают в широком диапазоне температур (от  $-200$  до  $+280^{\circ}\text{C}$ ). *Ленты на основе антифрикционных тканей* из химических волокон (фторопластовых, полиамидных нитей и др.) получают путем пропитки их клеевым связующим с наполнителями. Толщина ткани ленты  $0,08\text{--}1,5$  мм. После крепления непосредственно на поверхность трения узел выдерживает давление  $500\text{--}600$  МПа и работает в широком диапазоне температур от  $-200$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ . *Композиционные порошковые антифрикционные*

*материалы* имеют высокую износостойкость, жаропрочность, твердость и коррозионную стойкость. Применяют железобитумные, бронзобитумные материалы, железоникелевые сплавы, сульфидированные, сульфоборированные, коррозионностойкие стали.

Выбор оптимального вида смазочного материала – сложная задача, не менее ответственная, чем выбор конструкционных материалов для деталей машин. Неправильный выбор смазки может привести к аварийным ситуациям и катастрофам.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что изучает трибология?
2. Как принято различать виды смазки?
3. В каких случаях применяют магнитопорошковый метод смазывания?
4. В каком агрегатном состоянии могут находиться смазочные материалы?
5. С какой целью используют присадки к смазочным материалам?
6. Какими особенностями обладают твердые смазочные материалы?
7. Где применяют антифрикционные самосмазывающиеся материалы?

## Глава 10. ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### 10.1. Материалы с высокой твердостью поверхности

Высокая твердость поверхности – необходимое условие обеспечения износостойкости при большинстве видов изнашивания. При абразивном, окислительном, усталостном видах изнашивания наиболее износостойки стали и сплавы с высокой твердостью поверхности. При работе в условиях больших давлений и ударов наибольшей работоспособностью обладают аустенитные стали с низкой исходной твердостью, но способные из-за интенсивного деформационного упрочнения (наклепа) формировать высокую твердость поверхности в условиях эксплуатации.

#### 10.1.1. Материалы, устойчивые к абразивному изнашиванию

Износостойкость при абразивном изнашивании чистых металлов (рис. 10.1) пропорциональна их твердости  $\varepsilon = b \cdot HB$  ( $\varepsilon$  – относительная износостойкость, определяемая в сравнении с образцом-эталоном;  $b$  – коэффициент пропорциональности). В сплавах эта зависимость может не соблюдаться.

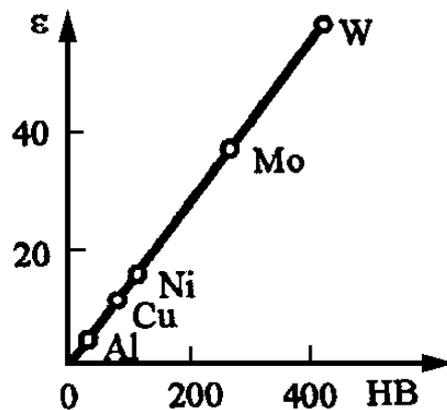


Рис. 10.1. Относительная износостойкость  $\varepsilon$  металлов с различной твердостью

При абразивном изнашивании ведущими являются процессы многократного деформирования поверхности скользящими по ней частицами и микрорезание. Степень развития этих процессов зависит от давления и соотношения твердости материала и абразивных частиц. Так как твердость последних велика, то наибольшей износостойкостью обладают материалы, структура которых состоит из частиц

твердой карбидной фазы и удерживающей их высокопрочной матрицы. Такую структуру имеет большая группа сталей и сплавов.

*Карбидные сплавы* применяют при наиболее тяжелых условиях работы в виде литых и наплавочных материалов. Для наплавки на поверхность деталей используют прутки из этих сплавов, которые нагревают ацетиленокислородным пламенем или электродугой.

В промышленности используют более ста сложных по химическому составу литых и наплавочных материалов. Они представляют собой сплавы с высоким содержанием углерода (до 4%) и карбидообразующих элементов (Cr, W, Ti). В их структуре может быть до 50% специальных карбидов, увеличение количества которых сопровождается ростом износостойкости.

Структуру матричной фазы регулируют введением марганца или никеля. Она может быть мартенситной, аустенитно-мартенситной и аустенитной.

*Для деталей, работающих без ударных нагрузок*, применяют сплавы с мартенситной структурой. К ним относятся сплавы типа 250X38, 320X23Г2С2Т (первые три цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента).

*Детали, работающие при значительных ударных нагрузках* (зубья ковшей экскаваторов, пики отбойных молотков и др.), изготавливают из сплавов с повышенным содержанием марганца с аустенитно-мартенситной (370X7Г7С) или аустенитной (110Г13, 300Г34) матрицей.

*Для деталей машин, работающих при средних условиях изнашивания*, применяют *твердые сплавы*, структура которых состоит из специальных карбидов (WC, TiC, TaC), связанных кобальтом, а также высокоуглеродистые стали типа X12, X12M, P18, P6M5 со структурой мартенсит + карбиды. Эти материалы относятся к инструментальным.

*Низко- и среднеуглеродистые стали* с различными видами поверхностного упрочнения и чугуны применяют для более легких условий изнашивания, в частности, для деталей, работающих в условиях граничной смазки (*гильзы цилиндров, коленчатые валы, поршневые кольца* и пр.), где абразивное изнашивание сопутствует другим его видам, например окислительному.

Для сохранения работоспособности узлов трения материал детали должен хорошо противостоять истиранию частицами, являющимися продуктами изнашивания или попадающими в смазочный материал извне. Этим требованиям удовлетворяют низкоуглеродистые стали, упрочняемые цементацией, а также среднеуглеродистые стали,

упрочняемые азотированием или поверхностной закалкой с нагревом ТВЧ. В порядке возрастания износостойкости упрочненные поверхностные слои этих сталей располагаются в следующей последовательности: закаленные, цементованные, азотированные.

### ***10.1.2. Материалы, устойчивые к усталостному виду изнашивания***

Эти материалы предназначены для таких изделий массового производства, как подшипники качения и зубчатые колеса. Усталостное выкрашивание на их рабочих поверхностях вызывают циклические контактные напряжения сжатия. Они создают в поверхностном слое мягкое напряженное состояние, которое облегчает пластическое деформирование поверхностного слоя деталей и, как следствие, развитие в нем процессов усталости. В связи с этим высокая контактная выносливость может быть обеспечена лишь при высокой твердости поверхности, необходимой также для затруднения истирания контактных поверхностей при их проскальзывании.

#### ***Подшипниковые стали***

Подшипники качения работают, как правило, при низких динамических нагрузках, что позволяет изготавливать их из сравнительно хрупких высокоуглеродистых сталей после сквозной закалки и низкого отпуска. Для производства шариков, роликов и колец подшипников применяют недорогие технологичные хромистые стали ШХ4, ШХ15, ШХ15ГС и ШХ20ГС, содержащие примерно 1% С (ГОСТ 801-78). В обозначении марок буква Ш означает подшипниковую сталь; Х – наличие хрома; число – его содержание в процентах (0,4; 1,5; 2,0); ГС – легирование марганцем (до 1,7%) и кремнием (до 0,85%).

Прокаливаемость сталей увеличивается по мере повышения концентраций хрома. Сталь ШХ15 предназначена для изготовления деталей подшипников поперечным сечением 10–20 мм; более легированные стали ШХ15СГ и ШХ20СГ – для деталей, прокаливаемых на большую глубину (свыше 30 мм).

Стали поставляют после сфероидизирующего отжига со структурой мелкозернистого перлита (179–217 НВ) и повышенными требованиями к качеству металла. В них строго регламентированы карбидная неоднородность и загрязненность неметаллическими включениями, так как, выходя на рабочую поверхность, они служат концентраторами напряжений и способствуют более быстрому развитию усталостного выкрашивания.

Для изготовления *высокоскоростных подшипников* применяют стали после электрошлакового переплава (к марке таких сталей добавляют букву Ш, например ШХ15-Ш), отличающиеся наибольшей однородностью строения. Такие стали необходимы также для изготовления высокоточных приборных подшипников, детали которых тщательно полируют с тем, чтобы обеспечить минимальный коэффициент трения. Это возможно лишь при высокой чистоте металла по неметаллическим включениям.

Детали подшипников подвергают типичной для заэвтектоидных сталей термической обработке: неполной закалке от 820–850°C и низкому отпуску при 150–170°C. После закалки в структуре сталей сохраняется остаточный аустенит (8–15%), превращение которого может вызвать изменение размеров деталей подшипников. Для их стабилизации *прецизионные подшипники обрабатывают холодом* при минус 70–80°C. Окончательно обработанная подшипниковая сталь имеет структуру мартенсита с включениями мелких карбидов и высокую твердость (60–64 HRC).

Сталь ШХ4 характеризуется *ограниченной прокаливаемостью* и предназначена для роликовых подшипников железнодорожного транспорта. При закалке ее подвергают сквозному индукционному нагреву и охлаждению водой. Кольца из этой стали толщиной 14 мм закаливаются только с поверхности в слое 2–3 мм, поэтому благодаря сохранению вязкой сердцевины они могут работать при динамической нагрузке.

Детали *крупногабаритных роликовых подшипников* диаметром 0,5–2 м (для прокатных станов, электрических генераторов) изготавливают из сталей 12ХНЗА, 12Х2Н4А, подвергая их цементации на большую глубину (3–6 мм).

Для подшипников, работающих в *агрессивных средах*, применяют коррозионностойкую хромистую сталь 95Х18 (0,95% С, 18% Cr).

### **Стали для зубчатых колес**

Основным эксплуатационным свойством смазываемых колес, как и подшипников качения, является *контактная выносливость*. Она определяет габаритные размеры зубчатой передачи и ресурс ее работы. Кроме высокой контактной выносливости от зубчатых колес требуется:

- *сопротивление усталости при изгибе;*
- *износостойкость профилей и торцов зубьев;*
- *устойчивость к схватыванию.*

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют стали, имеющие твердый поверхностный слой, а также вязкую и достаточно

прочную сердцевину, способную противостоять действию ударных нагрузок. Сочетание твердой поверхности и вязкой сердцевины достигается химико-термической обработкой низкоуглеродистых сталей или поверхностной закалкой среднеуглеродистых сталей. Выбор стали и метода упрочнения зависит от условий работы зубчатой передачи, технологических требований и имеющегося оборудования.

**Для зубчатых колес, работающих при высоких контактных нагрузках**, применяют цементуемые (нитроцементуемые) легированные стали. Они имеют наиболее высокий предел контактной выносливости, значение которого устанавливают в зависимости от твердости поверхности (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Предел контактной выносливости  $\sigma H_{limb}$  поверхностей зубьев прямозубых передач (ГОСТ 21354-87)

Стали	Термическая и химико-термическая обработка	Твёрдость поверхности зубьев	Формула для расчёта $\sigma H_{limb}$	$\sigma H_{limb}$ , МПа
Легированные	Цементация и нитроцементация	$\geq 56$ HRC	23HRC	$\geq 1200$
	Азотирование	550–750 HV		1050
Углеродистые и легированные	Поверхностная закалка	40–50 HRC	$17 - HRC + 200$	880–1050
	Объёмная закалка	38–50 HRC	$18 - HRC + 150$	834–1050
	Нормализация, улучшение	$\leq 350$ HB	$0,2 - HB + 70$	$\leq 770$

Твердость цементованной поверхности при концентрации углерода 0,8–1,4% и структуре, состоящей из высокоуглеродистого мартенсита или его смеси с дисперсными карбидами, составляет 58–63 HRC. Излишне высокая твердость нежелательна из-за возможности хрупкого разрушения цементованного слоя. При постоянной твердости поверхности контактная выносливость растет с увеличением толщины упрочненного слоя и твердости сердцевины. Толщину цементованного слоя принимают равной  $(0,20-0,26)t$  (где  $t$  – модуль колеса), но не более 2 мм. Твердость сердцевины составляет 30–42 HRC.

**Сильно нагруженные зубчатые колеса** диаметром 150–600 мм и более изготавливают из хромоникелевых сталей 20ХН3А, 12Х2Н4А, 18Х2Н4МА и др. Их используют в редукторах вертолетов, судов, самолетов. Для мелких и средних колес приборов, сельскохозяйственных машин применяют хромистые стали 15Х, 15ХФ, 20ХР и др.

После цементации и последующей термической обработки зубчатые колеса имеют значительную деформацию. Для ее устранения необходимо зубошлифование, что усложняет технологию.

*В условиях массового производства (авто- и тракторостроение)* применяют экономнолегированные стали 18ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ, 20ХНМ, 20ХГР и др. Их подвергают нитроцементации, которая проводится при несколько меньшей температуре, чем цементация, и сочетается с подстуживанием и непосредственной закалкой. Деформация уменьшается, поэтому зубчатые колеса из таких сталей не шлифуют.

*В условиях серийного производства* получает применение ионная нитроцементация, которая для хромоникелевых (12Х2Н4А, 18Х2Н4МА) и сложнолегированных (20ХЗМВФА и др.) сталей обеспечивает в 2–3 раза более высокую контактную выносливость, чем обычная газовая цементация и нитроцементация.

Азотирование гарантирует высокую твердость поверхности, но из-за небольшой толщины упрочненного слоя возможны подслоиные разрушения. *Азотирование целесообразно применять для средненагруженных зубчатых колес сложной конфигурации*, шлифование которых затруднено. Для азотированных колес используют стали 38Х2МЮА, 40Х, 40ХФА и др.

*Поверхностной и объемной индукционной закалке* с последующим низким отпуском подвергают *зубчатые колеса малых и средних размеров* из сталей с содержанием углерода 0,4–0,5%. Для контурной поверхностной закалки на глубину (0,20–0,25)т используют стали 40, 45, 50Г, 40Х, 40ХН и др. Сердцевина при этом не закаливается и остается вязкой. По нагрузочной способности эти стали уступают цементуемым сталям.

В последнее время для изготовления зубчатых колес автомобилей и станков взамен легированных цементуемых сталей применяют *сталь пониженной прокаливаемости 58* (или 55ПП). Это качественная углеродистая сталь (ГОСТ 1050-88), которая содержит 0,55–0,63% С и минимальное количество примесей (0,15% Cr, 0,20% Mn и 0,30% Si), увеличивающих прокаливаемость. При глубинном индукционном нагреве и интенсивном охлаждении водой детали из этой стали получают только поверхностную закалку. Закаленный слой, как и при цементации, имеет толщину 1–2 мм и высокую твердость (58–62 HRC), плавно снижающуюся к сердцевине. Сердцевина закаливается на троостит или сорбит, имеет твердость 40–30 HRC при достаточной вязкости. Применение этой дешевой стали дает большой экономический эффект.

**Зубчатые колеса, работающие при невысоких нагрузках,** изготавливают из сталей 40, 50, 40Х, 40ХН и других после нормализации и улучшения. Невысокая твердость материала ( $< 350$  НВ) позволяет нарезать зубья после термической обработки, что упрощает технологию изготовления колес.

