МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

Кафедра «Эксплуатация и технический
сервис наземных транспортно-
технологических средств»

А.Ю. Краснова, П.А. Иванов, Е.В. Усова

Конструкционные и защитно-отделочные материалы

Учебное пособие

Зерноград – 2024

УДК 629.113

Печатается по решению методического совета
инженерно-технологического факультета
Азово-Черноморского инженерного института
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»
в г. Зернограде

Рецензенты:
канд. техн. наук, доцент ***Шевырев Л.Ю.,***
д-р техн. наук, профессор ***Глобин А.Н.***

Краснова А.Ю. Конструкционные и защитно-отделочные материалы: учебное пособие / А.Ю. Краснова, П.А. Иванов, Е.В. Усова. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024. – 185 с.

В учебном пособии рассмотрены основные материалы: стали, чугуны, цветные металлы с антикоррозионными покрытиями, фрикционные и антифрикционные материалы, пластмассы, защитно-отделочные материалы: эмали, лаки, шпатлевки, обивочные ткани и др. Описаны их свойства и назначения.

Предназначено для студентов 4-го курса очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлению подготовки специалистов 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства. Материал пособия можно использовать для проведения практических занятий и самостоятельной работы студентов.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Эксплуатация и технический сервис наземных транспортно-технологических средств».
Протокол № 8 от 20 марта 2024 г.

Рассмотрено и одобрено методической комиссией по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства.
Протокол № 4 от 20 марта 2024 г.

© Краснова А.Ю., Иванов П.А.,
Усова Е.В., 2024
© Азово-Черноморский инженерный
институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……..…….. 5
1. Конструкционные материалы……..……. 7
1.1. Строение и свойства твердых тел...……...……...…. 7
1.2. Конструкционная прочность деталей машин……..……. 9
2. Машиностроительные материалы..... 13
2.1. Стали…….. 13
2.2. Чугуны……... 17
2.3. Медь и её сплавы…….. 23
2.4. Алюминий и его сплавы…….. 26
2.5. Титан и его сплавы……... 28
2.6. Магний и его сплавы…… 30
2.7. Антифрикционные (подшипниковые) сплавы…….. 32
2.8. Тугоплавкие металлы……... 34
2.9. Твердые сплавы…… 37
2.10. Сверхтвердые материалы……... 40
3. Износостойкость деталей машин…… 46
3.1. Общая характеристика процесса изнашивания…… 46
3.2. Виды изнашивания……... 46
3.3. Фрикционные и антифрикционные материалы…… 47
4. Методы повышения износостойкости деталей……... 52
4.1. Конструктивные способы…… 52
4.2. Технологические способы……... 55
4.3. Эксплуатационные способы……..... 58
5. Методы упрочнения стальных деталей машин…….. 61
5.1. Термомеханическая обработка сталей…… 61
5.2. Обработка стали холодом…… 62
5.3. Старение сплавов…….. 62
5.4. Поверхностная закалка стали…….. 63
5.5. Механическое упрочнение поверхности…… 64
5.6. Химико-термическая обработка стали……... 64
5.7. Наплавка и напыление поверхности деталей……. 67
6. Эффект безызносности поверхностей деталей……... 69
6.1. Самоорганизация в узлах трения…… 69
6.2. Избирательный перенос при трении……... 70
7. Кузовные материалы…… 73
7.1. Листовая сталь для изготовления кузова……... 73
7.2. Кузовные материалы с антикоррозионными покрытиями……... 74
7.3. Новые материалы для изготовления кузова автомобиля…….. 77
8. Композиционные материалы…….. 80
8.1. Общие сведения о композиционных материалах…….. 80
8.2. Классификация композиционных материалов…….. 81
8.3. Применение композиционных материалов…… 84
8.4. Гибридные композиционные материалы……... 85

9. Упрочненные композиционные материалы…… 87
9.1. Дисперсно-упрочненные и волокнистые композиционные материалы…….. 87
9.2. Композиционные материалы на металлической основе……..…. 96
10. Композиционные материалы на неметаллической основе……. 107
10.1. Структура композиционных материалов на неметаллической основе…… 107
10.2. Способы улучшения свойств композиционных материалов….. 108
10.3. Углерод-углеродные композиционные материалы……. 113
11. Пластические массы…… 116
11.1. Классификация, строение и свойства пластмасс……. 116
11.2. Покрытия из пластмасс…….. 132
11.3. Изготовление деталей из пластмасс…….. 133
12. Резина и резинотехнические изделия……... 137
12.1. Состав резиновой смеси. Общие сведения о производстве РТИ……... 137
12.2. Свойства. Классификация. Характеристики. Особенности использования РТИ…….. 139
12.3. Технология хранения и транспортировки РТИ……... 141
13. Лакокрасочные материалы……... 142
13.1. Основные виды лакокрасочных материалов…… 142
13.2. Классификация лакокрасочных материалов…… 144
13.3. Эмали……... 146
14. Грунтовки, разбавители, отвердители…… 149
14.1. Грунтовки…… 149
14.2. Разбавители и растворители…….. 152
14.3. Сиккативы, отвердители, ускорители……... 153
15. Шпатлевки и клеи……... 155
15.1. Виды шпатлевок…….. 155
15.2. Клеи…….. 161
16. Технология окраски и отделки…… 166
16.1. Подготовка поверхностей под окраску…… 166
16.2. Способы нанесения лакокрасочных материалов……. 169
17. Интерьерные материалы и безопасные стекла…… 171
17.1. Обивочные материалы……... 171
17.2. Безопасные стекла…….. 175
18. Энергопоглощающие, световозвращающие, шумо- и виброзащитные материалы…… 179
18.1. Энергопоглощающие и световозвращающие материалы…….. 179
18.2. Шумо- и виброзащитные материалы…… 180
Литература…… 184

ВВЕДЕНИЕ

Первые машины создавались из существовавших тогда материалов, недостатки которых повлекли за собой поиск новых, более совершенных конструкционных материалов. Постепенно первоначальные и последующие исследования привели к кардинальному пересмотру и переоцениванию некоторых критериев многообразных свойств конструкционных материалов и методов их испытания.

Бурное развитие научно-технического прогресса повлекло интенсификацию условий эксплуатации деталей и сборочных единиц различных машин. Возросли скорости эксплуатации, режимы силового и температурного нагружения деталей и сборочных единиц многих машин различного назначения. Всё это вызвало применение большого количества новых конструкционных материалов для изготовления деталей машин, приборов, аппаратов, инструментов и других назначений. Таких материалов в настоящее время насчитывается около 1 миллиона наименований.

Современное материаловедение подразделяет конструкционные материалы на четыре основные группы: металлы и сплавы, минералокерамические, полимерные и композиционные (композиты) – наиболее перспективные.

Инструментальные материалы, являющиеся разновидностью конструкционных, используются для изготовления режущих и измерительных инструментов, фильеров, штампов, прокатных валков и других деталей.

При изготовлении современных машин все шире применяют новые, обычно труднообрабатываемые, конструкционные материалы. С усложнением конструкций и увеличением нагрузок на детали проблема точности и качества их изготовления, а также обеспечения высокой надежности выпускаемых машин стала одной из основных в технологии машиностроения. Все это потребовало более глубокого изучения и совершенствования существующих, а также разработки новых высокоэффективных методов и процессов обработки. Появились новые виды конструкционных инструментальных материалов, освоен выпуск и находят всё большее применение синтетические сверхтвердые материалы (алмазы, эльбор, гексанит и др.), большое развитие получили методы отделочно-упрочняющей обработки. Наибольшими возможностями в отношении повышения точности и качества изготовления деталей обладают новые способы окончательной и доводочной обработки. Большинство из них связано с применением синтетических алмазов и кубического нитрида бора (эльбора). Алмазные и эльборовые круги отличаются высокой размерной стойкостью и обеспечивают в *1,5–2,5* раза более высокую производительность, чем инструмент из обычных абразивных материалов. В настоящее время все большее применение получают резцы, оснащенные сверхтвердыми поликристаллами кубического нитрида бора. Особо эффективны они при обработке стальных деталей, закаленных на твердость *HRC 50–60*. До появления таких резцов стали указанной твердости лезвийным инструментом вообще не обрабатывались. Высокая размерная стойкость кри-

сталлов кубического нитрида бора позволяет при точении получать точность, доступную лишь шлифованию. Возрастает роль в обеспечении высокой точности и твердосплавного инструмента, особенно размерного. Промышленностью освоен выпуск большой номенклатуры монолитного твердосплавного инструмента для обработки отверстий и резьб, всё шире применяются твердосплавные выглаживающие прошивки и протяжки, сборные червячные фрезы и шевера.