*Для волновых передач и небольших зубчатых колес, работающих при малых нагрузках и скоростях, применяют неметаллические материалы: текстолиты ПТ и ПТК, древесно-слоистые пластики, полиамиды – капрон, нейлон. Их используют для привода спидометров и распределительных валов автомобилей, киноаппаратов, текстильных и пищевых машин. Достоинство таких зубчатых колес – отсутствие вибраций и шума, высокая химическая стойкость.*

### **10.1.3. Материалы, устойчивые к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок**

Трение при высоком давлении и ударном нагружении характерно для работы траков гусеничных машин, крестовин железнодорожных рельсов, ковшей экскаваторов и других деталей. Их изготавливают из высокомарганцовистой аустенитной стали 110Г13Л, содержащей примерно 1,1% С и 13% Мп. Высокая износостойкость этой стали обусловлена способностью аустенита к сильному деформационному упрочнению (наклепу). Сталь плохо обрабатывается резанием, поэтому детали получают литьем (буква Л в марке стали) или ковкой.

Износостойкость стали 110Г13Л максимальна, когда она имеет однофазную структуру аустенита. Такую структуру обеспечивают закалкой в воде при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$ . После закалки сталь имеет низкую твердость (200 НВ) и высокую вязкость разрушения. Если такая сталь во время работы испытывает только абразивное изнашивание, то оказывается неизносостойкой. В условиях же ударного воздействия в поверхностном слое стали образуется большое количество дефектов кристаллического строения (дислокаций, дефектов упаковки). В результате твердость поверхности повышается до 600 НВ, и сталь становится износостойкой.

Изнашивание, связанное с ударным нагружением поверхности, наблюдается также при кавитации, которая возникает при работе гребных винтов, лопастей гидротурбин, цилиндров гидронасосов. Кавитационное изнашивание создают струи жидкости в момент захлопывания пузырьков газа или воздуха. Образующиеся при этом много-

численные микроудары вызывают развитие процессов усталости, которые усиливаются под влиянием коррозии.

В качестве кавитационно-стойких применяют стали 08X18H10T, 30X10Г10 и другие с нестабильной структурой аустенита. При ударном воздействии аустенит этих сталей испытывает наклеп и частичное мартенситное превращение, на развитие которых расходуется энергия удара. Упрочнение поверхности стали в условиях эксплуатации затрудняет образование трещин усталости.

## 10.2. Графитизированные стали

*Графитизированные стали* имеют характерные включения графита. Несмотря на некоторое снижение твёрдости и прочности включения графита выполняют роль смазочного материала, тем самым повышая износостойкость.

Графитизированные заэвтектоидные стали обычно содержат примерно 1,5% углерода, а также кремний в количестве от 0,7 до 2%. Кремний выполняет роль основного графитизатора при отжиге. Хром препятствует графитизации, поэтому его наличие в этих сталях нежелательно. Механические свойства графитизированных сталей зависят от их структуры (табл. 10.2).

Таблица 10.2

Механические свойства охлаждённых графитизированных сталей

Структура	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$	$KCU$ , Дж/см <sup>2</sup>	НВ
	МПа		%			
Феррит + графит	200...210	360...420	14...24	14...24	0,25...0,4	100...110
Зернистый перлит + графит	280...340	540...590	14...17	14...17	0,2...0,3	220...230
Пластинчатый перлит + графит	490...550	830...940	3...5	3...5	0,06...0,15	220...235

Графитизированные стали обладают хорошими литейными свойствами: высокой жидкотекучестью, небольшой линейной усадкой и малой склонностью к образованию горячих и холодных трещин. Стали обладают хорошей деформационной способностью, поэтому их используют как в литом, так и в деформированном состоянии. Термическая обработка графитизированных сталей состоит из графитизирующего отжига, который обычно проводится в два этапа. Первый этап включает в себя нагрев до 850...950°C с выдержкой от 2 до 12 ч и в зависимости от химического состава, второй – выдержку при

700...780°C. Во время первого отжига проходит графитизация вторичного цементита, в процессе второго – формируется структура металлической основы стали.

Графитизированные стали подвергают операции улучшения, состоящей из закалки и отпуска при 680...700°C. В результате стали получают структуру зернистого перлита (или феррита) и графита.

Графитизированные стали в закалённом состоянии применяют для изготовления формообразующих штампов для холодной штамповки, волочильного инструмента, ножей, бил, шаров и бронефутеровочных плит угольных мельниц, кожухов и лопастей дробеструйных аппаратов, сопел пескоструйных аппаратов. *После отжига эти стали используют для производства вкладышей подшипников скольжения, поршневых колец, тормозных колодок и барабанов.*

### **10.3. Износостойкие порошковые материалы**

К основным принципам создания порошковых износостойких материалов относятся следующие:

1. Структура материала должна быть гетерогенной и состоять из твердых зерен, равномерно распределенных в упругопластической матрице. В этом случае приложенная нагрузка действует в основном на включения твердой фазы, а в матрице происходит релаксация напряжений.

2. Структура материала не должна существенно изменяться в процессе трения или должна перестраиваться в структуру, выгодную с точки зрения трения и износа.

3. Поверхностный слой трущихся материалов должен иметь меньшую прочность, чем нижележащие слои (правило положительного градиента).

4. Поверхностный слой не должен наклёпываться в процессе трения.

5. Под влиянием окружающей среды в материале не должны происходить структурные изменения, ухудшение характеристик прочности и пластичности.

6. В состав материала рекомендуется вводить вещества, способные работать в качестве твердых смазок.

7. Между структурными составляющими материала должна существовать адгезионная связь.

8. Противозадирные добавки не должны значительно снижать прочность материала.

9. Коэффициент трения твердых включений между собой и по материалу матрицы должен быть минимальным.

Микрогетерогенную структуру можно создать введением противозадирных (антисхватывающих) добавок в металлическую матрицу, содержание которых обычно составляет не более 15–25 об. %, а также применением режимов спекания, при которых не успевает произойти гомогенизация материала. Порошковые износостойкие материалы должны быть плотными ( $P < 10\%$ ). Они могут быть получены двойным прессованием и спеканием прессовок, либо горячим прессованием, либо горячей штамповкой, либо пропиткой более тугоплавкой металлической заготовки неметаллическим расплавом и т.д.

*Материалы с неравновесной грубогетерогенной структурой, формируемой в процессе спекания, представляют собой прочную и пластичную металлическую матрицу и равномерно распределённые в ней твёрдые включения оксидов, тугоплавких соединений или интерметаллидов в количестве 15–20 об. %. Такая гетерогенная структура позволяет исключить макросхватывание и повысить износостойкость материалов.*

Не наблюдается схватывание при трении пар стекло-стекло или тугоплавких соединений. Примером таких материалов являются спеченная конструкционная хромистая сталь марки ПЖ420Х3, более износостойкая, чем сталь ШХ15 и цементованная сталь 20Х, использовавшиеся ранее при изготовлении узлов трения.

Созданная как аналог (по химическому составу) стали ШХ15, спеченная сталь ПЖ420Х3 обладает большей износостойкостью, несмотря на то, что имеет пористость 10–12% и уступает ей по прочности и твердости. Испытания в режиме граничного трения со сталью Р9 при скорости 2,5 м/с и давлении 3,4 МПа показали, что материал ПЖ420Х3 по износостойкости превосходит сталь ШХ15 в 5 раз. Промышленное применение порошковых деталей масляного насоса кузнечно-прессового оборудования, изготовленных из стали ПЖ420Х3, позволило повысить ресурс масляного насоса с 3000 до 12000 часов.

Высокой прочностью и износостойкостью обладают порошковые материалы на основе железа, содержащие карбид бора (табл. 10.3).

После спекания порошковые материалы имеют доэвтектоидную мелкозернистую структуру перлита или феррито-перлита с карбоборидами железа, а также расположенную по границам зерен эвтектику. Легированная матрица и дисперсные твердые включения сложных карбидов и боридов обеспечивают повышенную прочность и износостойкость материалов.

Физико-механические свойства и износостойкость материалов  
железо-карбид бора

$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Массовая доля карбида бора, %	НВ, МПа	$\sigma_B$ изгиба, МПа	Повышение износостойкости по отношению к стали 45
1100	0,5	1100	650	3,0
	1,0	1400	700	3,4
	0,5	1300	650	3,3
1200	1,0	1600	680	3,6

Повышенной износостойкостью характеризуются материалы типа железо-феррохром, железо-ферромарганец, железо-ферротитан, железо-карбид титана.

Высокой работоспособностью при высоких температурах обладают износостойкие материалы на основе никеля или кобальта, содержащие в качестве противозадирных добавок оксид магния MgO или муллит  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ . Весьма износостойким при высоких температурах является материал, содержащий 40–65% молибдена, 1–19% вольфрама, 20–55% кремния и 5–20% оксидов циркония, цинка или хрома.

**Металлостеклянные материалы** – порошковые материалы, полученные из смеси порошков металла и стекла. Изделия из них получают холодным прессованием шихты с последующим спеканием заготовок, горячим статическим прессованием или горячей штамповкой заготовок, пропиткой расплавленным стеклом пористых металлических заготовок. Стекланный компонент представляют порошки тарного, оконного, кварцевого, термостойкого, электровакуумного и других стекол, полученных измельчением в различных мельницах или атриторах.

Структура представляет собой скопление чрезвычайно мелких (1,2–1,5 нм), значительно деформированных кристаллов или кристаллитов, центральная часть которых имеет структуру, близкую к кристаллической, а периферийная – аморфную.

При спекании порошковых материалов на границе раздела твердой металлической и жидкой стеклянной фаз происходит взаимодействие свободного кремнезема с оксидами металла. Расплавленное стекло хорошо смачивает все металлы при наличии на их поверхности пленки оксидов при достижении температуры, достаточной для взаимодействия оксидов и кремнезема расплава, которая обычно ниже температуры плавления основного металла. Последняя должна существенно превышать температуру жидкого расплава. При соеди-

нении размягченного стекла с поверхностью окисленного металла оксиды растворяются в стекле и образуются комплексные соединения (силикаты). При удалении оксидов с поверхности металла смачивания стеклом не наблюдается.

Металлостеклянные материалы имеют ярко выраженную гетерогенную структуру – металлическую матрицу и равномерно распределенные стеклянные включения. Структура металлической матрицы аналогична структуре материалов, не содержащих стеклянную фазу (при их одинаковом химическом составе и технологии получения). Стеклянные частицы в процессе спекания или нагрева под штамповку изменяют свою форму с осколочной на более округлую, их средний размер возрастает с 1–10 до 20–60 мкм.

Механические свойства металлостеклянного материала (железо + 1% графита + 5% стекла) приведены в табл. 10.4.

Таблица 10.4

Механические свойства материалов состава железо + 1% графита + 5% стекла

$t_{оп}, °C$	$\sigma_B, \text{МПа}$		$\delta, \%$		$KCU, \text{кДж/м}^2$	
	исх.	ТО	исх.	ТО	исх.	ТО
-60	380	750	0,3		30	45
20	290	710	1,1		88	100
100	280	600	1,4	0,4	88	100
200	260	650	1,9	0,1	86	100
300	290	610	2,0	1,5	70	65

После термической обработки металлическая матрица на основе углеродистых и легированных сталей имеет микротвердость порядка 5–6 ГПа, стеклянная фаза – 8–12 ГПа, что предопределяет высокую износостойкость металлостеклянных материалов.

Оптимальные фрикционные и физико-механические свойства наблюдаются при введении 15–25 об. % стекла.

Одним из применяемых в технике износостойких материалов, работающих без смазки в вакууме, является металлостеклянный материал **ПС5ГШ** на основе эвтектоидной стали с 15 об. % стеклянной фазы, внедренной в виде стеклянного порошка. Материал подвергают термической обработке: закалке с 820–840°C в водные растворы солей и отпуску при 200°C в течение 1 ч. Механические свойства при этом:  $\sigma_B = 580...620 \text{ МПа}$ ;  $KCU = 100 \text{ кДж/м}^2$ ;  $\delta = 2...3\%$ ; HRC 52–58. Фрикционные испытания в условиях трения без смазки показывают, что при отсутствии стекла трущиеся поверхности схватываются, тем-

пература в зоне трения превышает  $600^{\circ}\text{C}$ , интенсивность износа возрастает в 20–30 раз.

Металлостеклянные материалы в 1,5–5 раз дешевле легированной стали ШХ15, превосходят ее при равной твердости: при трении без смазки в 3–11 раз, при работе в абразивной среде в 1,9–2,5 раза. Металлостеклянные материалы применяют при изготовлении тяжело нагруженных узлов трения, работающих при ограниченном подводе смазки или при её отсутствии (*шестерни, кулачки, детали сельскохозяйственных машин и др.*).

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Опишите влияние структурных составляющих железоуглеродистых сплавов на износостойкость.
2. Какие вторичные структуры образуются при трении в поверхностном слое?
3. Какие материалы применяются для подшипников качения и в чем заключаются особенности их термообработки?
4. Какие стали применяются для зубчатых колес? Как проводится химико-термическая обработка и поверхностная закалка для их упрочнения?
5. Назовите износостойкую сталь аустенитного класса, опишите особенности термообработки и причины высокой износостойкости.
6. Назовите карбидные и твердые сплавы, устойчивые к абразивному изнашиванию.
7. Приведите примеры порошковых износостойких композиций. Каковы принципы создания порошковых износостойких материалов?

## Глава 11. АНТИФРИКЦИОННЫЕ И ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Природа фрикционности и антифрикционности обусловлена двойственной природой трения, а именно: наличием молекулярной и деформационной составляющих сил трения.

В процессе трения твердых тел участвуют лишь поверхностные слои, свойства которых (твердость, прочность на сдвиг) могут заметно отличаться от объемных свойств.

Совокупность этих требований, отличающих граничный слой от объема материала, сводится к необходимости создания на контакте положительного градиента механических свойств.

Фрикционные материалы должны иметь высокий коэффициент трения, а антифрикционные, наоборот, низкий. Условно принято называть материалы с коэффициентом трения  $f > 0,2$  фрикционными, а с  $f < 0,2$  – антифрикционными.

### 11.1. Антифрикционные материалы

Антифрикционные материалы предназначены для изготовления подшипников (опор) скольжения, которые широко применяют в современных машинах и приборах из-за их устойчивости к вибрациям, бесшумной работы, небольших габаритов.

Основные служебные свойства подшипникового материала – антифрикционность и сопротивление усталости. *Антифрикционность* – это способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряженной детали – стального или чугунового вала.

Антифрикционность обеспечивают следующие свойства подшипникового материала: 1) высокая теплопроводность; 2) хорошая смачиваемость смазочным материалом; 3) способность образовывать на поверхности защитные пленки мягкого металла; 4) хорошая прирабатываемость, основанная на способности материала при трении легко пластически деформироваться и увеличивать площадь фактического контакта, что приводит к снижению местного давления и температуры на поверхности подшипника.