Достигнутые успехи в обработке металлов резанием, перспектива дальнейшего повышения точности и качества изготовления деталей, роста производительности труда при станочной обработке находятся в прямой зависимости от качества инструментальных конструкционных материалов и металлорежущего инструмента.

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1. Строение и свойства твердых тел

По своему строению и физическим свойствам твердые тела делятся на аморфные и кристаллические. Основной особенностью кристаллов является периодичность пространственного расположения атомов или молекул, из которых они состоят. Аморфные твердые тела характеризуются беспорядочным, то есть случайным расположением атомов в пространстве и по своему строению ближе подходят к жидкостям.

Аморфные вещества (янтарь, сургуч, воск, стекло) можно рассматривать как жидкости с очень высоким коэффициентом вязкости. Вязкость у них быстро возрастает с понижением температуры, что затрудняет перемещение атомов или молекул, необходимое для формирования и роста кристалла. Образно говоря, при образовании аморфных тел вещество успевает затвердеть до того, как оно превратится в кристалл. Если аморфное тело нагреть, то оно постепенно размягчается. При этом переход в жидкое состояние занимает значительный интервал температур.

У аморфных веществ можно наблюдать даже слабо выраженное свойство текучести. Измерения толщины оконных стекол в старых зданиях, например, показали, что за несколько веков стекло успело «стечь» сверху вниз, так что нижняя часть стекла оказалась немного толще, чем верхняя.

Все это говорит о том, что, строго говоря, твердыми телами следует называть только кристаллы.

В зависимости от вида частиц, образующих кристалл, и от характера сил взаимодействия между ними различают четыре основных типа кристаллов (рисунок 1.1).

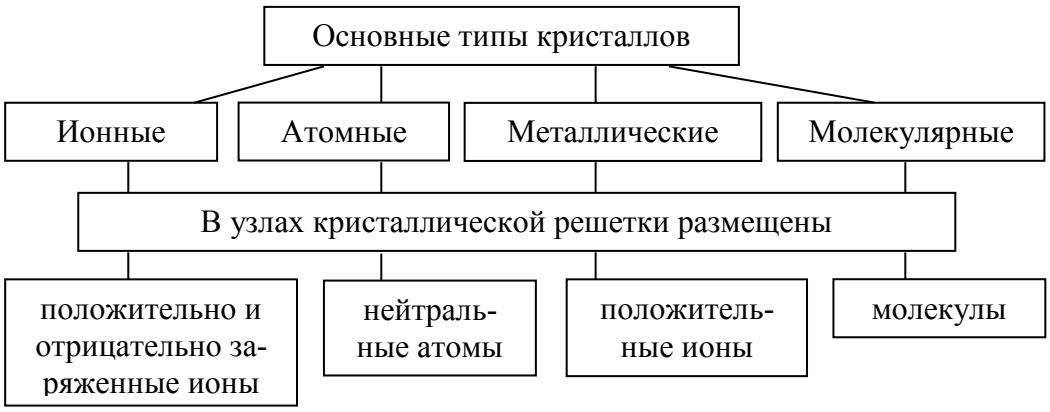


Рисунок 1.1 – Основные типы кристаллов

Существуют одиночные кристаллы, называемые монокристаллами, которые могут иметь довольно большие размеры. Примерами могут служить кристаллы горного хрусталя, размеры которых иногда соизмеримы с ростом человека.

Монокристаллы – твёрдые тела, имеющие во всём объёме единую кристаллическую решётку.

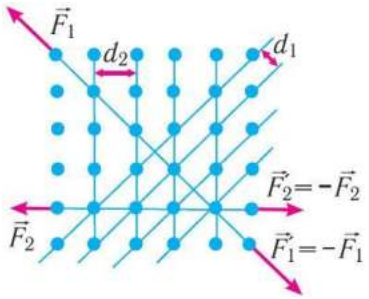


Рисунок 1.2 – Анизотропия кристаллов

Характерной особенностью монокристаллов является их *анизотропия*, т.е. зависимость физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления внутри кристалла. Анизотропия монокристаллов обусловлена различием в плотности расположения частиц в кристаллической решётке по разным направлениям. На рисунке 1.2 показано, что расстояния между атомными плоскостями в кристалле неодинаковы ($d_1 < d_2$). Поэтому, в частности, отличаться будут и силы, необходимые для его разрыва ($F_1 > F_2$). Например, кусок слюды достаточно легко расслоить в одном из направлений на тонкие пластинки, но для того, чтобы разорвать его в направлении, перпендикулярном пластинкам, потребуются гораздо большие усилия.

Большинство кристаллических твёрдых тел являются *поликристаллами*.

Поликристаллы – твёрдые тела, состоящие из большого числа сросшихся между собой маленьких кристаллов.

В отличие от монокристаллов поликристаллы *изотропны*, т. е. их свойства одинаковы по всем направлениям. Это следствие того, что поликристалл состоит из большого количества беспорядочно ориентированных маленьких монокристаллов.

Кристаллические тела имеют определённую температуру плавления $t_{пл}$, не изменяющуюся в процессе плавления при постоянном давлении.

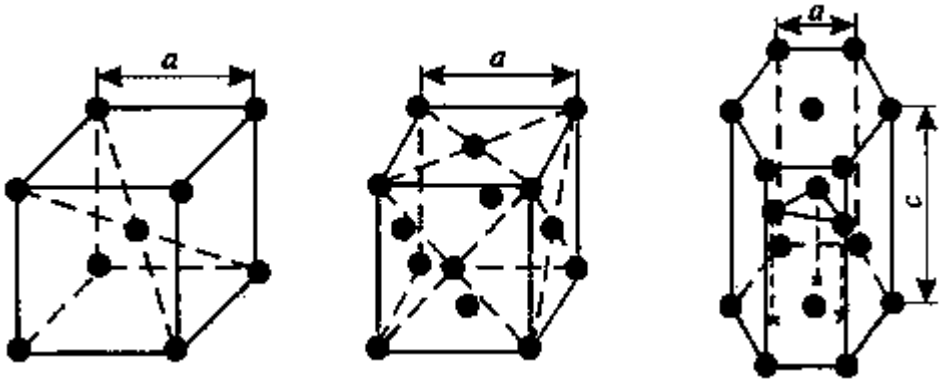
Основными типами кристаллических решеток являются:

1. Объемно-центрированная кубическая кристаллическая решетка (*ОЦК*), в которой атомы расположены в вершинах куба, а также в его центре (*W* – вольфрам, *V* – ванадий, *Ti* – титан, Fe_α).

2. Гранецентрированная кубическая кристаллическая решетка (ГЦК), в которой атомы располагаются в каждой вершине куба и в центре каждой грани (*Ag* – серебро, *Cu* – медь, *Al* – алюминий, *Ni* – никель, Fe_γ).

3. Гексагональная кристаллическая решетка, в основании у которой лежит шестиугольник:

- простая – у нее атомы располагаются в вершинах ячейки и по центру 2 оснований (углерод, представленный в виде графита);
- плотноупакованная (*ГПУ*) – имеется в средней плоскости 3 дополнительных атома (*Zn* – цинк).



а *б* *в*

а – объемно-центрированная кубическая (ОЦК);
б – гранецентрированная кубическая (ГЦК);
в – гексагональная плотноупакованная
Рисунок 1.3 – Основные типы кристаллических решеток

1.2. Конструкционная прочность деталей машин

Конструкционная прочность – это способность материала или конструкции сопротивляться разрушению под воздействием внешних нагрузок. Она является одним из основных критериев при выборе материала для инженерных конструкций.

Существует несколько факторов, которые оказывают влияние на конструкционную прочность:

1. Свойства материала

Механические свойства материала, такие как прочность, твердость, упругость и пластичность, играют важную роль в определении его конструкционной прочности. Материалы с высокой прочностью и твердостью обычно обладают лучшей конструкционной прочностью.

2. Геометрия и форма конструкции

Геометрия и форма конструкции также влияют на её прочность. Конструкции с более сложной геометрией и формой могут быть более подвержены разрушению, поскольку они могут иметь больше точек концентрации напряжений.

3. Внешние нагрузки

Внешние нагрузки, такие как сила, давление, температура и влажность, могут оказывать влияние на конструкционную прочность. Например, повышенная температура может вызвать деформацию материала и уменьшить его прочность.

4. Состояние окружающей среды

Состояние окружающей среды, включая агрессивные химические вещества, влажность и коррозию, также может влиять на конструкционную прочность. Некоторые материалы могут быть более устойчивы к коррозии и другим вредным воздействиям окружающей среды, что повышает их конструкционную прочность.

Все эти факторы должны быть учтены при выборе материала и проектировании конструкции, чтобы обеспечить ее оптимальную конструкционную прочность.

Прочность оценивается несколькими способами:

а) с помощью допускаемых напряжений;

б) запасами прочности;

в) статистическими запасами прочности.

Наибольшее распространение получил метод расчета по допускаемым напряжениям, согласно которому наибольшее напряжение σ_{max} в некоторой точке нагруженной детали не должно превышать определенной величины, свойственной данному материалу и типу детали.

Условие прочности детали по допускаемому напряжению имеет вид

$$\sigma_{max} \leq [\sigma], \tag{1.1}$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, *МПа*.

Такая оценка удобна, и поэтому на практике для однотипных конструктивных элементов (деталей), устоявшейся технологии их изготовления, стабильных условий нагружения разработана система допускаемых напряжений, обобщающая предшествующий опыт эксплуатации машин, приборов и аппаратов различного назначения.

Однако такой оценке прочности присущи и недостатки:

1) величина допускаемого напряжения носит условный характер, так как не отражает характера предполагаемого разрушения, режима нагружения и других факторов, влияющих на надежность;

2) допускаемое напряжение, особенно при переменной нагрузке, зависит от геометрии детали, материала, технологии изготовления, что затрудняет его использование в качестве нормативной характеристики;

3) величина $[\sigma]$ не дает представления о надежности детали в явном виде, так как в формуле (1.1) не показано соотношение действующих и предельных напряжений для материала детали (предела текучести σТ, предела прочности σв, предела выносливости и др.).

В инженерных расчетах допускаемые напряжения используют в основном для предварительных расчетов, связанных с приближенным определением основных размеров деталей.

Широкое распространение получил также расчет по запасам прочности. Условие прочности в этом случае

$$S = \frac{\sigma_{пред}}{\sigma_{max}}, \tag{1.2}$$

где $[S]$ – запас прочности;

$\sigma_{пред}$ – предельное напряжение (предел прочности при постоянных нагрузках, предел выносливости при переменных нагрузках), полученное экспериментально или взятое из справочника;

$\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение в опасной точке детали, вычисленное при наибольшей (ожидаемой или установленной тензометрированием) рабочей нагрузке.

Величина $\sigma_{пред}$ отражает геометрию детали, технологию её изготовления и условия нагружения, поэтому величина необходимого запаса прочности имеет стабильное значение.

Условия прочности по допускаемым напряжениям и запасам прочности связаны соотношением

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{пред}}{[S]}, \tag{1.3}$$

При действии статических нагрузок иногда используют запас прочности по несущей способности

$$\mathrm{S} = \frac{F_{разр}}{F}, \tag{1.4}$$

показывающий отношение нагрузок в момент разрушения и в рабочих условиях.

В описанных методах оценки прочности носят детерминированный характер и не учитывают должным образом неизбежное рассеяние разрушающих и максимальных напряжений.

Статические запасы прочности являются более обоснованными характеристиками прочностной надежности, в особенности для отказов конструкций с тяжелыми последствиями.

Переменные напряжения в детали в процессе работы определяют с помощью тензометрирования. Рассеяние рабочих напряжений вызвано колебаниями нагрузки при работе машины.

Предел выносливости детали определяют экспериментально на некоторой базе испытаний (обычно 10^7 циклов). Разброс характеристик сопротивления усталости деталей обусловлен нестабильностью механических свойств металла даже в пределах одной плавки, отклонениями в режиме термообработки, отклонениями размеров деталей в пределах допусков, микроскопическими источниками рассеяния, связанными с неоднородной структурой материала и др.

Так как разрушающее и действующее напряжения являются случайными величинами, то и запас прочности конкретной детали является случайной величиной с функцией распределения *F(S):*

$$[\mathrm{s}](\mathrm{q}) = \frac{\sigma_{рар} - u_{1-q} S_{\varsigma_{рар}}}{\sigma_{\max} + u_{1-q} S_{\sigma_{\max}}} = [s] \frac{1 - u_{1-q} \nu_{\sigma_{рар}}}{1 - u_{1-q} \nu_{\sigma_{\max}}}, \tag{1.5}$$

где u_{1-q} – односторонний квантиль доверительной вероятности $P_Д = 1-q$;

$[s] = \sigma_{разр} / \sigma_{\max}$ – запас прочности по средним напряжениям;

$\nu_{\sigma_{разр}} = s_{\sigma_{разр}} / \sigma_{разр}$ и $[s]_{\sigma_{\max}} = s_{\sigma_{\max}} / \sigma_{\max}$ – коэффициенты вариации.

Величины u_{1-q} для некоторых значений уровня значимости следующие:

q ……	0,10	0,05	0,01	0,0014
u_{1-q} ……	1,29	1,64	2,33	3,0.

Статические запасы прочности, как и обычные запасы прочности, имеют условное значение. Их используют как критерии сравнения надежности вновь создаваемых изделий с изделиями, удовлетворительно эксплуатируемыми.

Основное преимущество статических запасов прочности перед детерминистскими (обычными) запасами состоит в том, что сопоставление приводится к одинаковым условиям по рассеянию значений $\sigma_{разр}$ и σ_{max} (по объему используемой информации).

Контрольные вопросы

1. Какие тела называют аморфными?
2. Перечислите основные типы кристаллов.
3. Что такое поликристаллы?
4. Основные типы кристаллических решеток.
5. Какие факторы влияют на конструкционную прочность?
6. Способы оценки прочности.

2. МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Выбор материала и термообработки деталей машин определяется конструктивными соображениями (обеспечение надежности), технологическими (единичное, серийное, массовое производство) и экономическими. Для изготовления деталей машин широко применяют стали и чугуны, а также алюминиевые, магниевые, титановые и медные сплавы.

2.1. Стали

Сталью называют сплав железа с углеродом и другими элементами с содержанием углерода до *2,14%.*

Стали классифицируют по следующим признакам: химическому составу, способу производства, содержанию вредных примесей, структуре, области применения.

По *химическому составу* различают стали углеродистые и легированные. По основным легирующим элементам стали называют хромистыми, кремнистыми, хромоникелевыми, хромомарганцеванадиевыми и т. п. В зависимости от содержания легирующих элементов легированные стали делят на низколегированные (до *2,5%),* среднелегированные (*2,5–10%)* и высоколегированные (более *10%*).

По *способу производства* стали бывают: особых методов выплавки, электростали, конвертерные и мартеновские.

По *содержанию вредных примесей* (серы и фосфора) различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные.

Стали обыкновенного качества – углеродистые стали с содержанием углерода до *0,5%* – выплавляют в кислородных конвертерах и мартеновских печах; содержание фосфора до *0,07%* и серы до *0,06%*. Их разделяют на три группы. К группе *А* относятся стали, регламентируемые по механическим свойствам. Их маркируют буквенно-цифровым кодом *Ст0, Ст1,..., Ст6*, где цифра обозначает условный номер марки. Группа *Б* содержит стали, регламентируемые по химическому составу. Их обозначают *БСт0, ..., БСт6*. В группу *В* включены стали, регламентируемые по механическим свойствам и химическому составу. Их обозначают *ВСт1,..., ВСт6*. Для обозначения степени раскисления к обозначению марки стали после номера марки добавляют индексы: *кп* – кипящая, *пс* – полуспокойная, *сп* – спокойная, например, *Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, БСт3кп, ВСт3сп*.

Стали качественные – углеродистые и легированные – выплавляют преимущественно в основных мартеновских печах; содержание серы и фосфора до *0,035–0,04%* каждого. Углеродистые качественные конструкционные стали обозначают двузначными цифрами, которые показывают среднее содержание углерода в стали, выраженное в сотых долях процента. Например,

сталь марки *20* содержит в среднем *0,20%* углерода, сталь *45–0,45%* и т. д. Степень раскисления указывают после номера марки, например сталь *08кп*.

Стали высококачественные – главным образом легированные стали – выплавляют преимущественно в электропечах, а также в кислых мартеновских печах; содержание серы и фосфора до *0,025%* каждого.