Критериями для оценки подшипникового материала служат коэффициент трения  $f$  и допустимые нагрузочно-скоростные характеристики: давление  $p$ , действующее на опору, скорость скольжения  $v$ , параметр  $p v$ , определяющий удельную мощность трения. Допустимое

значение параметра  $\rho v$  тем больше, чем выше способность материала снижать температуру нагрева и нагруженность контакта, сохранять граничную смазку.

Для подшипников скольжения используют металлические материалы, неметаллы, комбинированные материалы и минералы (полу- и драгоценные камни). Выбор материала зависит от режима смазки и условий работы опор скольжения.

### **11.1.1. Металлические антифрикционные материалы**

*Металлические материалы* предназначены для работы в режиме жидкостного трения, сочетающемся в реальных условиях эксплуатации с режимом граничной смазки. Из-за перегрева возможно разрушение граничной масляной пленки. Поведение материала в этот период работы зависит от его сопротивляемости схватыванию. Оно наиболее высоко у сплавов, имеющих в структуре мягкую составляющую.

Металлические материалы по своей структуре подразделяются на два типа сплавов: 1) сплавы с мягкой матрицей и твердыми включениями; 2) сплавы с твердой матрицей и мягкими включениями.

*К сплавам с мягкой матрицей и твердыми включениями* относятся баббиты и сплавы на основе меди – бронзы и латуни. Мягкая матрица в них обеспечивает не только защитную реакцию подшипникового материала на усиление трения и хорошую прирабатываемость, но и особый микрорельеф поверхности, улучшающий снабжение смазочным материалом участков трения и теплоотвод с них. Твердые включения, на которые опирается вал, обеспечивают высокую износостойкость.

**Баббиты** – мягкие (30 НВ) антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе. В соответствии с ГОСТ 1320-74 к сплавам на оловянной основе относятся баббиты Б83 (83% Sn, 11% Sb, 6% Cu) и Б88, на свинцовой основе – Б16 (16% Sn, 16% Sb, 2% Cu), БС6 и БН. Особую группу образуют более дешевые свинцово-кальциевые баббиты: БКА и БК2 (ГОСТ 1209-90).

По антифрикционным свойствам баббиты превосходят все остальные сплавы, но значительно уступают им по сопротивлению усталости. В связи с этим баббиты применяют только для тонкого (менее 1 мм) покрытия рабочей поверхности опоры скольжения. Наилучшими свойствами обладают оловянистые баббиты, у которых  $\rho v = (500-700)10^5$  Па·м/с. Из-за высокого содержания дорогостоящего олова их используют для подшипников ответственного назначения

(дизелей, паровых турбин и т.п.), работающих при больших скоростях и нагрузках (табл. 11.1). Структура этих сплавов (рис. 11.1) состоит из твердого раствора сурьмы в олове (мягкая фаза, темный фон) и твердых включений  $\beta$  (SnSb) и  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ .

Таблица 11.1

## Характеристики антифрикционных материалов

Материал	HV	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
		без смазочного материала	со смазочным материалом	$P$ , МПа	$V$ , м/с	$\rho v$ , МПа·м/с
<b>Баббиты:</b>						
Б83	300	0,07–0,12	0,004–0,006	15	50	75
Б16	300			10	30	3
БК2	320			15	15	6
<b>Бронзы:</b>						
БрОЮФ1	1000	0,1–0,2	0,004–0,009	15	10	15
Бр05Ц5С5	600			8	3	12
БрС3О	250			25	12	30
<b>Латуни:</b>						
ЛЦ16К4	1000	0,15–0,24	0,009–0,016	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2	800			10,6	1	10
<b>Алюминиевый сплав</b>						
А09-2	310	0,1–0,15	0,008	25	20	100
<b>Антифрикционные серые чугуны:</b>						
АЧС-1	2200	0,12–0,23	0,008	2,5	5	10
АЧС-3	1600		0,016	6	0,75	45
<b>Пластмассы:</b>						
капрон	100	0,15–0,21	–	12	5	20
текстолит	350	0,15–0,25	–	15	8	25
<b>Комбинированные материалы:</b>						
железо – графит	800	0,08–0,12	–	8	1	
бронза – графит	560	0,04–0,1	–	6	1	
металлофторопластовая лента (МФПл)	–	0,03–0,1	–	–	–	150

**Бронзы** относятся к лучшим антифрикционным материалам. Особое место среди них занимают оловянистые и оловянисто-цинково-свинцовистые бронзы. К первым относятся бронзы БрОЮФ1, Бр010Ц2, ко вторым – Бр05Ц5С5, Бр06Ц6С3 (ГОСТ 613-79). Бронзы применяют для монолитных подшипников скольжения турбин, элек-

тродвигателей, компрессоров, работающих при значительных давлениях и средних скоростях скольжения (табл. 11.1).

В последнее время бронзы широко используются как компоненты порошковых антифрикционных материалов или тонкостенных пористых покрытий, пропитанных твердыми смазочными материалами.



Рис. 11.1. Микроструктура баббита Б83, х400

**Латуни** применяют в качестве заменителей бронз для опор трения. Однако по антифрикционным свойствам они уступают бронзам. Двухфазные латуни ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А и т.д. (ГОСТ 17711-93) применяют при малых скоростях скольжения ( $< 2$  м/с) и невысоких нагрузках. Их часто используют для опор трения приборов.

К сплавам с твердой матрицей и мягкими включениями относятся свинцовистая бронза БрС30, 30% Рb (ГОСТ 493-79), и алюминиевые сплавы с оловом, например сплав АО9-2 (9% Sn, 2% Cu). Функцию мягкой составляющей в этих сплавах выполняют включения свинца или олова. При граничном трении на поверхность вала переносится тонкая пленка этих мягких легкоплавких металлов, защищая шейку стального вала от повреждения.

Антифрикционные свойства сплавов достаточно высокие, особенно у **алюминиевых сплавов**. Из-за хорошей теплопроводности граничный слой смазочного материала на этих сплавах сохраняется при больших скоростях скольжения и высоком давлении (табл. 11.1).

Алюминиевый сплав АО9-2 применяют для отливки монометаллических вкладышей, бронзу – для наплавки на стальную ленту.

К сплавам с твердой матрицей и мягкими включениями относятся также **серые чугуны**, роль мягкой составляющей в которых выполняют включения графита. Графит, равномерно распределяясь по поверхности, в процессе трения создаёт слой твердой графитной смазки.

Износостойкость чугуна зависит от формы и распределения графита. При наличии больших скоплений графитовых включений износостойкость значительно снижается. Чугун с шаровидной формой графита и толстыми пластинками более износостоек, чем с тонким пластинчатым графитом.

Для работы при значительных давлениях и малых скоростях скольжения (табл. 11.1) используют серые чугуны СЧ 15, СЧ 20 и легированные антифрикционные чугуны: серые АЧС-1, АЧС-2, АЧС-3; высокопрочные АЧВ-1, АЧВ-2; ковкие АЧК-1, АЧК-2 (ГОСТ 1585-85). *С целью уменьшения износа сопряженной детали марку чугуна выбирают так, чтобы его твердость была ниже твердости стальной цапфы.*

Серые чугуны (типа СЧ24) имеют удовлетворительную износостойкость в условиях работы *пары гильза цилиндра – поршневое кольцо*. Высокопрочный чугун типа ВЧ50 в условиях трения со смазкой применяется для *коленчатых валов двигателей*.

В машиностроении наибольшее распространение получил легированный *никель-медистый чугун (нирезист)* на аустенитной основе марки 4Н15Д7Х2 (2,5% С, 1,5–3,0% Si, 1,5–3,0% Cr, 6–8% Cu). Из нирезиста в верхнюю часть гильз цилиндров ЗИЛ-130 делают вставку, которая обеспечивает высокую износостойкость рабочей камеры в условиях трения в продуктах сгорания топлива.

Достоинство чугунов – невысокая стоимость; недостатки – плохая прирабатываемость, чувствительность к недостатку смазочного материала и пониженная стойкость к воздействию ударной нагрузки.

В настоящее время наибольшее распространение получили **многослойные металлические подшипники**, в состав которых входят многие из рассмотренных выше сплавов. Сплавы или чистые металлы в них уложены слоями, каждый из которых имеет определенное назначение.

В качестве примера разберем строение четырехслойного подшипника (рис. 11.2), применяемого в современном автомобильном двигателе.

Он состоит из стального основания, слоя (250 мкм) свинцовистой бронзы (БрС30), тонкого (~ 10 мкм) слоя никеля или латуни и слоя свинцово-оловянного сплава толщиной 25 мкм. Стальная основа обеспечивает прочность и жесткость подшипника; верхний мягкий слой улучшает прирабатываемость. Когда он изнашивается, рабочим слоем становится свинцовистая бронза. Слой бронзы, имеющий невысокую твердость, также обеспечивает хорошее прилегание шейки вала,

высокую теплопроводность и сопротивление усталости. Слой никеля служит барьером, не допускающим диффузию олова из верхнего слоя в свинец бронзы.

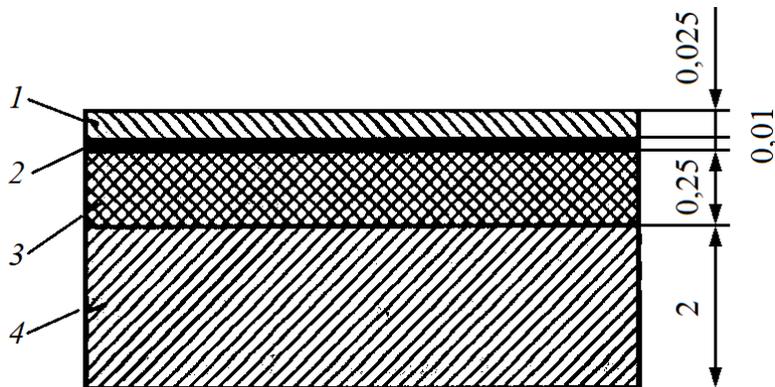


Рис. 11.2. Схема строения четырехслойного металлического подшипника скольжения: 1 – сплав свинца и олова; 2 – никель; 3 – свинцовистая бронза; 4 – сталь

### 11.1.2. Полимерные антифрикционные материалы

Среди конструкционных антифрикционных материалов видное место занимают антифрикционные полимерные материалы (АПМ).

Для изготовления подшипников скольжения применяют *термореактивные* и термопластичные пластмассы (более десяти видов).

Когда к узлам трения предъявляют повышенные требования по жёсткости, размерной стабильности и теплостойкости, применяют полимерные материалы на основе термореактивных связующих. В основном это *текстолит* и *углепластики*.

**Текстолиты** – слоистые пластики, изготавливаемые методом горячего прессования нескольких слоёв ткани или других слоистых армирующих материалов, пропитанных синтетическими смолами.

Для придания текстолитам тех или иных свойств в них добавляют графит, дисульфид молибдена и др. Из него изготавливают подшипники прокатных станов, гидравлических машин, гребных винтов. Такие подшипники могут работать в тяжёлых условиях, смазываются водой, которая хорошо их охлаждает.

Разработан также самосмазывающийся высокотемпературный *металлизированный текстолит*, изготавливаемый из графитизированной омеднённой ткани, термостойкой фурановой смолы с добавками поверхностно-активных веществ. Подшипники из этого материала, работающие без смазки, выдерживают температуру 250–300°C.

При их эксплуатации проявляется *эффект избирательного переноса* частиц меди на поверхность трения вала, что обеспечивает низкое трение и изнашивание вкладыша и вала. Текстолитовые подшипники способны выдерживать значительные ударные нагрузки даже в случаях, когда менее податливые бронзовые подшипники деформируются.

**Углепластики** представляют собой углеграфитовые материалы, пропитываемые смолами горячего отверждения и обладающие такими же свойствами. Основным недостатком углепластиков является их хрупкость.

Из *полимеров* наиболее широко применяют полиамиды: ПС10, анид, капрон и особенно фторопласт (Ф4, Ф40). Достоинства полимеров:

- низкий коэффициент трения;
- высокая износостойкость и коррозионная стойкость.

Исключительно высокими антифрикционными свойствами обладает *фторопласт*, коэффициент трения которого без смазочного материала по стали составляет 0,04–0,06. Однако фторопласт «течет» под нагрузкой и, как все полимеры, плохо отводит теплоту. Его можно применять лишь при ограниченных нагрузках и скоростях. Высокие антифрикционные свойства фторопласта реализуют в комбинации с другими материалами, используя его в виде тонких пленок либо как наполнитель.

### **11.1.3. Антифрикционные порошковые материалы**

Широкое распространение в машиностроении получили пористые материалы, пропитываемые маслом, и материалы, в состав которых специально вводятся твердые смазки типа графита, дисульфида молибдена и т.д.

**Материалы на основе железа** являются наиболее распространенными спеченными антифрикционными материалами. Введение различных антифрикционных и упрочняющих добавок позволяет создавать высокоизносостойкие материалы.

На основе железа разработано большое количество спеченных антифрикционных материалов:

- 1) пористое железо, пропитанное смазкой;
- 2) железо-графит;
- 3) железо-медь-графит;
- 4) сульфидированные железографитовые материалы;

5) материалы с присадками твёрдых смазок в виде фторидов кальция или бария;

6) пористые материалы, пропитанные свинцом или легкоплавкими сплавами на основе меди, олова, свинца и других присадок;

7) сульфидированные нержавеющие стали;

8) сложнелегированные антифрикционные материалы и т.д.

Материалы на основе железа регламентируются ГОСТ 26802-86. В соответствии с ГОСТом ниже приводится система маркировки данных материалов. В обозначении марок перед дефисом буквы указывают: **П** – принадлежность материала к порошковому, **А** – назначение материала – антифрикционный. После дефиса следует буквенное обозначение основы материала и легирующих компонентов: **Ж** – железо; **Д** – медь; **О** – олово; **Гр** – графит; **Х** – хром; **Н** – никель; **Ф** – фосфор; **Б** – бор; **К** – сера; **Мс** – дисульфид молибдена; **Цс** – сернистый цинк; **Л** – латунь; **М** – молибден. Цифры, стоящие после букв, указывают на содержание определенного элемента (**ПА-Ж**, **ПА-ЖД5**, **ПА-ЖГр3**, **ПА-ЖГрДК**, **ПА-ЖГрЦсОК** и др.).

**Пористое железо (ПА-Ж).** Это наиболее простой тип материала, содержащий кроме железа не более 0,3 углерода и при пористости от 17 до 34% и твёрдости не менее НВ 200 (МПа) имеющий структуру феррита и до 20% перлита. При стабильной подаче смазки работает при давлении до 2,5 МПа и скоростях скольжения 1–2 м/с. С увеличением скорости скольжения и в режиме самосмазывания нагрузка уменьшается до 1,5 МПа, коэффициент трения при этом 0,03–0,06. Введение серы до 0,5% (**ПА-ЖК**) увеличивает срок службы и улучшает обрабатываемость материала.