Стали особо высококачественные – легированные стали – выплавляют в электропечах, электрошлаковым переплавом и другими совершенными методами; содержание серы и фосфора до *0,015%* каждого.

По *структуре* подразделяют стали, поставляемые в отожженном и нормализованном состояниях.

По *области применения* стали подразделяют на следующие группы: конструкционные стали – для изготовления деталей машин и металлоконструкций; инструментальные стали – для изготовления режущего и измерительного инструмента; стали и сплавы с особыми свойствами – например, жаропрочные, коррозионностойкие, магнитные и др.

Углеродистые инструментальные стали маркируют буквой *У* с цифрой, обозначающей среднее содержание углерода, выраженное в десятых долях процента. Например, сталь марки *У8* содержит в среднем *0,8%* углерода, сталь *У10 – 1%* и т. д. Для высококачественных сталей в конце марки ставят букву *А*. Например, стали *У8, У10* – качественные, *У8А, У10А* – высококачественные.

В основу обозначения марок легированных сталей положена буквенно-цифровая система. Легирующие элементы указывают русскими буквами: марганец – *Г*, кремний – *С*, хром – *Х*, никель – *Н*, вольфрам – *В*, ванадий – *Ф,* титан – *Т*, молибден – *М*, кобальт – *К*, алюминий – *Ю*, медь – *Д*, бор – *Р*, ниобий – *Б*, цирконий – *Ц*, фосфор – *П*, азот – *А*, селен – *Е*, редкоземельные металлы – *Ч.*

В марках легированных конструкционных сталей, например *15Х, 14Г2, 25ХГТ, 30ХЗМФ, 55С2* и др., двузначные цифры в начале расшифровки марки означают среднее содержание углерода в сотых долях процента, цифры после букв – примерное содержание соответствующего легирующего элемента в процентах. Отсутствие цифры указывает на то, что последнее составляет около *1%*. Для высококачественных сталей в конце марки ставят букву А. Например, сталь *30ХГС* – качественная сталь, а сталь *30ХГСА* – высококачественная.

В марках легированных инструментальных сталей, например *9ХФ, 12М, 7Х3, 3Х2В8Ф* и др., цифра в начале марки указывает среднее содержание углерода в десятых долях процента, если его содержание менее *1%*. При содержании углерода в сталях более *1%* цифру не пишут. Расшифровка марок инструментальных сталей по содержанию легирующих элементов такая же, как для конструкционных сталей. Все инструментальные легированные стали и стали с особыми свойствами (например, жаропрочные марок *40Х9С2*, *20Х12ВНМФ* и др., коррозионно-стойкие марок *30Х13*, *12Х18Н9* и др.) всегда

высококачественные, и поэтому в обозначениях этих сталей буква *А* не ставится.

В маркировке сталей иногда вначале ставят буквы, указывающие их применение: *А* – автоматные стали, *Р* – быстрорежущие, *Ш* – шарикоподшипниковые, *Э* – электротехнические, а в конце – буквы, указывающие способ рафинирующего переплава: *Ш* – электрошлаковый переплав, *ВД* – вакуумный дуговой переплав и др.

Термическая обработка

Для придания стали определенных свойств (высокой прочности, пластичности и т. д.) выполняют термическую обработку заготовок или готовых деталей, которая состоит из трех последовательных стадий: нагрева до требуемой температуры с определенной скоростью, выдержки при этой температуре в течение требуемого времени и охлаждения с заданной скоростью. Наиболее распространены четыре процесса термической обработки: отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

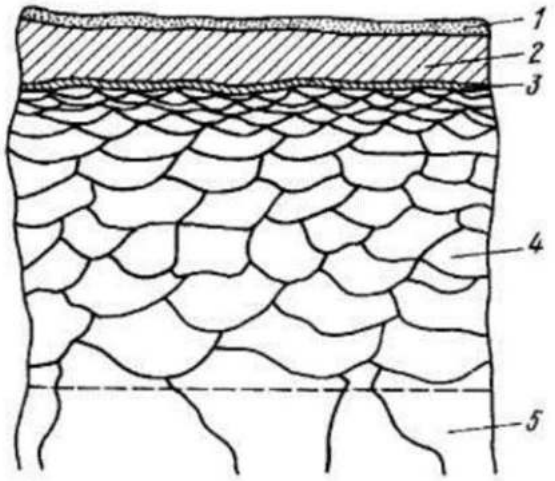
Отжиг, характеризуемый медленным охлаждением (вместе с печью или на воздухе) после нагрева и выдержки при некоторой температуре деталей и заготовок, проводят для снижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием отливок, проката и поковок из углеродистых легированных сталей, а также для снятия остаточных напряжений в конструкциях после сварки или предварительной (черновой) обработки резанием. Для углеродистых и углеродистых легированных сталей проводят полный отжиг – нагрев до температуры, превышающей на *30–50 °С* температуру превращения объемноцентрированной решетки железа в гранецентрированную кубическую решетку (обычно 800 – *900 °С*), выдержку при этой температуре, медленное охлаждение до *400–600 °С* вместе с печью и далее на воздухе. Для низкоуглеродистых высоколегированных сталей *12Х2Н4А*, *20Х2Н4А* и др., используемых для изготовления зубчатых колес, применяют низкотемпературный (высокий) отжиг при температуре *650–670 °С* и медленное охлаждение (чаще всего на воздухе). Используют и другие виды отжига, которые отличаются от высокого отжига температурой нагрева и скоростью охлаждения.

Нормализация отличается от полного отжига характером охлаждения, которое после выдержки производят на воздухе. Её применяют для получения однородной структуры с более высокой твердостью и прочностью, чем после отжига, для исправления структуры сварных швов, выравнивания структурной неоднородности поковок и отливок, а также для улучшения обрабатываемости резанием сталей.

Закалка отличается от полного отжига и нормализации высокой скоростью охлаждения заготовок или деталей после нагрева до температуры превращения и выдержки при этой температуре. Высокая скорость охлаждения достигается за счет использования в качестве охлаждающей среды воды, масла, водных растворов солей *NaOH*, *NaCL* и др. В результате металл приобретает мелкозернистую однородную структуру с высокой твердостью, прочностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, но пониженной

пластичностью и более трудной обрабатываемостью резанием. Закалку широко используют для обработки отливок, поковок, штамповок и обработанных деталей из средне- и высокоуглеродистых и легированных сталей для получения высоких эксплуатационных характеристик.

Существует ряд разновидностей объемной закалки, отличающихся условиями и характером быстрого охлаждения. Широко применяют поверхностную закалку – нагрев с большой скоростью поверхностного слоя стальной детали (токами высокой частоты, электронным лучом и др.) выше температуры превращений и последующее быстрое охлаждение с получением мелкозернистой структуры в поверхностном слое определенной толщины. При поверхностной закалке коробление (деформация) деталей меньше, чем при объемной. Поверхностной закалке подвергают детали машин (зубья колес, кулачки, валы и др.), изготовленные из углеродистых и низколегированных сталей марок *40*, *45*, *50*, *40Х*, *40ХН*, *45Х* и др. Высокая твердость и прочность поверхностных слоев деталей после поверхностной закалки обеспечивают им высокую износостойкость и контактную прочность (рисунок 2.1).



1 – адсорбированный слой, состоящий из пленок влаги, газов и загрязнений (*0,01–0,1 мкм*); *2* – слой оксида, имеющий повышенную твердость; *3* – слой с сильно деформированной кристаллической решеткой в результате наклепа; *4* – более глубокий слой с искаженной кристаллической решеткой и большим числом вакансий и дислокаций; *5* – металл с исходной структурой

Рисунок 2.1 – Структура поверхностного слоя металла детали

Отпуск – нагрев до температуры ниже интервала превращений, выдержка и последующее охлаждение для повышения вязких свойств, уменьшения термических остаточных напряжений и улучшения обрабатываемости резанием. Обычно применяют после закалки (нормализации) стальных отливок, поковок, проката и механически обработанных деталей. В зависимости от температуры нагрева различают высокий отпуск (температура нагрева *500–670* ^{o}C), средний отпуск (*250–450* ^{o}C) и низкий отпуск (*140–230* ^{o}C). С увеличением температуры нагрева повышается пластичность стали после отпуска.