**Железографит.** Это наиболее распространенный антифрикционный материал, основные марки которого – **ПА-ЖГр**, **ПА-ЖГр2**, **ПА-ЖГр3**. Микроструктура – перлит, графит, поры, допускаются феррит до 40% и включения цементита до 10%. При содержании в материале более 1,5% графита и наличие его в структурно-свободном состоянии антифрикционные свойства материала улучшаются, особенно в условиях дополнительной подачи смазки. При удовлетворительной смазке коэффициент трения их находится в пределах 0,005–0,09, а при ограниченной смазке – 0,02–0,125. Предельная скорость скольжения для железографитовых материалов допускается до 2–3 м/с. Длительность работы определяется ее условиями и обычно не превышает 3–5 тыс. ч.

**Композиции железо-медь (ПА-ЖД, ПА-ЖД5) и железо – медь – графит (ПА-ЖГрД, ПА-ЖГр2Д, ПА-ЖГрД5).** Присутствие меди значи-

тельно повышает прочность пористого железа, вводится от 0,5 до 20%, но для изготовления подшипников используют преимущественно материалы с содержанием 5–9% меди.

Антифрикционные свойства материалов, содержащих медь, мало отличаются от свойств пористого железа и железного графита, однако они имеют более высокие физико-механические свойства. Такие материалы способны выдерживать статические нагрузки до 285 МПа. Железомедные материалы, содержащие более 10% меди, обладают повышенной коррозионной стойкостью и по антифрикционным свойствам не уступают бронзе.

**Материалы железо-медь-графит-фосфор с добавлением сульфидов (ПА-ЖГрДФК, ПА-ЖГрДФМс, ПА-ЖГрДМс и др.).** Легирование фосфором материалов в композиции железо – медь – графит позволяет значительно повысить их сопротивление пластической деформации при трении, что уменьшает возможность закупорки поровых каналов при возможном увеличении нагрузки.

**Сера** улучшает эксплуатационные характеристики материала. При работе со смазкой такие материалы имеют коэффициент трения 0,009. **Сульфиды** также улучшают антифрикционные свойства материала. В присутствии сульфида цинка в железном графите образуется структура тонкодисперсного перлита, которая повышает износостойкость и прирабатываемость материала. Введение в такие материалы до 1% олова значительно улучшает их антифрикционные свойства.

Наличие сульфидов в материале несколько увеличивает значения его коэффициента теплового расширения и снижает коррозионную стойкость в сравнении с железным графитом, не содержащим сульфиды. Срок службы узлов трения, оснащенных сульфидированными материалами на основе железа, в несколько раз выше, чем бронз, баббитов, а также спеченных материалов на основе бронз.

**Материалы на основе меди:** 1 – пористая оловянистая бронза; 2 – легированная пористая бронза (свинцовистая, фосфористая и др.); 3 – бронзографит; 4 – ленточные беспористые бронзовые материалы на стальной подложке; 5 – ленточные пористые бронзовые материалы на стальной подложке с пропиткой пористого слоя пластмассой; 6 – медь-графит и др.

Они применяются в узлах трения различных машин и механизмов и в электротехнике в качестве скользящих токосъемных контактов.

**Пористая оловянистая бронза.** Обычно содержит от 6 до 12% олова. Оптимум свойств наблюдается при его содержании 9–11%. По-

ристые бронзы применяют в основном для изготовления подшипников, работающих в легких условиях. Подшипники, пропитанные смазкой, работают без дополнительной подачи смазки 300–5000 ч в диапазоне температур от –60 до +120°С и имеют низкий коэффициент трения (0,01–0,04). При дополнительной смазке предельная нагрузка для таких подшипников может быть повышена до 8 МПа при  $V = 1$  м/с, с повышением скорости до 6 м/с нагрузка снижается до 1 МПа.

**Бронзографитовые материалы.** В этих материалах графит играет роль твёрдой смазки. Содержание его варьируется от 1 до 25%. Свойства бронзографитовых материалов в зависимости от содержания графита: маслоразрываемость этих материалов составляет 2,5–3,5%; величина допускаемых давлений для бронзографита в значительной степени зависит от пористости материала и скорости скольжения; при работе со смазкой в условиях частых остановок металлографитовые материалы работают надежнее, чем материалы без графита. *Они хорошо поглощают попадающие на поверхность трения твёрдые частицы.*

Бронзографитовые материалы могут применяться в тех же случаях, что и пористая бронза и, кроме того, для изготовления шестерён; работать в паре с контртелом, имеющим грубую поверхность, в несмазывающих жидкостях и др. Они заменяют литые бронзы, латуни и стальные подшипники качения.

**Свинцовистая бронза.** Материал обладает хорошей прирабатываемостью. Свинец резко снижает прочность бронзы, поэтому содержание его понижают до 10–20% и дополнительно вводят до 10% олова. Сплавы, содержащие свинец, предназначаются преимущественно для работы в масле.

Рабочая поверхность свинцовистой бронзы не поглощает попадающие на нее твёрдые частицы, поэтому требуется или высокая степень очистки масла, или нанесение на рабочую поверхность тонкого слоя сплава свинец-олово или свинец-индий методом электролиза.

**Сложнолегированные бронзы.** Свойства бронзы и бронзографита могут быть значительно улучшены легированием титаном, никелем, свинцом, цинком, кобальтом, железом, алюминием, а также введением веществ, играющих роль твёрдых смазок. Дальнейшее улучшение свойств бронз может быть обеспечено введением присадок, вызывающих старение материала после закалки и отпуска.

**Меднографитовые материалы.** Применяют в основном для изготовления неподвижных электроконтактов, радиальных уплотнений

и электрощёток. В меднографитовых материалах медь обеспечивает высокую электропроводность, а графит в основном повышает износостойкость и регулирует контактное сопротивление. Содержание графита в зависимости от назначения материала колеблется от нескольких процентов до 75%. Для улучшения свойств щёточных материалов добавляют олово, свинец, цинк.

**Материалы, содержащие твёрдые смазки:** сульфиды, селениды, фториды металлов, легкоплавкие металлы. Их введение направлено на улучшение свойств бронз и сплавов на основе меди и зависит от функционального назначения сплавов.

*Так, в условиях повышенных температур хорошей самосмазывающей способностью обладает также материал на основе меди, содержащей 9–18% железа и 10–14% фтористых кальция, скандия или бария.*

Твёрдые смазки сохраняют смазочную способность до температур разложения, обеспечивая эффективное функционирование изделий при повышенных температурах, нагрузках и скоростях. Для снижения интенсивности взаимодействия металлической основы и твёрдых смазок рекомендуется легировать матрицу (медь – никелем, бронзу – свинцом, никель – молибденом, кобальт – серебром).

#### **11.1.4. Комбинированные антифрикционные материалы**

*Комбинированные материалы* состоят из нескольких металлов и неметаллов, имеющих благоприятные для работы подшипника свойства. Рассмотрим подшипники двух типов.

**1. Самосмазывающиеся подшипники** получают методом порошковой металлургии из материалов различной комбинации: железо – графит, железо – медь (2–3%) – графит или бронза – графит. Графит вводят в количестве 1–4%. После спекания в материале сохраняют 15–35% пор, которые затем заполняют маслом. Масло и графит смазывают трущиеся поверхности. При увеличении трения под влиянием нагрева поры раскрываются полнее, и смазочный материал поступает обильнее. Тем самым осуществляется автоматическое регулирование подачи смазочного материала (его запас находится в специальной камере). Такие подшипники работают при небольших скоростях скольжения (до 3 м/с), отсутствии ударных нагрузок и устанавливаются в труднодоступных для смазки местах.

**2. Металлофторопластовые подшипники** изготавливают из металлофторопластовой ленты (МФПл) в виде свёртанных втулок методом точной штамповки. Лента состоит из четырех слоев (рис. 11.3).

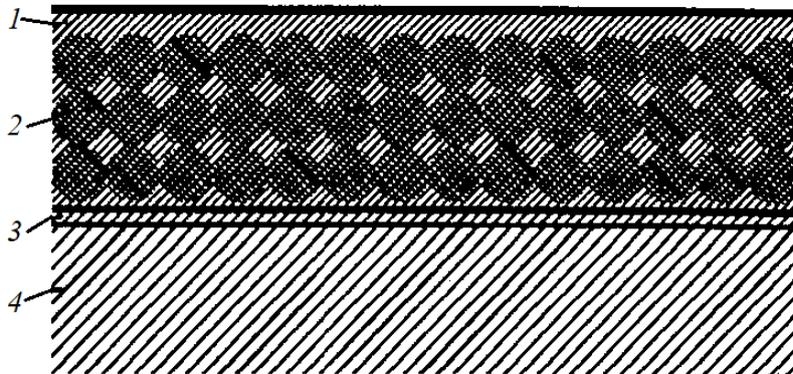


Рис. 11.3. Схема строения металлофторопластовой ленты: 1 – фторопласт с дисульфидом молибдена; 2 – бронза в слое фторопласта; 3 – медь; 4 – сталь

*Первый слой* (прирабочный) выполнен из фторопласта, наполненного дисульфидом молибдена (25%). Толщина слоя 0,01–0,05 мм. В тех случаях, когда допустимый линейный износ достаточно велик, первый слой утолщают до 0,1–0,2 мм. *Второй слой* (~ 0,3 мм) – бронзофторопластовый. Он представляет собой слой пористой бронзы БрОЮЦ2, полученный спеканием частиц порошка сферической формы. Поры в этом слое заполнены смесью фторопласта с 20% Pb (или фторопласта и дисульфида молибдена). *Третий слой* (0,1 мм) образован медью. Его назначение – обеспечить прочное сцепление бронзового пористого слоя с четвертым слоем – стальной основой. Толщина основы, которую изготавливают из стали 08 кп, составляет 1–4 мм.

При работе такого подшипника пористый каркас второго слоя отводит тепло и воспринимает нагрузку, а поверхностный слой и питающий его фторопласт выполняют роль смазочного материала, уменьшая трение. Если первый слой в отдельных местах по какой-либо причине изнашивается, то начинается трение стали по бронзе, что сопровождается повышением коэффициента трения и температуры. При этом фторопласт, имеющий более высокий температурный коэффициент линейного расширения, чем бронза, выдавливается из пор, вновь создавая смазочную пленку.

При тяжелых режимах трения, когда температура нагрева превышает 327°C, происходит плавление свинца. Образующаяся жидкая фаза снижает коэффициент трения и тепловыделение.

Металлофторопластовые подшипники имеют высокие антифрикционные свойства (в диапазоне 200–280°C  $f = 0,03–0,1$ ;  $p v$  –

$1500 \cdot 10^5$  Па·м/с). Их используют в узлах трения, работающих без смазочного материала, хотя его введение оказывает благоприятное действие. Они могут работать в вакууме, жидких средах, не обладающих смазочным действием, а также при наличии абразивных частиц, которые легко «утапливаются» в мягкой составляющей материала. Такие подшипники применяют в машиностроительной, авиационной и других отраслях промышленности.

## **11.2. Фрикционные материалы**

### **11.2.1. Фрикционные устройства и их назначение**

Фрикционные материалы применяют в тормозных устройствах и механизмах, передающих крутящий момент (фрикционных муфтах и фрикционных передачах).

Фрикционные устройства (ФУ) гасят кинетическую энергию движущихся масс, изменяют скорость машины или ее элемента, фиксируют механизм в заданном положении, останавливают машину и т.д. От надежной работы этих узлов в значительной степени зависит надежность работы машины в целом.

Фрикционные материалы, в противоположность антифрикционным, должны обеспечивать задаваемый коэффициент трения в конкретный момент взаимодействия с контртелом. Коэффициент трения во время работы данных узлов является переменным и зависит от многих факторов:

- используемых материалов;
- конструкции узла трения;
- темпа и частоты включения (торможения) и т.д.

Работа фрикционных устройств циклична, т.е. сопровождается периодическими включениями и отключениями этих устройств. Наиболее интенсивным трением сопровождается режим экстренных включений (тормоза, муфты сцепления).

Процесс трения осуществляется на фактической площади контакта, составляющей незначительную часть от номинальной. Фактическая площадь контакта состоит из отдельных пятен, составляющих контурную площадь контакта. В процессе интенсивного трения, которым сопровождается работа нагруженных ФУ, пятна фактического контакта и контурные зоны изменяются и перемещаются по поверхности трения. При этом непрерывно меняется скорость скольжения, нагрузка и температура на фактическом, контурном и номинальных контактах и в объеме материалов.

В результате циклического и неравномерного воздействия высоких температур во фрикционных элементах (в поверхностном слое) протекают процессы, связанные с выгоранием и разложением связующего, окислением, образованием пленок и третьего тела во фрикционном контакте, структурными превращениями, температурной нестабильностью контакта, потерей контактом несущей способности. Эти процессы зависят от характера окружающей среды и ее взаимодействия с материалом (окислительные, нейтральные и агрессивные среды, смазочный материал и т.п.).

### **11.2.2. Требования к фрикционным устройствам**

Как отмечено выше, к фрикционным устройствам относятся:

- тормозные устройства;
- фрикционные муфты;
- фрикционные передачи.

**В муфтах сцепления** оптимальным коэффициентом трения является  $f = 0,3-0,4$ . В муфтах сцепления ведущие элементы обычно изготавливают из более жестких элементов и пластическая деформация их поверхностных слоев гораздо ниже, чем у ведомых. Причем касание ведущего диска ведомых элементов происходит, как правило, не по всей поверхности ведомого элемента, а в некоторых точках касания, что приводит к неравномерному нагреву ведомого элемента. Следовательно, для сохранения стабильным коэффициента трения необходимо обеспечить интенсивный отвод тепла из таких участков и также с поверхности трения, т.е. для *ведомых элементов* необходимо применять материалы с хорошей теплопроводностью. Для этих целей в ряде случаев в состав материалов вводится металлическая стружка.

К *фрикционным накладкам муфт сцепления* предъявляется еще ряд требований:

- способность не размягчаться в пределах рабочих температур;
- минимальное коробление под действием температур;
- высокое сопротивление заеданию и т.д.

Конструктивно фрикционный *узел муфты* часто такой же, как и у тормоза.

Для **тормоза** характерно, что один элемент подвижен, а второй – неподвижен. Работа тормоза – это частный случай работы муфты, когда скорость ведомой части равна нулю. Тормозные устройства имеют более узкое функциональное назначение, чем муфты.

Задачи, выполняемые ими, более ответственны. Тормоз должен обеспечить остановку машины на заданном пути в заданное время. Во многих случаях в тормозах процесс трения более интенсивный, чем в муфтах сцепления. Тормозам свойственны аварийные режимы работы, при которых загруженность возрастает в 2–3 раза. Например, при эксплуатации самоходных транспортных средств интенсивность экстренных и аварийных торможений составляет 5–10% от числа служебных торможений. Эти особенности обуславливают требования к фрикционным материалам тормозных устройств.

В тормозах подвижные элементы изготавливают более твердыми и износостойкими, чем неподвижные фрикционные элементы, износ которых выше. Следовательно, фрикционные материалы должны быть:

- тепло- и термостойкими;
- выдерживать достаточно большое число нагреваний и охлаждений без значительного растрескивания и коробления;
- обладать высоким сопротивлением к схватыванию в холодном и нагретом состояниях;
- иметь высокую маслостойкость;
- не допускать при торможении возникновения автоколебаний;
- иметь высокое сопротивление к налипанию на контртело.

Кроме того, при работе тормозов недопустимо возникновение шумов, особенно высокочастотных, которые обуславливают такие дефекты, как «писк тормозов».

Фрикционные устройства (ФУ) эксплуатируются в широком диапазоне нагрузок, скоростей, температур окружающей среды, температур на фрикционном контакте и в объеме материалов. Так как температура является интегральным параметром, отражающим совместное действие нагрузки, скорости, коэффициента трения, а также отражающим влияние конструкции, свойств материалов и характера охлаждения, ФУ классифицируются по температурному режиму работы.

В табл. 11.2 представлены характеристики тепловых режимов работы для сухих и смазываемых ФУ. Для узлов трения, работающих со смазочными материалами, допустимые режимы определяются в основном стойкостью смазочного материала, его деструкцией и выгоранием. Критическая температура для смазочных материалов обычно лежит в пределах 120–150°C.

Для специальных жидкостей и смазочных материалов со специальными присадками критическая температура может быть в 1,5–2 раза выше.

Классификация фрикционных устройств по температурному режиму

*А. Узлы трения, работающие без смазочного материала*

Тип режима	$t, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{об.ср}}, ^\circ\text{C}$
Очень легкий	$< 100$	$< 50$
Легкий	$< 250$	$< 150$
Средний	$< 600$	$< 300\dots 350$
Тяжелый	$< 1000$	$< 500\dots 600$
Сверхтяжелый	$> 1000$	$> 600$

*Б. Узлы трения, работающие со смазочным материалом*

Тип режима	$t^*/t_{\text{max}}$	$t_{\text{об.ср}}, ^\circ\text{C}$
Легкий	$\leq 0,5t_{\text{кр}}/\leq 0,8t_{\text{кр}}$	$0,3t_{\text{кр}}$
Средний	$0,8t_{\text{кр}}/0,9t_{\text{кр}}$	$0,5t_{\text{кр}}$
Тяжелый	$0,9t_{\text{кр}}/1t_{\text{кр}}$	$0,8t_{\text{кр}}$
Сверхтяжелый	$= t_{\text{кр}}/ > t_{\text{кр}}$	$> 0,8t_{\text{кр}}$

Классификация режимов по стойкости смазочного материала,  $t_{\text{кр}}$  – максимальная температура на фактических пятнах контакта как сумма среднеповерхностной температуры номинального или контурного контакта  $t^*$ , температуры вспышки на фактическом пятне  $t_{\text{всп}}$  и исходной объемной температуры  $t_{\text{об.исх}}$ ;  $t_{\text{max}} = t_{\text{об.исх}} + t^* + t_{\text{всп}}$ .

Рабочие режимы разделяются на следующие типы: однократный режим, кратковременный однократный, длительный однократный, повторно-кратковременный, повторно-длительный.

### 11.2.3. Материалы для фрикционных устройств

Фрикционные материалы работают в тяжелых условиях изнашивания – при высоких давлениях (до 6 МПа), скоростях скольжения (до 40 м/с) и температуре, мгновенно возрастающей до 1000°С.

Для выполнения этих функций фрикционные материалы должны иметь:

- высокий и стабильный в широком интервале температур коэффициент трения;
- минимальный износ;
- высокие теплопроводность и теплостойкость;
- хорошую прирабатываемость и достаточную прочность.

Этим требованиям удовлетворяют многокомпонентные неметаллические и металлические спеченные материалы. Их производят в виде пластин или накладок, которые прикрепляют к стальным дета-

лям, например дискам трения. *Материал выбирают по предельной поверхностной температуре нагрева и максимальному давлению, которые он выдерживает.*

**Неметаллические материалы** (полимерные) применяют при легких ( $t_{\text{пред}} < 200^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{max}} < 0,8$  МПа) и средних ( $t_{\text{пред}} = 400^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{max}} = 1,5$  МПа) режимах трения. Из них преимущественно используют асбофрикционные материалы, состоящие из связующего (полимеры каучука), наполнителя и специальных добавок. Основным наполнителем является асбест, который придает материалу теплостойкость, повышает коэффициент трения и сопротивление схватыванию. К нему добавляют медь, алюминий, свинец, латунь в виде стружки или проволоки для повышения теплопроводности; графит для затруднения схватывания (этому же способствует свинец, который, расплавляясь, служит как бы жидким смазочным материалом); оксиды или соли металлов ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{BaSO}_4$  и др.) для увеличения коэффициента трения.

Из асбофрикционных материалов наибольшей работоспособностью обладает ретинакс (ФК-24А и ФК-16Л), который содержит 25% фенолоформальдегидной смолы, 40% асбеста, 35% барита, кусочки латуни и пластификатор. В паре со сталью ретинакс обеспечивает коэффициент трения 0,37–0,40. Его используют в тормозных механизмах самолетов, автомобилей и других машин.

Недостатком неметаллических материалов является невысокая теплопроводность, из-за чего возможны перегрев и разрушение материала.

**Металлические спеченные материалы** применяют при тяжелых режимах трения ( $t_{\text{пред}} < 1200^\circ\text{C}$ ,  $p_{\text{max}} < 6$  МПа). Их производят на основе железа (ФМК-8 и ФМК-11) и меди (МК-5). Кроме основы и металлических компонентов (Sn, Pb, Ni и др.), обеспечивающих прочность, хорошую теплопроводность и износостойкость, эти материалы содержат неметаллические добавки – асбест, графит, оксид кремния, барит. Они выполняют те же функции, что и в асбофрикционных материалах.

Материалы на основе железа из-за высокой теплостойкости используют в узлах трения без смазочного материала, а материалы на основе меди – при смазывании маслом.

**Фрикционные полимерные материалы (ФПМ)** нашли широкое применение. ФПМ представляет собой многокомпонентную композицию, которую можно разделить на три основные группы:

- теплостойкий армирующий компонент (15–60%);
- фрикционно-способные порошкообразные и другие наполнители, обычно неорганического происхождения (20–60%);

– полимерное связующее – синтетические каучуки, синтетические смолы (15–30%) с вулканизирующими агентами (отвердителями), ускорителями и активизаторами вулканизации.

В целях получения армированной структуры в состав ФПМ вводят различные волокна.

Фрикционно-способные наполнители вводят для придания материалу необходимых физико-химических и механических свойств. Наполнителями являются оксиды металлов, графит, технический углерод, металлический порошок и др.

Фрикционные изделия на каучуковом связующем отличаются достаточно высоким коэффициентом трения и износостойкостью при температуре 200–250°C.

Смолы придают изделиям более высокую теплостойкость.

Фрикционные изделия различают по назначению и способу изготовления:

а) для тормозных узлов – формованные (колодки, накладки пластины, вкладыши), вальцованные (ленты, накладки), тканевые (ленты и накладки), картонно-латексные (накладки);

б) для муфт сцепления (в основном кольца) – формованные, тканевые, картонно-бакелитовые, картонно-латексные, спирально-навитые и эллипсо-навитые.

Области применения и свойства некоторых ФПМ приведены в табл. 11.3.

Таблица 11.3

Краткая характеристика ФПМ и типы изделий на их основе

Обозначение ФПМ	Тип изделия на основе ФПМ и краткая характеристика
1	2
АГ-1Б	Накладки барабанного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
ФК-16Л	Колодки тормозные, сектора, вкладыши, формованные из асбосмоляного материала, армированного латунной проволокой
ФК-24А	Колодки и накладки тормозные, формованные из асбосмоляного материала
Т-167	Накладки барабанного тормоза автомобилей ВАЗ, формованные из асбокаучукового материала
Т-266	Накладки дискового тормоза автомобилей ВАЗ, формованные из материала на основе асбеста и связующего (смола + каучук)
Т-332	Накладки сцепления автомобилей ВАЗ из спирально навитых асбестовых нитей, армированных латунной проволокой, с латексно-смоляной пропиткой

1	2
6КВ-10А	Колодки тормозные, формованные из асбокаучукового материала
6КВ-56А (ЭМ-2)	Накладки тормозные, ленты тормозные вальцованные, накладки сцепления из асбокаучукового материала
6КХ-1Б	Накладки сцепления, колодки и накладки тормозные, формованные из асбокаучукового материала
6КФ-58	Накладки барабанного тормоза, формованные из асбокаучукового материала
Ретинакс А	Для работы в паре с чугуном ЧНМХ с поверхностной температурой трения до 1100°С асбосмоляная композиция с включением латунной проволоки
Ретинакс Б	Для работы в паре с серым чугуном и легированными сталями с поверхностной температурой до 700°С асбосмоляная композиция

**Спеченные порошковые фрикционные материалы.** Порошковая металлургия позволила создать новый класс фрикционных материалов, отличающийся от традиционных повышенными коэффициентами трения, износостойкостью и теплостойкостью, что позволило применять эти материалы в узлах трения с тяжелыми режимами работы: при объемной температуре 1000°С, а температуре поверхностей более 1000°С.

Основными типами спеченных фрикционных материалов являются материалы на железной и медной основе. Первые обычно применяются для тяжелых и самых тяжелых условий работы и, как правило, используются в условиях сухого трения. Материалы на медной основе предназначены для работы в более легких условиях и применяются как при сухом трении, так и при работе с жидкостной смазкой.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Какие свойства материалов обеспечивают высокие антифрикционные характеристики?
2. Перечислите основные типы металлических АФМ.
3. Опишите структуру и свойства антифрикционных сплавов на основе меди и олова.
4. Как влияет форма и характер распределения графита на износостойкость чугуна?
5. Какие многослойные подшипники применяют в современном автомобильном двигателе?

6. Какие комбинированные материалы применяют для подшипников скольжения?
7. Опишите строение и свойства антифрикционных пористых материалов на основе железа и меди.
8. Чем отличаются антифрикционные полимерные материалы на основе термопластичных и терморезистивных связующих?
9. Где применяются полимерные антифрикционные материалы?
10. Каких правил придерживаются при проектировании изделий из пластмасс?
11. Укажите основные области применения фрикционных материалов.
12. В чем принципиальное отличие фрикционных и антифрикционных материалов?
13. Какие требования предъявляются к эксплуатационным свойствам фрикционных материалов?
14. Перечислите основные группы фрикционных материалов, применяемые в современном машиностроении.
15. Какие компоненты входят в состав фрикционных полимерных материалов (ФПМ) и какова их роль в обеспечении фрикционных свойств?
16. Чем отличаются эксплуатационные характеристики фрикционных полимерных материалов и спеченных порошковых фрикционных материалов?
17. Как получают спеченные порошковые фрикционные материалы?

### РАЗДЕЛ III. ЗАЩИТНО-ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Покрытия наносят на изделия из различных материалов для защиты от коррозии, придания изделиям декоративного вида, создания специальных поверхностных свойств (электро- и теплопроводности, электроизоляционных, магнитных и немагнитных свойств, светоотражающей или светопоглощающей способности и т.д.).

При выборе покрытий необходимо учитывать их назначение, условия эксплуатации, материал детали, свойства и характеристику покрытий, способ нанесения покрытий, допустимость и недопустимость контактов сопрягаемых материалов.

Покрытия могут быть металлическими, неметаллическими неорганическими (оксидными, фосфатными, фторидными и др.), пластмассовыми, резиновыми, лакокрасочными, пиролитическими (пирографит), керамическими (оксид циркония  $ZrO_2$ , карбид кремния  $SiC$ , дисилицид молибдена  $MoSi_2$ ).

#### Глава 12. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ НА ИХ ОСНОВЕ

*Лакокрасочные материалы (ЛКМ)* представляют собой многокомпонентные составы, в жидком состоянии наносимые на поверхность изделий и высыхающие с образованием плёнок, удерживаемых силами адгезии. Высохшие плёнки называют *лакокрасочными покрытиями (ЛКП)*.

Лакокрасочные покрытия широко используются для покрытия транспортных средств, выполняя две функции – *защитную* и *декоративную*, т.е. техническую и эстетическую. Лакокрасочные покрытия имеют значительные преимущества перед другими видами покрытий, так как их легче наносить на поверхность, что снижает стоимость окрасочных работ. Лакокрасочные покрытия обладают большой долговечностью; их можно наносить на металл, пластмассы и другие материалы.

##### 12.1. Назначение лакокрасочных покрытий и требования к ним

*Атмосферная коррозия* – наиболее распространенный вид коррозионного разрушения металлов в результате химического или электрохимического воздействия внешней среды, поэтому в транспортно-технологических комплексах, автомобилях первостепенное значение имеет защита от коррозии кабин, облицовки и рабочего

оборудования. Для этой цели в первую очередь применяют лакокрасочные покрытия (ЛКП).

При защите от коррозии транспортных средств роль лакокрасочных покрытий сводится к изоляции металла от внешней среды и прекращению действия гальванических микропар на поверхности металла. Кроме того, они служат декоративным целям, придавая изделиям желаемый внешний вид. В некоторых случаях покрытия могут иметь специальные свойства: электроизоляционные, теплозащитные, светостойкие и др.

Благодаря соответствующему лакокрасочному покрытию достигается увеличение срока службы технических средств и красивый внешний вид.

Лакокрасочное покрытие будет длительное время успешно выполнять свои функции, если для его нанесения использованы материалы, отвечающие конкретным условиям эксплуатации.

*Основными требованиями, предъявляемыми к ЛКП являются:*

- высокая адгезия к защищаемым поверхностям;
- близкие значения температурного коэффициента линейного расширения покрытия и металла;
- высокая плотность, водо- и газонепроницаемость;
- высокая эластичность плёнки при достаточной твёрдости и механической прочности;
- теплостойкость, химическая стойкость и светостойкость;
- стойкость против воздействия влаги, нефтепродуктов, отработавших газов и солнечных лучей;
- сохранение своих качеств при высоких температурах летом и низких температурах зимой;
- быть химически нейтральными, не вызывать коррозии окрашенных поверхностей;
- быстрое высыхание после нанесения на поверхность без сложных сушильных устройств;
- обеспечение необходимого цвета окрашиваемой поверхности при минимальных толщине и числе наносимых слоев, т.е. обладать хорошей *укрывистостью*.

## **12.2. Лакокрасочные материалы**

Перед началом работ по нанесению лакокрасочного покрытия очень важен правильный выбор лакокрасочных материалов. Всё зависит от того, какие именно поверхности вы собираетесь красить и ка-

ким внешним воздействиям они будут подвергаться. От правильного выбора покрытия будут зависеть срок службы окрашенной поверхности и ее внешний вид.

К используемым в транспортных средствах основным лакокрасочным материалам относятся грунтовки (грунты), шпатлевки и эмали.