Химико-термическая обработка. При химико-термической обработке изменяется химический состав поверхностных слоев деталей, что позволяет получить мелкозернистую структуру, высокую твердость, прочность и износостойкость деталей. Существует ряд способов такой обработки: цементация – насыщение поверхностных слоев стали углеродом; азотирование – насыщение азотом; цианирование – одновременное насыщение углеродом и азотом; борирование – насыщение бором и др.

Глубина насыщения невелика, обычно *0,2–1 мм*. Цементации подвергают детали из низкоуглеродистых легированных сталей *15, 20Х, 12Х2Н4А, 12ХН3А, 18Х2Н4МА* и др. Для изготовления азотируемых деталей обычно используют стали *38Х2МЮА, 38Х2Ю* и др., а для цианируемых деталей – стали марок *15, 20, 45, 35Х, 40Х* и др.

2.2. Чугуны

Чугун – самый распространенный железоуглеродистый нековкий литейный материал, содержащий свыше *2%* углерода, до *4,5%* кремния, до *1,5%* марганца, до *1,8%* фосфора и до *0,08%* серы. В практике применяют чугуны, содержащие *3÷3,5%* углерода.

Чугун обладает высокими литейными свойствами, поэтому широко используется в литейном производстве в качестве конструкционного материала. Он хорошо обрабатывается резанием.

Недостаточная прочность и большая хрупкость чугуна объясняются наличием в нем крупных включений углерода в виде графита. Чугуны состоят из металлической основы (перлита, феррита) и неметаллических включений графита. Они различаются главным образом формой графитовых включений.

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).

Белые чугуны имеют высокую твердость, хрупки, плохо обрабатываются резанием. Серые чугуны обладают более высокими технологическими и прочностными свойствами; их чаще всего применяют как конструкционный материал.

Маркировку чугунов осуществляют путем сочетания букв и цифр. Приняты следующие буквенные обозначения:

Ч – чугун;

С – серый;

К – ковкий;

В – высокопрочный;

М – модифицированный.

Цифрами обозначают механические свойства чугуна. В марках серого чугуна первые две цифры после букв указывают предел прочности при растяжении, вторые – предел прочности при изгибе в $Н/мм^2$. В ковком и высо-

копрочном чугунах первые две цифры обозначают предел прочности при растяжении, вторые – относительное удлинение.

В таблицах 2.1–2.5 приведены виды, механические свойства чугунных отливок и области их применения, а в таблице 2.6 – механические свойства чугунных отливок при различных видах нагружения.

Химический состав и свойства отливок из серого чугуна с пластинчатым графитом, высокопрочного и ковкого чугуна регламентированы *ГОСТ 1412-79, ГОСТ 7293-79* и *ГОСТ 1215-79*.

Для работы при повышенных температурах и в окислительных средах применяют жаростойкие, коррозионно-стойкие и жаропрочные чугуны. Их химический состав и механические свойства регламентированы *ГОСТ 7769-82*.

Таблица 2.1 – Виды чугунных отливок и области их применения

Виды отливок	Назначение отливок и условия их применения
Из обычного серого чугуна (с пластинчатым графитом)	Определяющий фактор – механические свойства: при $\sigma_в \leq 240$ Н/мм^2 отливки изготавливают из простых чугунов, при $\sigma_в > 240$ Н/мм^2 применяют модифицирование, легирование и их сочетание
Из высокопрочного чугуна (с шаровидным графитом)	Как конструкционный материал с высокой прочностью и удовлетворительной пластичностью (иногда вместо стали). Могут обладать и специальными свойствами. Структуру получают путем введения специальных модификаторов (магния, церия) в жидкий чугун
Из чугуна со специальными свойствами	Детали, требующие жаростойкости, ростоустойчивости, жаропрочности, коррозионной стойкости, немагнитности и др.
Из ковкого чугуна	Детали машин, требующие высокой прочности и пластичности. Получение структуры основано на отжиге отливок, имеющих в литом состоянии структуру белого чугуна
Из белого чугуна	Детали, не требующие механической обработки и работающие в условиях абразивного изнашивания при сухом трении; исходный материал для получения ковкого чугуна
Из отбеленного чугуна	Детали, работающие на изнашивание аналогично белому чугуну. Отбеленный слой расположен лишь на рабочей поверхности отливки

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 зна-

чительно повышается прочность, ударная вязкость, износостойкость и другие свойства.

Серый чугун является основным литейным машиностроительным материалом. Обладает хорошими литейными свойствами, средней прочностью, малым удлинением при разрушении, ограниченной ударной вязкостью, удовлетворительной износостойкостью, хорошей обрабатываемостью резанием, сравнительно низкой стоимостью. Серые чугуны 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*.

Таблица 2.2 – Механические свойства отливок из серого чугуна и области их применения

Марка чугуна	$\sigma_{в.р.}$, *Н/мм*^{2}	$\sigma_{в.р.}$, *Н/мм*^{2}	Стрела прогиба *мм*, при расстоянии между опорами, *мм*		*НВ*	Назначение
			600	*300*		
	не менее					
1	2	3	4	5	6	7
СЧ00	–	–	–	–	–	Детали простой конфигурации, не обрабатываемые или подвергаемые незначительной механической обработке: крышки, подкладки, опоры, грузы
СЧ12-38	120	280	6	2	143–229	Детали, работающие при небольшом напряжении и без трения: кожухи, плиты, стойки, крышки
СЧ15-32 СЧ18-36	150 180	320 360	8 8	2,5 2,5	163–229 170–229	Детали, работающие при среднем напряжении и на износ при малых (до *50 Н/мм*^{2}) удельных нагрузках: столы, салазки, шкивы, кронштейны и др.

Окончание таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7
СЧ21-40 СЧ24-44 СЧ28-48 СЧ32-52	210 240 280 320	400 440 480 520	9 9 9 9	3 3 3 3	170–241 170–241 170–241 187–269	Детали, работающие при повышенном напряжении и на износ при удельных усилиях *50–200 Н/мм²*: станины металлорежущих станков, зубчатые колеса, маховики, тормозные барабаны, гильзы и поршни дизелей
СЧ36-56 СЧ40-60 СЧ44-64	360 400 440	560 600 640	9 10 10	3 3,5 3,5	197–269 207–269 229–289	Гидроцилиндры, корпусы гидронасосов и компрессоров высокого давления, головки блоков двигателей, кулачки

Таблица 2.3 – Механические свойства отливок из ковкого чугуна

Марка чугуна	$\sigma_{B.P.}$, *Н/мм²*	*δ, %*	*НВ,* не более	Марка чугуна	$\sigma_{B.P.}$, *Н/мм²*	*δ, %*	*НВ*, не более
	не менее				не менее		
КЧ30-6	300	6	163	КЧ50-4	500	4	241
КЧ33-8	330	8	163	КЧ56-4	560	4	269
КЧ35-10	350	10	163	КЧ60-3	600	3	269
КЧ37-12	370	12	163	КЧ60-4	630	2	269
КЧ45-6	450	6	241				

Таблица 2.4 – Механические свойства отливок из высокопрочного чугуна

Марка чугуна	σ_B, *Н/мм²*	*σ, Н/мм²*	*δ, %*	α_H, *Дж/см²*	*НВ*
	не менее				
ВЧ38-17	380	240	17	60	140–170
ВЧ42-12	420	280	12	40	140–200
ВЧ45-5	450	330	5	30	160–220
ВЧ50-2	500	380	2	20	180–260
ВЧ60-2	600	400	2	20	200–280
ВЧ70-3	700	400	3	30	229–275
ВЧ80-3	800	500	3	20	220–300
ВЧ100-4	1000	700	4	30	302–369
ВЧ120-4	1200	900	4	30	302–369

Таблица 2.5 – Свойства отливок из жаростойкого чугуна

Марка чугуна	$\sigma_{B.P.}$, $Н/мм^2$	$\sigma_{B.P.}$, $Н/мм^2$	*НВ*	$\sigma_{B.P.}$ ($Н/мм^2$) при температуре, °С				Предельная температура эксплуатации в воздушной среде, °С
	при температуре *20 °С*			*500*	*600*	*700*	*800*	
ЖЧХ-0,8	80	360	207–286	200	150	70	30	550
ЖЧХ-1,5	150	320	207–286	200	150	80	30	600
ЖЧХ-2,5	–	320	228–364	170	150	90	30	650
ЖЧХ-30	360	500	370–550	400	360	230	150	1000
ЖЧС-5,5	100	240	140–225	120	100	50	20	800
ЖЧСШ-5,5	420	–	228–321	450	390	120	40	900
ЖЧЮ-22	90	220	140–286	100	–	70	40	1000
ЖЧЮШ-22	250	350	241–375	250	280	170	140	1100

Таблица 2.6 – Механические свойства чугунных отливок при различных видах нагружения

Марка чугуна	Предел прочности ($Н/мм^2$) при				Предел выносливости ($Н/мм^2$) при	
	изгибе $\sigma_{B.И.}$	растяжении $\sigma_{B.P.}$	сжатии $\sigma_{B.C.}$	кручении τ_B	изгибе σ_{-1}	кручении τ_{-1}
СЧ15-32	320	150	650	240	70	50
СЧ18-36	360	180	700	260	80	60
СЧ21-40	400	210	750	280	100	80
СЧ24-44	440	240	850	300	120	100
СЧ28-48	480	280	1000	350	140	110
СЧ32-52	520	320	1100	390	140	110
СЧ36-56	560	360	1200	400	150	115
СЧ40-60	600	400	1300	460	150	115
КЧ30-6	490	300	310	340	90	80
КЧ33-8	530	330	340	340	95	90
КЧ35-10	570	350	360	350	105	95
КЧ37-12	580	370	380	370	105	95

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

В *ковких чугунах* весь углерод или значительная его часть находится в свободном состоянии в форме хлопьевидного графита (углерода отжига), что

обеспечивает более высокие механические свойства в сравнении с серыми чугунами. Механическая обработка обезуглероженного ковкого чугуна позволяет получать более чистую поверхность, что является одним из важных факторов, например, в резьбовых соединениях. Ковкий чугун не куется.

Модифицированный чугун получают добавкой в ковш небольшого количества графитизирующих (ферросилиций, силикокальций или силикоалюминий) и легирующих (молибден, никель и др.) элементов. Отличается от обычного чугуна более высокими механическими и особыми свойствами: жаропрочностью, коррозионной стойкостью, возможностью термической обработки и др.

Высокопрочный чугун представляет собой серый чугун, модифицированный магнием и церием, в результате чего достигается глобулярная форма графита, что позволяет существенно уменьшить внутреннюю концентрацию напряжений; отличается высокими механическими свойствами.

Жаростойкие чугуны предназначены для эксплуатации при температурах до *1100 °С*.

В *белых чугунах* весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде карбида железа, поэтому они отличаются высокими твердостью, хрупкостью и практически не поддаются обработке резанием. Белый чугун не находит применения в качестве конструкционного материала. Обычно доэвтектические белые чугуны после специальной термической обработки превращаются в ковкие чугуны, а заэвтектические идут в переплавку для выплавки стали. Для изготовления трущихся изделий (валки прокатных станов, шары для мельниц и т. п.) 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 ковкие и антифрикционные чугуны.

В серых чугунах весь углерод находится в свободном состоянии в виде пластинчатого графита. Эти чугуны могут иметь структуру, состоящую из ферритной основы 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.).

Высокопрочный чугун получают присадкой в жидкий серый чугун добавок магния, церия и некоторых других элементов. Под влиянием добавок в чугуне образуется шаровидный графит. Такие чугуны имеют более высокие механические свойства, и отливки из них могут быть использованы вместо

поковок и отливок из углеродистой стали для деталей машин, работающих в тяжелых условиях.

Из высокопрочного чугуна изготавливают коленчатые валы и поршни автомобильных и тракторных двигателей, шестерни, тормозные диски, корпусы насосов и др. Некоторые высокопрочные чугуны используются в качестве антифрикционного материала в узлах трения с высокими окружными скоростями.

Ковкий чугун получают из белого чугуна путем длительного нагрева при высоких температурах (отжиг, томление). В результате распада цементита получается графит хлопьевидной формы.

Ковкий чугун широко используется в автомобильной, сельскохозяйственной, текстильной и других отраслях машиностроения. Из него изготавливают детали, работающие при средних и высоких статических и динамических нагрузках (подшипники, кронштейны, картеры редукторов, поршни, ступицы и др.).

Широкое применение ковкого чугуна в машиностроении связано с тем, что он дешевле стали и обладает высокой стойкостью к коррозии.

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) валами и с термически не обработанными валами.

2.3. Медь и её сплавы

Наиболее важными свойствами меди, обеспечившими ее широкое применение, являются хорошая электро- и теплопроводность, высокая пластичность и способность образовывать технологичные сплавы, которые отлично обрабатываются и обладают хорошими механическими свойствами.

Температура плавления меди *1083 ºС*. Предел прочности чистой меди не очень высок и составляет *220 МПа*. Ее кристаллическая решетка кубическая гранецентрированная с параметром *а=0,361 нм*. Плотность меди *8,93 г/см^3*, а твердость *НВ 35*, что почти в два раза меньше, чем у железа.

Наиболее распространенными и известными сплавами меди являются латуни и бронзы.

Латунями называют группу сплавов, где основными компонентами являются медь и цинк. В группу латуней входят томпак (*90%* и более меди, остальное – цинк, если эти сплавы содержат до *86%* меди, их называют полутомпаками) и много других, не только двойных, но и более сложных сплавов. Механическая прочность латуней выше, чем меди.

Латуни хорошо обрабатываются резанием. Большим преимуществом является, кроме того, их низкая стоимость, так как цинк значительно дешевле меди. Латуни широко применяют в приборостроении, в общем и химическом машиностроении. Наиболее часто используют латуни, содержащие до *40%* цинка. Эти латуни пластичны, хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии и коррозионностойки. Латуни имеют хорошие литейные свойства (большая жидкотекучесть, отсутствие ликвации, малая усадка и др.). Но при их заливке в формы необходима хорошая вентиляция цеха, так как пары, выделяющиеся из жидких латуней, вредно влияют на организм человека.

Все латуни по технологическому признаку делят на деформируемые, из которых изготовляют листы, ленты, трубы, проволоку, и литейные – для фасонного литья.

Медно-цинковые деформируемые латуни выпускают восьми марок: *Л96, Л90, Л85, Л80, Л70, Л68, Л63, Л60*.

В обозначениях марок латуней более сложного состава после буквы *Л* следует сокращенное обозначение легирующих элементов: *О* – олово, *С* – свинец, *Ж* – железо, *Мц* – марганец, *Н* – никель, *К* – кремний, *А* – алюминий, а после них – цифры, указывающие содержание меди и других компонентов. Например: *ЛС-59-1* означает латунь свинцовистая, содержащая *57–60%* меди и *0,8–1,5%* свинца; *ЛМцА-57-3-1* – латунь марганцовистоалюминиевая, содержащая *2,5–3,5%* марганца и *0,5–1,5%* алюминия.

Добавки указанных металлов к латуням улучшают их механические свойства, обрабатываемость или коррозионную стойкость. Так, добавки никеля повышают прочность и коррозионную стойкость, добавки свинца ухудшают механические свойства латуней, но улучшают обрабатываемость резанием.

В литейных латунях цифровые обозначения содержания меди и добавок ставить не принято. Так, латунь, содержащая *56–61%* меди и *0,8–1,5%* свинца, обозначается *ЛС*. Такая латунь предназначается для литья под давлением и других видов литья деталей для газовой, санитарной, гидравлической, пневматической аппаратуры и для электротехнических деталей.

Кремнистые латуни *ЛК* (*80%* меди, *3%* кремния) и *ЛКС* (*80%* меди, *3%* кремния и *3%* свинца), имеющие повышенную коррозионную стойкость и обладающие хорошими антифрикционными свойствами, применяют для изготовления литьем сложных по конфигурации деталей приборов и арматуры, работающих в морской воде, шестерен и других трущихся деталей. Латунь *ЛАЖМц*, содержащая *63–70%* меди, *4,0–7,0%* алюминия, *1,5–3,0%* марганца, *2,0–4,0%* железа, предназначена для конструкционных деталей ответственного назначения, работающих при высоких знакопеременных нагрузках.

Широко известны сплавы меди с оловом, называемые *бронзами*. Из бронзы еще в древности делали оружие, орудия труда, предметы обихода, так как бронза более прочна и коррозионностойка, чем медь. Благодаря отличным литейным качествам из этих сплавов в более позднее время стали отливать пушки, колокола и статуи.

Современные оловянистые бронзы значительно тверже меди, но хорошо заполняют форму при литье и обрабатываются резанием, а также отличаются высокой коррозионной стойкостью.