**Грунтовки** являются нижним слоем покрытия и предназначены для обеспечения прочной связи между лакокрасочным покрытием и окрашиваемой поверхностью, а также для ее надежной антикоррозионной защиты. Грунтовки представляют собой суспензию пигмента или смеси пигментов (преимущественно антикоррозионных) с наполнителями в пленкообразователе и после высыхания образуют однородную пленку с хорошей адгезией с подложкой и покрывными слоями.

В качестве пигмента в грунтовках применяют соли хромовой кислоты, свинцовый или железный сурик, цинковые белила и др.

Существуют также грунтовки:

– для *консервации* – защиты металла от коррозии во время хранения, такие грунтовки обладают малой адгезией к лакокрасочным покрытиям;

– *фосфатирующие грунтовки*, благодаря которым создается защитная фосфатная плёнка;

– *протекторные грунтовки*, в состав которых в качестве пигментов введены металлические порошки, имеющие более низкий электродный потенциал, чем чёрные металлы.

**Шпатлёвки** применяют для выравнивания окрашиваемой поверхности и представляют собой густую вязкую массу, состоящую из смеси пигментов с наполнителями в плёнкообразователе. Шпатлёвки имеют значительно большую вязкость, чем остальные лакокрасочные материалы, за счёт более высокой концентрации пигмента и наполнителя.

**Эмали** служат для получения наружного слоя лакокрасочного покрытия, который придает ему необходимый цвет, блеск, гладкость, устойчивость против воздействия окружающей среды, механическую прочность и химическую стойкость.

Эмали являются суспензией пигмента или смеси пигментов с наполнителем в лаке и после высыхания образуют непрозрачную твердую пленку с разнообразными фактурой поверхности и блеском.

**Лак** – это раствор пленкообразующих веществ в органических растворителях или в воде, образующий после высыхания твердую прозрачную однородную пленку. Лак используют для получения про-

зрачных покрытий, защищающих поверхность от внешней среды. Иногда лак наносят на слой краски для большего блеска покрытия.

**Красками** называется суспензия пигмента или смеси пигментов с наполнителями в олифах, масле, эмульсии, латексе, образующая после высыхания однородную пленку.

Краски, изготовленные на лаках, называют эмалями, а на олифах – масляными красками.

В транспортных средствах первостепенное значение имеет защита от коррозии кузовов, кабин и оперения грузовых автомобилей, так как они в первую очередь подвержены коррозии металла.

### 12.2.1. Компоненты ЛКМ

Лакокрасочные материалы, из которых получают покрытия, в большинстве случаев имеют жидкую консистенцию и сложный состав. Основные компоненты лакокрасочных материалов – плёнкообразователи, растворители и пигменты.

**Плёнкообразователи** – вещества, которые при нанесении тонким слоем на обработанную ровную поверхность высыхают под действием воздуха, света, тепла, образуя на ней сплошную пленку.

От свойств плёнкообразователей зависят прочность соединения ЛКП с окрашиваемой поверхностью, антикоррозионность, стойкость против воздействия внешней среды и другие важнейшие качества покрытий. Плёнкообразующими веществами могут быть высыхающие *растительные масла, синтетические смолы и эфиры целлюлозы*. Качество и срок службы лакокрасочных покрытий зависят от их состава, природы окрашиваемого материала, подготовки поверхности, технологии и качества нанесения покрытия. Характеристики и области применения некоторых лакокрасочных материалов приведены в табл. 12.1.

**Смолы** для плёнкообразователей используют только растворимые (лаковые) – природные (канифоль, битумы, копалы) и синтетические (глифталевые, меламинные, фенольные, поливинилацетатные, эпоксидные и др.).

Высыхающие **растительные масла** (льняное и конопляное) в качестве плёнкообразователя применяют в виде натуральной или уплотненной олифы. Синтетические олифы готовят из смол, продуктов переработки нефти и др.

Используемые в настоящее время плёнкообразователи в подавляющем большинстве представляют собой *синтетические смолы* (полимеры) и их композиции. Различают *неотверждаемые термо-*

*пластичные и отверждаемые термореактивные* плёнообразователи. Они позволяют получать покрытия с высокими и разнообразными качествами: атмосферостойкие, термостойкие, стойкие в различных средах, электроизоляционные, токопроводящие и др.

Таблица 12.1

Характеристики и области применения некоторых лакокрасочных материалов

Лакокрасочные материалы	Обозначение	Основные плёнообразующие вещества	Характеристика	Область применения
Масляные	МА	Масла растительные, олифы натуральные и комбинированные, оксоль	Атмосферостойкие для внутренних и внешних работ	Деревянные и металлические конструкции, вагоны, аппараты
Глифталевые	ГФ	Смолы алкидные глицерофталатные (глифталы)	Атмосферо- и маслостойкие	Сельскохозяйственные машины, тракторы, подъёмно-транспортные машины
Нитроцеллюлозные	НЦ	Нитроглифталы, смолы, нитроцеллюлозоуретановые, нитроаминформальдегидные	Атмосферо-, масло- и бензостойкие	Металлические детали, кузова автомобилей и тракторов
Эпоксидные	ЭП	Смолы эпоксидные, алкидно-эпоксидные, нитроцеллюлозо-эпоксидные	Атмосферостойкие. Стойкие к воздействию масла, бензина и воды. Для внутренних и внешних работ	То же
Перхлорвиниловые	ХВ	Смолы перхлорвиниловые и винилхлоридные	Атмосферостойкие и химически стойкие. Выдерживают кратковременное воздействие масла, воды	Металлические поверхности химической аппаратуры
Кремнийорганические	КО	Смолы кремнийорганические	Термостойкие до 200...300°C, химически стойкие и водостойкие	Машины и оборудование

**Растворители** служат для растворения плёнообразователя, т.е. придания ему определённой вязкости, и представляют собой летучие жидкие органические соединения, которые должны испариться без остатка после нанесения лакокрасочного материала на поверх-

ность. Растворители подбирают в зависимости от плёнкообразующего вещества: для масел используют скипидар, уайт-спирит; для смол – спирты, ацетон, ароматические углеводороды типа бензола и толуола; для эфиров целлюлозы – ацетон. Для ускорения высыхания покрытий применяют каталитически действующие сиккативы, представляющие собой растворы оксидов или солей кобальта, цинка, свинца, марганца в растительном масле. В водоразбавляемых эмалях растворителем может быть вода, содержащая 0,5% аммиака.

**Разбавители** используют для частичной замены растворителя. Они дешевле растворителей. Сами разбавители могут не растворять плёнкообразователи, но разбавляют уже готовые растворы. Растворители для одних видов плёнкообразователей могут являться разбавителями для других. Избыток разбавителя может вызвать свёртывание плёнкообразователя и выпадение его в осадок. Это может быть и тогда, когда испаряемость растворителя более высокая, чем у разбавителя.

Растворители и разбавители применяют в строгом соответствии с плёнкообразователем. Например, для смоляных плёнкообразователей в качестве растворителя используют состав Р-197, № 651 (90% уайт-спирита и 10% бутилового спирта), уайт-спирит, сольвент-нафту, сольвент каменноугольный, каменноугольный ксилол, скипидар и другие, а для нитроплёнкообразователей – ацетон, спирты, смеси № 646, 647, 648, 645 и др.

**Пигменты** – порошкообразные вещества (сухие краски), придающие лакокрасочным материалам необходимые цвет и укрывистость (непрозрачность) – замедляют старение и повышают атмосферостойкость лакокрасочных покрытий. Одновременно пигменты улучшают адгезию, повышают антикоррозионные свойства и водостойкость плёнок.

По химическому составу они представляют собой оксиды или соли металлов (охра, железный сурик, цинковые и титановые белила), порошки алюминия, цинка и углерода (графит, сажа). Используют также пигменты органического происхождения (пигмент алый и др.), придающие покрытиям красивые яркие тона.

Красящие вещества, растворяющиеся в плёнкообразователях, называют *красителями*. По отношению к некоторым связующим красители могут быть пигментами.

**Пластификаторы** или **смягчители** могут добавляться к лакокрасочным материалам для придания покрытию эластичности (гибкости) и долговечности. Они могут повышать прилипаемость, свето-,

тепло- и морозостойкость. В качестве пластификаторов используют льняное и касторовое масла, эфиры фталевой, фосфорной и других кислот, камфору, термопластичные смолы.

**Сиккативы** – вещества, ускоряющие процесс образования плёнки. В их числе – оксиды свинца, марганца, кобальта или соли органических кислот этих металлов. Сиккативы применяют в жидком и твердом виде и добавляют к эмалям, содержащим масло, в определенных количествах.

**Наполнители** применяют в качестве примеси к слишком насыщенным и укывистым красителям с целью частичной их замены и удешевления. Они также способствуют более полному осаждению красителя и лучшему его закреплению. Наиболее распространенными наполнителями являются мел, гипс, каолин, тальк (инертные), а также гидроксид алюминия, блакфикс (активные). Применение в качестве наполнителей слюды и асбеста способствует повышению термостойкости покрытия.

### **12.2.2. Разновидности ЛКМ, их маркировка и назначение**

Лакокрасочные материалы (грунтовку, шпатлевку, эмаль) маркируют пятью группами буквенно-цифровых знаков с учетом химического состава и их основного назначения.

**Первая группа** знаков – наименование вида лакокрасочного материала (приводится полным словом) – «грунтовка», «шпатлевка», «эмаль».

**Вторая группа**, обозначаемая двумя буквами, указывает тип основного плёнообразователя по химическому составу: НЦ – нитроцеллюлозный; МЛ – меламинный; ПФ – пентафталевый; БТ – битумный; ФЛ – фенольный; ХВ – перхлорвиниловый и поливинилхлоридный; АК – полиакриловый; ВЛ – поливинилацетатный; ГФ – глифталевый; ЭП – эпоксидный; ПЭ – полиэфирный ненасыщенный; КО – кремнийорганический; МЧ – мочевиный и т.д.

Для лакокрасочных материалов, обладающих специфическими свойствами, между первой и второй группами знаков через дефис ставят индексы: В – водоразбавляемые; П – порошковые; Э – эмульсионные; Б – без активного растворителя.

**Третья группа** знаков, отделяемая от второй дефисом, определяет основное назначение лакокрасочного материала и маркируется цифрой: от 1 до 9 – в обозначении эмалей, 0 – в обозначении грунтовок и 00 – в обозначении шпатлевок. В марке эмали цифра 1 озна-

чает, что эмаль атмосферостойкая; 2 – ограниченно атмосферостойкая; 3 – консервационная; 4 – водостойкая; 5 – специальная; 6 – маслобензостойкая; 7 – химически стойкая; 8 – термостойкая; 9 – электроизоляционная.

**Четвертая группа** знаков – одна, две или три цифры, определяющие порядковый номер, присвоенный данному лакокрасочному материалу. При наличии некоторых специфических особенностей лакокрасочного материала возможно добавление буквенного индекса. Например, ГС и ХС – эмали соответственно горячей и холодной сушки; ПГ – эмаль пониженной горючести.

**Пятая группа** знаков обозначает цвет лакокрасочного материала и дается полным словом.

Таким образом, например, маркировка «Эмаль В-ПЭ-1-179 красно-оранжевая» обозначает эмаль как вид материала; В – водоразбавляемая; ПЭ – полиэфирная ненасыщенная; 1 – атмосферостойкая; 179 – порядковый номер; красно-оранжевая – цвет эмали.

В случае маркировки «Грунтовка ГФ-020 коричневая» обозначена грунтовка как вид материала; ГФ – глифталевая; 0 – шифр грунтовки; 20 – порядковый номер.

Маркировка «Шпатлевка НЦ-007 красно-коричневая» обозначает шпатлевку как вид материала; НЦ – нитроцеллюлозная; 00 – шифр шпатлевки; 7 – порядковый номер; красно-коричневая – цвет шпатлевки.

Лакокрасочные покрытия классифицируются по материалу покрытия, внешнему виду поверхности покрытия (класс покрытия) и по условиям эксплуатации (группа покрытия).

Наиболее высокие требования к лакокрасочным покрытиям предъявляются при окраске кузовов легковых автомобилей. Эти покрытия состоят из фосфатной плёнки, грунтовки, шпатлевки (при ремонте автомобилей) и нескольких (трех–пяти) слоев эмали. Они должны отвечать требованиям **1-го класса покрытия**.

Покрытие транспортно-технологических машин, оперения и капотов грузовых автомобилей, кузовов автобусов, кабин состоит из грунтовки, местной шпатлевки (при ремонте) и двух-трех слоев эмали и должно отвечать требованиям **2-го класса покрытия**.

Агрегаты транспортных средств и автомобилей (двигатели, рамы, колеса и др.), а также грузовые платформы покрываются одним слоем грунта (не всегда) и одним-двумя слоями эмали. К этим покрытиям предъявляются требования соответственно **3-го и 4-го классов**.

Надёжность защиты поверхности изделий обычно достигается использованием многослойных покрытий. Общее число слоёв составляет

2–14. Сочетание слоёв последовательно нанесённых лакокрасочных материалов различного целевого назначения называется *системой покрытия*. Таким образом, лакокрасочное покрытие в наиболее полном виде состоит из фосфатной плёнки, грунтовки, местной шпатлевки, общей шпатлевки и слоев эмали (рис. 12.1). Общая толщина лакокрасочного покрытия обычно составляет 60–300 мкм: для легковых автомобилей – 90–190 мкм, для дорожно-строительной техники до 300 мкм.

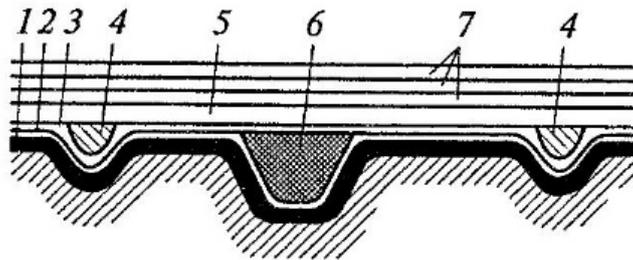


Рис. 12.1. Схема лакокрасочного покрытия: 1 – окрашиваемая поверхность; 2 – фосфатирующий слой; 3 – грунтовка; 4 – местная шпатлевка; 5 – сплошная шпатлевка; 6 – наполнитель неровностей; 7 – слои эмали

Качество лакокрасочного покрытия и его долговечность возрастают, если перед грунтовкой поверхность подвергается химической обработке растворами солей фосфорной кислоты, так называемому *фосфатированию*, или *бондеризации*. В результате фосфатирования на поверхности металла образуется фосфатная пленка (серого цвета) толщиной 2-5 мкм нерастворимых в воде фосфорнокислых соединений, которая защищает металл от коррозии (в том числе в местах царапин лакокрасочного покрытия, куда проникает влага), а также улучшает сцепление лакокрасочного покрытия с металлом. Для того чтобы оксидная плёнка защищала металл от коррозии, она должна быть плотной, беспористой и равномерно покрывать всю поверхность изделия.