В настоящее время бронзы используют при изготовлении арматуры газовых и водопроводных линий, в химическом машиностроении и во многих других отраслях промышленности. Малый коэффициент трения и устойчивость к изнашиванию делает их незаменимыми при изготовлении вкладышей подшипников, червячных колес, шестерен и других деталей ответственных и точных приборов.

Бронзы маркируют русскими буквами *Бр*, после которых, как и в латунях, буквами указывают другие компоненты (кроме меди), а в конце – цифрами процентное содержание компонентов. Легирующие элементы обозначают: *О* – олово, *А* – алюминий, *Ж* – железо, *Ф* – фосфор, *Т* – титан, *Ц* – цинк и др. Так, *БрОЦ4-3* обозначает, что в бронзе в среднем *4%* олова, *3%* цинка, остальное – медь.

Олово – дорогой и дефицитный металл, поэтому широкое применение нашли заменители оловянистых бронз, именуемые безоловянистыми бронзами. К ним следует отнести в первую очередь алюминиевые бронзы, например *БрА5*, и более сложные – обрабатываемые давлением, например *БрАЖМц10-3-1,5*. Это – устойчивые к коррозии, жаропрочные и износостойкие сплавы. Они используются для изготовления деталей химической аппаратуры, а *БрА5* – для изготовления монет. Алюминиевые бронзы с содержанием алюминия до *10%* характеризуются хорошей жидкотекучестью, малой ликвацией, хорошо деформируются в горячем и холодном состояниях, так как эти сплавы образуют однофазный твердый раствор алюминия и меди. Добавки никеля, железа, марганца и свинца улучшают механические и некоторые технологические свойства алюминиевых бронз. В качестве примера можно привести литейную бронзу *БрА10Ж3* и *БрА10Ж3Мц2*.

Высокими механическими свойствами, пластичностью и коррозионной стойкостью отличаются кремнистые бронзы, например *БрКН-1-3*, содержащая *0,6–1,1%* кремния, *2,4–3,4%* никеля, и марганцовистые бронзы, например *БрМц5*, содержащая *4,5–5,5%* марганца. Очень большой прочностью и упругостью обладают бериллиевая бронза *БрБ2*, в состав которой входят *1,8–2,1%* бериллия и *0,2–0,5%* никеля (остальное медь), и некоторые другие. Из них изготовляют пружины, пружинящие контакты ответственных приборов и др.

В последнее время получил известность сплав меди и никеля – мельхиор – белый, блестящий, не окисляющийся на воздухе и в органических кислотах сплав, иногда называемый за свой вид китайским серебром. Он содержит

около *80%* меди и *20%* никеля. (Нередко часть никеля и меди заменяют цинком). Из мельхиора изготовляют украшения, столовые и чайные приборы.

Для изготовления монет применяют так называемый монель-металл (*68% Ni, 28% Cu* и небольшие добавки марганца и железа). Высокая коррозионная стойкость этого сплава, хорошие механические свойства и легкая обрабатываемость сделали возможным его использование для изготовления не только разменной монеты, но и хирургических инструментов, деталей машин и приборов.

2.4. Алюминий и его сплавы

Алюминий – второй (после железа), самый применяемый в современной технике металл. Температура плавления алюминия *660 ºС*, температура кипения около *2500 ºС*. Наиболее важными свойствами алюминия, определяющими его широкое применение, являются малая плотность (ρ*=2,7 г/см*^{3}), высокие электропроводность (*57%* электропроводности меди), теплопроводность и теплоемкость.

Алюминий очень быстро окисляется на воздухе, покрываясь тонкой пленкой окиси, которая в отличие от окиси железа не пропускает кислород в толщу металла. Следовательно, алюминий, несмотря на быстрое окисление, при нормальных условиях коррозионностоек. Его кристаллическая решетка – гранецентрированный куб с параметром *а = 0,404 нм*. Никаких аллотропических превращений у алюминия не обнаружено.

Механические свойства алюминия сравнительно невысоки. Предел прочности на растяжение $\sigma_в$*=90–180 МПа*, твердость *НВ 20–40*, он имеет высокую пластичность, что дает возможность прокатывать его в очень тонкие листы. Необходимо отметить, однако, трудность обработки чистого алюминия резанием, а также относительно высокую (*1,8%)* литейную усадку.

Для устранения этих отрицательных свойств в алюминий вводят различные добавки, благодаря чему в настоящее время в технике используется несколько сот различных алюминиевых сплавов.

Алюминий и его сплавы широко применяются в машиностроении для изготовления различных транспортных аппаратов, поскольку это дает возможность при той же мощности двигателя повысить динамику машины. Поэтому использование сплавов алюминия в авиации хорошо известно, а в последнее время они стали широко применяться для изготовления многих деталей железнодорожных вагонов, автомобилей и подъемных кранов различных конструкций.

Широкая область применения алюминия – электротехника. Это обусловлено тем, что алюминий менее дефицитен, чем медь, и хотя его электропроводность меньше электропроводности меди, провод из алюминия с тем же сопротивлением, что и медный, хоть и большего диаметра, но легче и дешевле.

Алюминий применяется и в металлургии, где используется его большое сродство с кислородом, для получения в чистом виде дорогих и редких ме-

таллов, например хрома, ванадия и др. Низкие сорта алюминия применяются для раскисления стали.

Алюминиевые сосуды и арматура используются при производстве органических кислот. Благодаря тому, что соединения алюминия безвредны для здоровья человека, их широко применяют в пищевой промышленности для обертки конфет, сыра и других продуктов, а также для аппаратуры молочных, пивоваренных и других предприятий пищевой промышленности.

Строение и свойства алюминиевых сплавов. Алюминиевые сплавы принято делить на две группы: деформируемые и литейные сплавы. Первую группу делят на две подгруппы: сплавы, не упрочняемые термообработкой, и сплавы, упрочняемые термообработкой.

Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термической обработкой, характеризуются невысокой прочностью, но хорошей пластичностью ($\delta < 40\%$). К ним относятся сплавы алюминия с марганцем и магнием, из которых наиболее широко применяются сплав *АМц* (*1,0–1,6%* марганца) и сплавы *АМг2*, *АМг5* (соответственно *1,8–2,6* и *4,8–5,8%* магния и *0,2–0,6* и *0,3–0,8%* марганца). Эти сплавы хорошо свариваются, устойчивы к коррозии и применяются для слабонагруженных деталей, изготовляемых холодной штамповкой и глубокой вытяжкой, а также для сварных конструкций. Упрочнение сплавов возможно только путем холодной деформации.

Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой, имеют в своем составе медь и еще три-четыре и более компонентов. Медь образует с алюминием твердый раствор, а при содержании меди более *0,5%* образуется химическое соединение $CuAl_2$. При нагреве такого сплава до *500–540 ºС* частицы $CuAl_2$ растворяются в алюминии и сплав приобретет однофазную структуру твердого раствора. Быстрое охлаждение сплава (закалка) не дает возможности выделиться фазе $CuAl_2$ из твердого раствора, что позволяет получить упрочнение сплава.

Дюралюмины – сплавы на основе системы *Al-Cu-Mg*, в которые для повышения коррозионной стойкости дополнительно вводят марганец. Наиболее известны сплав *Д18*, содержащий *2,2–3,0%* меди *и 0,2–0,5%* магния, и сплав *Д16*, содержащий *3,8–4,6%* меди, *1,2–1,8%* магния и *0,3–0,9%* марганца.

Дюралюмин хорошо деформируется и в горячем, и в холодном состоянии; для его упрочнения обычно применяют закалку в воде и естественное старение. Наибольшее упрочнение достигается в первые сутки после закалки и практически заканчивается в течение пяти суток.

Для защиты листового дюралюмина и других видов проката от коррозии, которая даже при добавке марганца остается значительной, широко применяют его плакирование чистым алюминием. Плакирование проводят совместной горячей прокаткой слитка дюралюмина, обложенного листами (толщиной до *6 мм*) чистого алюминия марок *А8* и *А85*.

Сплавы авиаль (*АВ* и др.) уступают дюралюминам в прочности, но более пластичны как в горячем, так и в холодном состоянии. Они используются для легких конструкций, требующих гибки и других деформаций при монтаже.