Изделия, подвергаемые фосфатированию, очищают от окислов, грязи, обезжиривают и погружают в горячий раствор (97–99°C) препарата «мажеф» (по наименованию основных компонентов солей: марганцевых и железных фосфатов). В результате обработки на поверхности изделия образуются фосфаты железа и марганца. Продолжительность фосфатирования – один час, затем изделие вынимают, промывают, сушат и грунтуют не позднее чем через двое суток.

При небольших поверхностях пленка создается кистью или тампоном, смоченным раствором или пастой.

Кроме того, фосфатирование применяют как грунтовку под лакокрасочные покрытия и смазки.

**Грунтовка** наносится сплошным ровным тонким слоем (толщиной 10–20 мкм) после фосфатирования или непосредственно на тщательно очищенную окрашиваемую поверхность. Выбор грунта производится с учётом окрашиваемого и покрывного материалов. Покрывной материал выбирают в зависимости от условий эксплуатации и требуемого внешнего вида изделия.

При ремонте чаще всего используется грунтовка ГФ-021, содержащая инертные пигменты красно-коричневого цвета. Ее можно наносить под любые эмали, она обладает хорошей адгезией, легко шлифуется, стойка при температурах от –40 до +60°C, высыхает при 18–22°C за 48 ч, а при 100–110°C за 35 мин. Растворителем служит смесь уайт-спирита с сольвентом, скипидаром или ксилолом в соотношении 1:1.

**Фосфатирующий грунт** выгодно отличается тем, что образует на поверхности не только слой грунтовки, но и пленку фосфорнокислых соединений суммарной толщиной 8–12 мкм. Основным компонент этих грунтовок – суспензия пигментов в поливинилбутирольном лаке, второй (кислотный разбавитель) – водно-спиртовой раствор ортофосфорной кислоты. Перед применением они смешиваются, выдерживаются 30 мин и разбавляются растворителем. После фосфатирующей грунтовки наносится второй слой грунтовки.

На автозаводах широко применяют водорастворимую грунтовку. Ее наносят как распылением, так и электроосаждением.

**Шпатлевка** не улучшает механические качества лакового покрытия, и, более того, при значительной толщине шпатлевки происходит снижение прочности лакокрасочного покрытия. Поэтому стремятся уменьшить слой шпатлевки, для чего поверхность перед окраской тщательно выравнивается, она может иметь только риски и незначительные углубления. Толщина шпатлевочного слоя должна быть не более 1,5 мм при эпоксидных и полиэфирных шпатлевках и не более 0,3 мм при нитроцеллюлозных, алкидно-спиртовых, алкидных шпатлевках; создавать его необходимо в несколько приемов, нанося слой за слоем. Глубокие вмятины до покрасочных работ заполняются термoplastиками и эпоксидными пастами. При этом обращается внимание на то, чтобы температура сушки лакокрасочного покрытия была ниже температуры разрушения наполнителей.

Шпатлевки, кроме эпоксидных и на основе ненасыщенных полиэфиров, наносят только на загрунтованную или окрашенную поверхность.

Шпатлевание бывает *местное*, когда устраняют отдельные неровности, и *сплошное*, когда (после местного шпатлевания) шпатлевку наносят на всю поверхность. Шпатлевку наносят шпателем, а при ис-

пользовании шпатлевки в виде жидкости ее наносят на поверхность при помощи краскораспылителя. После шпатлевания поверхность шлифуют. Поверхность после шлифования должна быть ровной и гладкой. При окраске автомобилей широко используют нитроцеллюлозные шпатлевки НЦ-008 (защитно-серая), НЦ-007 (красно-коричневая), ПФ-0020, грунт-шпатлевки эпоксидные ЭП-0010 и ЭП-0020.

**Грунт-шпатлевки** можно наносить непосредственно на металл. Перед употреблением к ним добавляют 8,5 мас. % отвердителя № 1 (50%-й раствор гексаметилендиамина в спирте).

**Эмаль** является наиболее ответственным компонентом лакокрасочного покрытия. Ее наносят в несколько приемов ровными тонкими слоями. Неоправданное увеличение толщины слоев эмали может уменьшить прочность покрытия, а при недостаточной толщине слоев эмали уменьшаются защитное действие и долговечность покрытия. Необходимая вязкость эмали обеспечивается добавлением в нее только соответствующего растворителя, так как иначе может ухудшиться ее качество или даже возможна порча вследствие свертывания эмали. Эмали с разными основами смешивать нельзя.

Эмали при высыхании образуют твердую глянцевую пленку, напоминающую стеклянную эмаль. По температуре высыхания различают эмали холодной сушки (18–23°C) и эмали горячей сушки (100–135°C).

В состав эмали, кроме основного плёнкообразователя, часто входят другие смолы, а также высыхающие масла для повышения адгезии, эластичности, механической прочности и других качеств.

Ниже приведены краткие характеристики некоторых эмалей.

**Нитроэмали (НЦ-11)** представляют собой суспензию в растворе коллоксилина и алкидной смолы в смеси летучих органических растворителей с добавлением пластификаторов. Вязкость эмалей доводится с помощью растворителей 646, 647, 648.

Важным преимуществом нитроэмалей является то, что они быстро высыхают при обычной температуре (за 20–30 мин при температуре 18–22°C). Они удобны для использования в условиях автотранспортных предприятий, так как не требуют сушильных камер.

Нитроэмали более стойки к действию нефтепродуктов, чем смоляные эмали. В то же время нитроэмали недостаточно водонепроницаемы, поэтому водонепроницаемыми должны быть применяемые с ними грунты и шпатлевки. Для нитроэмалей также характерны недостаточная механическая прочность и стойкость к действию ультрафиолетовых лучей, повышенная хрупкость и огнеопасность, окрашенные ими поверхности нельзя нагревать свыше 75°C.

В нитроэмалях содержится относительно много растворителя, поэтому, чтобы добиться нужной укрывистости, приходится наносить до пяти слоев эмали (для легковых автомобилей).

Чтобы повысить прилипаемость нитроэмалей, к ним добавляют смолы (глифталевые и др.).

**Меламиноалкидные эмали (МЛ-12)** представляют собой суспензию пигментов в растворителях алкидных меламиноформальдегидных смол и в органических растворителях. Вязкость достигается с помощью растворителя 647 (этилцеллюлоза – 50%, циклогексан – 50%) или сольвента.

Эмали устойчивы в атмосферных условиях умеренного и холодного климата в течение трех лет. Для тропического климата с нанесением на фосфатированную поверхность их устойчивость составляет три года в качестве защитной функции и 1,5 года для декоративной.

Меламиноалкидные (синтетические) эмали создают блестящее покрытие, не требующее полировки и обладающее высокой атмосферостойкостью, стойкостью к непостоянному действию бензина и минерального масла. Покрытие из этих эмалей отличается эластичностью, твердостью, долговечностью.

Для получения покрытия необходимой толщины (90–120 мкм) достаточно нанести два–три слоя.

К *недостаткам* меламиноалкидных эмалей относятся высокая температура сушки, которая нежелательна для шин и резиновых уплотнительных деталей, и необходимость иметь специальные сушильные камеры.

В настоящее время в нашей стране (особенно на автозаводах) и за рубежом широко применяют так называемые *водоразбавляемые лакокрасочные материалы*, в которых разбавителем служит вода. Их применение исключает использование относительно дорогих органических растворителей, уменьшает загрязнение воздуха и пожарную опасность при окраске, позволяет транспортировать и хранить краски в сухом виде.

**Водоразбавляемые эмали** можно наносить на влажную поверхность. Для подавления коррозии от действия воды водоразбавляемые лакокрасочные материалы содержат водорастворимые ингибиторы коррозии и ингибирующие пигменты.

Водоразбавляемые материалы основаны на смолах, образующих в воде коллоидные и макромолекулярные растворы. В водорастворимое состояние могут быть переведены алкидные смолы, высыхающие масла, полиакрилы, полистиролы и многие другие полимеры.

Водоразбавляемая эмаль В-ФЛ-1199 используется для окраски деталей шасси методом окунания.

**Поверхности кузова и оперения, обращенные к полотну дороги**, для защиты от коррозии покрывают методом пневматического или безвоздушного нанесения антикоррозионных и противозумных мастик толщиной 1,5–2 мм по предварительно нанесенной грунтовке. Перед грунтовкой поверхность тщательно очищается, например, с помощью автопреобразователя ржавчины.

В состав мастик входят: связующие (смолы, каучуки, битумы, сланцы, парафины, церезины), наполнители (тальк, асбест), ингибиторы коррозии, поверхностно-активные вещества и др. Они обладают хорошей смачивающей способностью, стойкостью к воздействию влаги, минеральных солей, высокой адгезией, стойкостью к ударным нагрузкам, абразивному износу, вибрации, температурной стойкостью.

Закрытые полости кузовов машин и дорожной техники обрабатывают (покрывают) специальными антикоррозионными составами, что существенно увеличивает срок службы кузовов.

**Двигатель** окрашивают алюминиевой эмалью НЦ-273, состоящей из алюминиевой пасты или пудры и основы. В качестве основы служит лак. Al-порошок смешивают с лаком (но для силовых агрегатов подходит не всегда). Оптимальный состав – Al-порошок + эпоксидный клей или лак + растворитель. Пропорции зависят от степени нагревания: соотношение 2:5 (2 – Al; 5 – клей или специальный термостойкий лак, выдерживающий 350–400°C); растворителя – 100 г на 1 м<sup>2</sup> площади, краски – 1 кг на 1 м<sup>2</sup>.

Al-порошок тщательно перемешивают с термолаком или клеем. Вброс порошка проводится маленькими порциями. Толщина слоя 15–20 мкм достигается нанесением 2–3 слоев. Высыхает краска через несколько часов, но запекание происходит при первом запуске автомобиля и прогреве мотора.

Заводское окрашивание мотора проводится по горячему металлу, в результате чего краска имеет лучшее сцепление.

Все резьбовые соединения закрывают.

В автомобильной промышленности в последние годы широкое распространение получили полимерные порошковые краски, которые наносят в электростатическом поле, при этом полностью исключается применение растворителей. К числу порошковых красок относятся, например, поливинилбутирольная композиция П-ВЛ-212, порошковая эпоксидная краска П-ЭП-45, П-ЭП-177, полиэфирная порошковая композиция П-ЭП-1130 и др.

## Глава 13. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКИЕ И ПЛАСТМАССОВЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

### 13.1. Химико-термические защитные покрытия металлических поверхностей

**Металлические покрытия** горячим способом – это погружение в ванну с расплавленным металлом (цинкование, лужение оловом, свинцевание). На машинах оцинковывают крепёжные детали, покрывают оловом ленту для трубок радиатора, освинцовывают наконечники зажимов проводов электрооборудования, топливные баки и т.д.

**Диффузионный способ** – это насыщение поверхностных слоёв стальной детали различными элементами, вступающими в химическое соединение (цементация, цианирование, алитирование, азотирование).

**Оксидирование (воронение)** применяется для защиты черных металлов путём создания на поверхности оксидной плёнки погружением деталей в кипящий водный раствор, содержащий едкий натр, селитру и пероксид марганца. Полученная плёнка достаточно стойка в сухом воздухе и менее стойка во влажной атмосфере и особенно в воде.

**Фосфатирование** – химическая обработка металла растворами солей фосфорной кислоты.

**Создание коррозионностойких сплавов** осуществляется посредством введения в сталь легирующих добавок хрома, никеля, алюминия, кремния, вольфрама и других элементов, повышающих сопротивление коррозии и улучшающих другие служебные характеристики металла для ответственных деталей машин (клапанов, шестерён и валов коробки передач, полуосей, распределительных валов, шаровых пальцев и др.).

**Ингибиторы коррозии** – это вещества, введение которых в агрессивную среду приводит к торможению коррозии. Этим методом можно защищать практически любые металлы и почти в любых средах, включая охлаждающие жидкости, масла для двигателей, жидкое топливо. Добавляются ингибиторы в небольших количествах, например 10–50 г/м<sup>3</sup> бензина.

**Органосиликаты** в исходном состоянии напоминают суспензии и наносятся на предохраняемые поверхности кистью, валиком, пульверизатором и т.п. При нагреве они превращаются в керамику с по-

вышенными защитными свойствами, становясь термо- и даже жаростойкими. С их помощью удобно обеспечивать наружную защиту деталей системы выхлопа двигателя, так как после нанесения они затвердевают при температуре самих нагретых деталей. Они быстро затвердевают и при нормальных температурах, легко обрабатываются, что позволяет в случае необходимости оперативно восстанавливать повреждённые покрытия на месте. Для получения органосиликатов используют кремнийорганические полимеры (лаки), пигменты, оксиды, слюду, тальк, асбест.

### 13.2. Пластмассовые защитные покрытия

В последние годы успешно применяется нанесение на металл покрытий из термопластических материалов методами напыления (газопламенным и вихревым) или в виде суспензий.

Газопламенное напыление осуществляется пистолетообразным аппаратом, в который из питательного бачка подсасывается порошок смолы; чтобы порошок не слипался, бачок снабжают вибратором. Под действием воздушно-ацетиленового пламени на выходе из щелевидного сопла пистолета порошок плавится и распыляется сжатым воздухом по поверхности детали. После расплавления полимер хорошо растекается по поверхности детали. Для улучшения прилипания полимера поверхность металла подвергают песко- или дробеструйной обработке и нагревают пламенем пистолета (при нанесении, например, полиэтилена – до температуры 200°C).

**Газопламенным напылением** получают покрытия из:

- 1) полиэтилена;
- 2) полиамидов (капролактама, нейлона);
- 3) поливинилбутираля;
- 4) битумов, шеллака и др.

Для получения окрашенных покрытий порошок смолы смешивают с пигментами.

Такие покрытия используют для защиты металлов от коррозии и воздействия агрессивных сред. Свойства покрытий:

- хорошая адгезия с металлом;
- высокая упругость, водо-, бензо- и маслостойкость;
- не разрушаются от действия органических кислот, алифатических углеводородных растворителей и масел.

Покрyтия эпоксидными смолами, в частности смолой Э-41 с добавкой в качестве отвердителя полиэтиленполиамина, отличаются блеском, хорошей теплостойкостью, химической стойкостью и электроизоляционными свойствами.

**Вихревое напыление**, или напыление в псевдокипящем слое, используют для получения антикоррозионных, электроизоляционных и декоративных покрытий.

В качестве покрытий используют порошки полиэтилена, полиамидов и поливинилбутираля. Для придания покрытию цвета добавляют пигменты. Перед приготовлением смеси для напыления порошки полимера и пигмента высушивают. Затем порошок просеивают (до зернистости менее 200 мкм) и перемешивают до получения однородного цвета.

Перед началом работы в ванну для напыления насыпают смесь порошков из расчета, что при взвихрении высота слоя порошка увеличивается в 1,5–2 раза. Воздух для взвихрения порошка предварительно пропускается через влагомаслоотделитель и сухой чистый калорифер, нагретый до 50–60°С.

Взвихрение порошка достигается действием сжатого воздуха, который продувается через пористую перегородку, расположенную в нижней части ванны. Подача воздуха в ванну регулируется таким образом, чтобы поверхность взвихренного слоя порошка напоминала кипящую жидкость: без выбросов и фонтанирования. Покрываемые детали для улучшения сцепления покрытия с металлом предварительно подвергают дробеструйной обработке. Подготовленные для покрытия детали нагревают в печи до температуры, превышающей температуру размягчения полимера, и затем на несколько секунд полностью погружают в ванну с порошком, находящимся во взвихренном состоянии. Время нахождения детали в ванне определяется необходимой толщиной покрытия. Напыленные детали с частично оплавленным порошком выгружают из ванны и слегка встряхивают, чтобы освободить их от излишков порошка. Слой полимера получается равномерным и частично оплавленным. Для окончательного оплавления детали помещают в печь.

Для **суспензионного покрытия** используют фторопласты. Суспензию получают измельчением полимера на коллоидной мельнице в среде разбавителя (чаще всего воды или спирта) с добавкой стабилизирующего вещества. Нанесение суспензий на поверхность деталей производят погружением, распылением или с помощью кис-

ти. Для удаления разбавителя нанесенный слой сушат. Затем деталь нагревают до температуры 260–275°C для расплавления полимера и образования пленки. После оплавления для уменьшения кристалличности полимера и приобретения им эластичности иногда проводят закалку – быстрое охлаждение покрытия водой. Для получения покрытия толщиной 80–120 мкм один за другим наносят до 10 слоев.

Покрытия не набухают в воде, не смачиваются водой, стойки к действию неорганических веществ (за исключением расплавленных щелочных металлов и щелочей), слегка набухают в концентрированной азотной кислоте и олеуме. Фторопластовые покрытия используют для защиты металла от действия агрессивных сред, а также в качестве электроизоляционных покрытий.

**Напыление стеклопластиков** производят одновременным нанесением на поверхность металла рубленого стекловолокна и полиэфирного связующего. Отверждение покрытий производят при комнатной температуре. Напыление производят пистолетообразным аппаратом с помощью сжатого воздуха. Покрытия из стеклопластиков обладают хорошими прочностными свойствами и износостойкостью.

## Глава 14. ГЕРМЕТИКИ

Данная группа материалов предназначена для герметизации разборных и неразборных соединений. Герметики бывают отверждаемыми, сохраняющими пластичность и эластичность.

**Пластичные герметики** не обладают способностью возврата в исходное состояние. **Эластичные** – упругие, обладают способностью возврата в исходное состояние, имеют высокую деформируемость и используются для швов, которые могут менять своё положение при работе. Они имеют высокое сцепление с герметизируемой поверхностью.

Герметики бывают: резиновые, силиконовые, полисульфидные, акриловые, полиуретановые, полиизобутановые и т.д.

В технике наиболее распространены резиновые герметики. Герметизирующие составы на резиновой основе подразделяют на вулканизирующиеся и не вулканизирующиеся – невысыхающие и высыхающие.

**Вулканизирующиеся герметики** представляют собой жидкие или вязкотекучие пасты, поставляемые комплектно с отвердителями (вулканизаторами), переходящие в процессе вулканизации в эластичные газо- и гидронепроницаемые резиноподобные тела, хорошо заполняющие уплотняемые ими соединения. К этой группе относятся **тиоколовые герметики**, которые являются наиболее универсальными и распространёнными. Эти герметики химически стойки и могут применяться от  $-60$  до  $+130^{\circ}\text{C}$ .

**Теплостойкие силиксановые герметики** изготавливают на основе жидких силиксановых каучуков, они стойки при температурах от  $-100$  до  $300^{\circ}\text{C}$ . Силиксановые герметики, так же как и тиоколовые, состоят из герметизирующей пасты и вулканизирующих агентов, смешиваемых перед употреблением.

Теплоотливостойкие герметики разработаны на основе фторсодержащих каучуков. Эксплуатируются при температуре от  $-60$  до  $+250^{\circ}\text{C}$ . Предназначены для герметизации соединений топливной и масляной аппаратуры.

**Невысыхающие герметики** представляют собой термопластичные невулканизируемые замазки, пасты, мастики, предназначенные для уплотнения разборных соединений. При герметизации, а также разборке их нагревают до 30...50°C. Предельная температура эксплуатации не выше 70°C.

Применяются для заполнения зазоров неподвижных разборных соединений (резьбовых, фланцевых, прессовых и т.д.) и периодически подвижных (кранов, задвижек и т.д.) в целях герметизации, предохранения их деталей от коррозии и от воздействия агрессивных сред. Для обеспечения подвижности или разбираемости используют герметизирующие смазки. Для этой цели также широко применяют смазки с графитом и дисульфидом молибдена.

## Глава 15. СВЕТООТРАЖАЮЩИЕ, ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИЕ, ШУМО- И ВИБРОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### ***Светоотражающие материалы***

Светоотражающие материалы, применяемые в автомобиле-, машино- и тракторостроении, могут выполнять двойную функцию: быть декоративными элементами и элементами безопасности.

Безопасность обеспечивается применением различных красок. *Светящиеся покрытия* (люминофоры) – это вещества, способные излучать свет под действием различного рода возбуждений. Они широко применяются для шкал и стрелок приборов, пожарных предупредителей и других указателей аварийного освещения, рычагов и кнопок управления. Они образуются путём внесения в лак-основу в качестве пигментов фото- и радиолуминофоров.

Для *светоотражения* применяется краска БТ-177, которая отражает солнечные лучи, а для окраски объектов, которые должны быть видны на значительном расстоянии (дорожные знаки, средства спасения и т.д.), применяют флуоресцентные эмали АС-554, выпускаемые нескольких цветов.

В качестве *декоративных покрытий* применяют хром и никель. Кроме улучшения внешнего вида, эти покрытия способны защищать металл от коррозии, повышать его твёрдость.

### ***Энергопоглощающие материалы***

Энергопоглощающие материалы широко используются в технике для снижения динамических и знакопеременных нагрузок.

Для изготовления пружин применяются пружинные углеродистые и легированные *стали* после закалки и среднего отпуска, а также бронзы. Бронзы применяют в пружинах с высокой электропроводностью.

*Магниево-алюминиевые сплавы* (МЦА) хорошо поглощают вибрацию. Их идеальная вибрационная прочность с учётом демпфирующей способности почти в 100 раз больше, чем у дюралюминия, и в 20 раз больше, чем у легированной стали.

Для восприятия ударных нагрузок используется *резина*. Основным элементом резины является каучук, который может быть натуральным (НК) или синтетическим (СК).

*Листовая резина* в зависимости от условий эксплуатации бывает: тепломорозокислотощелочестойкой (ТМКЩ), атмосферномаслостойкая (АМС), маслобензиностойкая (МБС). Кроме того, резина различается по твёрдости на:

- мягкую – для работы от  $-45$  до  $+90^{\circ}\text{C}$ ;

- средней твёрдости – для работы от  $-60$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ ;
- повышенной твёрдости (эбонит).

Листовая резина обладает высокой эластичностью, сопротивлением разрыву и истиранию, она гидро- и газонепроницаема, химически стойкая. Листы выпускаются толщиной 2–60 мм, шириной 250–1000 мм и длиной 250–3000 мм.

*Губчатая резина* используется в качестве амортизирующих подушек. Она бывает с открыто сообщающимися порами (латексная губка, пенистая резина) и с закрытыми порами (ячеистая резина). Относительное удлинение при разрыве такой резины составляет 300%, а остаточная деформация при многократном нагружении не превышает 7,5%.

Для амортизации также используют *пенопласт* ПВХЭ, который является продуктом вспенивания поливинилхлоридных паст. Этот материал имеет плотность 0,1–0,2 г/см<sup>3</sup>.

К энергопоглощающим материалам также относятся пластмассы и пластики, например, полиэтилен низкого давления и пропилен.

### ***Шумо- и виброзащитные материалы***

Вибрация и шум создают в автомобиле дискомфорт водителю и пассажирам. Поэтому создают различные средства для их гашения.

В настоящее время большое распространение получили битумно-полимерные вязкие композиты, в которые в строго определенных пропорциях введены различные наполнители. Материал в виде матов выпускают со специальной самоклеющейся пленкой, которая обеспечивает материалу надежную адгезию с панелью кузова и сохраняет свои свойства в широком диапазоне температур. Кроме того, выпускают прокладочные шумопоглощающие материалы на основе пенополиуретана, например, *термофол* – прокладочный, шумопоглощающий материал на основе пенополиуретана. Материал имеет открытоячеистую структуру, поглощающую звук. Поставляется толщиной от 5 до 30 мм с липким слоем, защищенным антиадгезионной пленкой. Кажущаяся плотность – 25...40 кг/м<sup>2</sup>.

Эластичные свойства пенополиуретана позволяют использовать термофол в качестве прокладок и уплотнителей в различных соединениях.

Звукоизолирующий и противоскрипный материал *термофол-РСa* представляет собой вспененный полиэтилен с липким слоем. Материал обладает удовлетворительными теплоизоляционными свойствами, эластичен, водостоек, экологически безопасен, что позволяет использовать его в качестве прокладки, уплотнителя, тепло- и звуко-

изолятора в автомобилестроении и машиностроении. Термофол–РСa выпускается толщиной от 2 до 40 мм.

Аналогичными свойствами обладает самоклеящийся звукотеплоизолирующий, шумопоглощающий материал *сплэн*, изготовленный из пенополиэтилена с тонким слоем толщиной от 2 до 15 мм.

Существуют шумопоглощающие материалы серии Terodem: Terodem–SP100 Alu – самоклеящееся битумосодержащее покрытие с ламинированным нетканым слоем, поглощает звук, распространяющийся в твердой среде. Используется для работы с ровными или слегка изогнутыми поверхностями. В автомобилестроении устанавливается на дверях и боковых панелях. Поставляется в виде матов 500x250x22 мм.

*Terodem–SP200* – самоклеящееся пенополиуретановое покрытие с внешним защитным полиуретановым слоем. Поглощает звук, распространяющийся в воздухе. В автомобилях устанавливается на капот и крышку багажника. Поставляется в виде матов 1000x500x10 мм.

*Terodem–SP300* самоклеящееся битумосодержащее покрытие. Поглощает звук, распространяющийся в твердом теле. Поставляется в виде матов 500x500x2,6 мм и 1000x500x2,6 мм и применяется для покрытия полов автомобиля. Благодаря высокой эластичности пригоден для установки на поверхность, имеющую сложную форму.

*Бимаст* (Bimast) – вибропоглощающий материал на основе битумной и мастичной композиции. Эластичность материалов позволяет герметизировать кузов автомобиля и защитить от коррозии. Бимаст поставляется в виде матов, нагрев при монтаже до 25–30°C позволяет улучшить пластичность и сократить время монтажа. Лицевой слой материала из алюминиевой фольги предотвращает от загрязнения.

*Стизол* – звуко- и теплоизолирующий материал на основе пенополиэтилена, выпускается толщиной от 5 до 50 мм. Выпускаемая серия материала: стизол без клеевого слоя, стизол КС – с клеевым монтажным слоем и стизол ЛМ КС – с лицевой стороны покрыт лавсановой металлизированной пленкой с клеевым монтажным слоем. Рекомендуются для обработки зон: стизол – пол салона и багажника, стизол КС – арки колес, перегородка моторного отсека со стороны салона, стизол ЛМ КС – крыша капота и багажника.

*Битопласт* – уплотнительный и противоскрипный материал с липким слоем на основе пенополиуретана толщиной от 5 до 10 мм, со специальной пропиткой, придающей материалу водостойкость, улучшает его звукопоглощающие свойства и стойкость к ультрафиолетовому излучению.

Рекомендуется использовать битопласт 5 при покрытии пластмассовых деталей салона, панелей приборов; битопласт 10 – крыши.

Особый класс составляют звуко- и шумопоглощающие аэрозольные материалы, которые рекомендуется использовать для покрытия арок колес, днища и салона кузова и т.д.

Шумоизоляция автомобилей методом аэрозольного нанесения шумопоглощающих материалов имеет ряд преимуществ: в отличие от проклейки виброгасящими матами не остается незакрытых частей (короба, швы, стыки и т.п.), «мостики холода»; адгезия в несколько раз выше, что позволяет наносить материалы на панель крыши без риска отслоений; удельный вес материалов намного ниже при более высоких коэффициентах шумопоглощения; материал не содержит летучих растворителей, абсолютно безвреден для здоровья, не имеет запаха.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Назовите способы защиты от коррозии и дайте их краткую характеристику.
2. Лакокрасочные покрытия, их назначение и требования к ним. Дайте схему полного ЛКП.
3. Назовите основные ЛКМ, их свойства и назначение.
4. Назовите основные компоненты ЛКМ, их назначение.
5. Разновидности ЛКМ, их маркировка и назначение.
6. Как покрываются днища, оперения, закрытые полости кузовов автомобилей?
7. Особенности окрашивания двигателя автомобиля.
8. Назовите химико-термические способы защиты металлических поверхностей.
9. Виды защитных покрытий из пластмасс, способы их нанесения. Особенности напыления стеклопластиков.
10. Виды герметиков, их назначение. Дайте описание герметиков.
11. Светоотражающие и энергопоглощающие материалы, их назначение.
12. Требования, предъявляемые к шумо- и виброзащитным материалам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с.
2. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю.П. Солнцев, С.А. Вологжанина, А.Ф. Иголкин. – 6-е изд., перераб. – М.: Изд. центр «Академия», 2012. – 496 с.
3. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 4-е изд., перераб. – М.: ООО «Изд. дом Альянс», 2009. – 528 с.
4. Растегаев, И.К. Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве / И.К. Растегаев. – Новосибирск: В.О. «Наука», Сибирская изд. фирма, 1992. – 351 с.
5. Баурова, Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие / Н.И. Баурова, В.А. Зорин. – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.
6. Зорин, В.А. Основы работоспособности технических систем: учебник для вузов / В.А. Зорин. – М.: ООО «Магистр-Пресс», 2005. – 536 с.
7. Износостойкие материалы: учебное пособие / Г.В. Гладова, Л.Г. Петрова, О.В. Чудина, Т.Е. Лихачева. – М.: МАДИ (ГТУ), 2005. – 94 с.
8. Колесник, П.А. Материаловедение на автомобильном транспорте: учебник для вузов / П.А. Колесник, В.С. Кланица. – 3-е изд., стер. – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 320 с.
9. Шестопалова, Л.П. Материаловедение: лакокрасочные материалы и покрытия транспортных средств на их основе: учебно-методическое пособие / Л.П. Шестопалова. – М.: МАДИ, 2018. – 92 с.
10. ГОСТ 9.105-80. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Классификация и основные параметры методов окрашивания.