Наиболее прочными алюминиевыми сплавами являются сплавы типа *В95*, содержащие *1,4–2,0%* меди, *1,8–2,8%* магния, *0,2–0,6%* марганца, *5,0–7,0%* цинка и *0,1–0,25%* хрома. Но, применяя этот сплав, следует иметь в виду, что он еще менее коррозионностоек, чем дюралюмин, и его прочностные характеристики сильно понижаются при температуре свыше *150 ºС*.

Известен и ряд других сложных деформируемых сплавов для ковки, штамповки и работы при повышенных температурах: *АК4, АК6, АК8, АК4-1*.

Литейные алюминиевые сплавы принято маркировать двумя буквами *АЛ* (алюминиевый литейный) и делить на пять групп, из которых наибольшей известностью пользуются *силумины* – сплавы алюминия с кремнием и сплавы алюминия с медью. Типичным силумином является сплав *АЛ2*, содержащий *10–13%* кремния. Он обладает высокой жидкотекучестью, малой усадкой. Кроме того, он устойчив к коррозии и относительно легкоплавок. Удовлетворительные механические свойства и структуру силумин приобретает только после модифицирования.

Немодифицированный силумин имеет грубую игольчатую структуру и очень хрупок.

Модифицирование проводится добавкой в жидкий сплав незначительного количества металлического натрия.

Силумины хорошо свариваются и почти не дают трещин от усадки, но обладают склонностью к образованию окисных пленок и повышенной пористостью, связанной с газопоглощением.

Силумины и большинство других алюминиевых литейных сплавов, как и дюралюмины, очень чувствительны к загрязнению железом; по мере увеличения содержания примесей резко уменьшается их пластичность и ударная вязкость. Вредное влияние железа можно ослабить введением присадок марганца и хрома.

Расширяется использование и алюминиевых сплавов на основе системы $Al–Al_2O_3$, получаемых методами порошковой металлургии и называемых *САП* (спеченная алюминиевая пудра). Эти сплавы изготавливают брикетированием алюминиевой пудры, которая состоит из мелких частичек алюминия, покрытых тонкой оксидной пленкой. Если брикеты отжигать в вакууме и спекать под давлением, прочностные характеристики алюминия значительно повышаются. Так, сплав *САП1*, содержащий *6–9%* окиси алюминия, имеет предел прочности $\sigma_в$*=300–320 МПа*, а у *САП4*, содержащего *18–22%* окиси алюминия, предел прочности достигает $\sigma_в$*=440–460 МПа* при соответствующем снижении относительного удлинения с *7* до *2%*. Кроме того, сплавы *САП* обладают и высокой жаропрочностью при длительном нагреве до *500 ºС*.

2.5. Титан и его сплавы

Титан – металл серебристого цвета с голубоватым отливом; обладает невысокой плотностью (ρ*=4,5 г/см*^{3}); плавится при температуре около *1660 ºС*. Титан имеет две аллотропические модификации: до *882 ºС* существует титан

с гексагональной решеткой, а при более высоких температурах – титан с кубической объемно-центрированной решеткой.

Механические свойства титана сильно зависят от содержания в нем примесей. Чистый титан ковок и имеет невысокую твердость *НВ 70*; технический титан хрупок и тверд (*НВ 180–280*).

Вредными примесями титана являются азот и кислород, резко снижающие его пластичность, а также углерод, который при содержании более *0,15%* снижает ковкость титана, затрудняет обработку резанием и резко ухудшает свариваемость. Водород сильно повышает чувствительность титана к концентрации напряжений (например, при надрезе). Этот эффект называют водородной хрупкостью.

На поверхности титана образуется стойкая оксидная пленка, благодаря чему титан обладает высокой сопротивляемостью коррозии в некоторых кислотах, в морской и пресной воде. На воздухе титан не коррозирует и мало изменяет свои механические свойства при нагреве до *400 ºС*. При более высокой температуре он начинает поглощать кислород, постепенно ухудшаются его механические свойства, а выше *540 ºС* титан становится хрупким.

За последние десятилетия, после того как удалось промышленным путем получить ковкий титан, он стал широко использоваться как прочный, относительно легкий коррозионностойкий и жаропрочный конструкционный материал в самолетостроении, ракетостроении, при производстве реактивных двигателей. Он получил признание и в судостроении благодаря устойчивости к воздействию морской воды.

Технический титан. Для применения в промышленности технический титан выпускают двух марок: *ВТ1-00* и *ВТ1-0*; в них допускается (соответственно) следующее содержание примесей: углерода *0,05* и *0,07%,* кислорода *1,10* и *0,12%,* азота до *0,04%,* водорода *0,008* и *0,010%,* железа до *0,2%*, кремния *0,08* и *0,1%*. Однако механические свойства у титана марки *ВТ1-0* несколько лучше благодаря увеличению суммарного количества перечисленных примесей ($\sigma_в$*=300–500 МПа*).

Для улучшения механических свойств титан легируют алюминием, который повышает температуру аллотропического превращения титана. Поэтому алюминий часто называют α-стабилизатором титана. Наоборот, элементы, понижающие эту температуру, называют β-стабилизаторами. К ним относятся молибден, ванадий, хром, марганец, железо и некоторые другие металлы.

Титановые сплавы

В промышленности титановые сплавы применяют либо со структурой α-твердого, либо со смешанной структурой ($\alpha+\beta$)-твердого раствора.

Алюминий, образуя с титаном твердый раствор, замещая и стабилизируя α-фазу, увеличивает прочность, жаропрочность и сопротивляемость титана окислению при высоких температурах. Поэтому алюминий является наиболее важной составляющей титановых сплавов и всегда входит в их состав.

Для получения сплавов смешанной структуры титан кроме алюминия легируют дополнительно хромом, марганцем, молибденом, оловом, а иногда и другими β-стабилизаторами. Сплавы смешанной структуры ($\alpha+\beta$) обладают почти вдвое большей прочностью, чем чистый титан. Однако повышенная прочность наблюдается лишь при температуре меньше *430 ºС*. Большинство этих сплавов обладают хорошей пластичностью и поэтому легче куются, штампуются и прокатываются, чем однофазные титановые сплавы. Сварка этих сплавов затруднена, так как при сварке они теряют пластичность и швы приобретают хрупкость.

Наиболее технологичным, дешевым и поэтому широко распространенным в этой группе является сплав *ВТ3-1*. Он содержит *5,5–7%* алюминия, *0,8–2,3%* хрома, *2–3%* молибдена, *0,15–0,4%* кремния. Обладает термической стабильностью, не становится хрупким при длительном нагреве (до *10 000* ч) до температуры *400 ºС*, а при кратковременной работе – до *450 ºС*; его предел прочности $\sigma_в$ *=900–1000 МПа*, относительное удлинение δ*=10–16%*.

Сплав *ВТ-9* может применяться для изготовления конструкций и деталей, длительно работающих при нагреве до температуры *450 ºС*, а кратковременно – до *700 ºС*. Он содержит *5,8–7,0%* алюминия, *3–4%* молибдена, *0,8–2,0%* хрома, около *0,3%* кремния. Предел прочности $\sigma_в$=1050–1200 МПа, а относительное удлинение около *10%*.

Эти сплавы подвергаются штамповке и ковке, из них прокатывают и прессуют прутки и фасонные профили. Из этих сплавов изготовляют лопатки паровых и газовых турбин, выпускные клапаны дизельных двигателей, поршневые пальцы, шатуны и другие детали машин.

Сплавы, содержащие в основном алюминий и поэтому обладающие α-структурой (например, сплав *ВТ-5*, содержащий *4,3–6,2% Al*), хорошо свариваются, устойчивы к коррозии в атмосфере, загрязненной газами, при температуре до *1090 ºС*, сохраняют высокую прочность при нагреве до *650 ºС*. Однако их пластичность хуже, чем у двухфазных сплавов, имеющих α- и β-фазу. Все деформируемые титановые сплавы можно применять и для фасонного литья, но делают это редко, так как титан при нагреве взаимодействует с газами и формовочными материалами.

Сплавы титана со структурой, имеющей одну α-фазу, в промышленности почти не применяются, хотя и обладают отличной пластичностью. Причина этому – их чувствительность к загрязнению атмосферными газами при нагреве, неизбежном в процессе производства.

2.6. Магний и его сплавы

Магний является химически активным металлом: образующаяся на воздухе оксидная пленка *MgO* в силу более высокой плотности, чем у самого магния, растрескивается и не имеет защитных свойств; порошок и стружка магния легко воспламеняются при контакте горячего и расплавленного магния с водой происходит взрыв.

Магний и его сплавы плохо сопротивляются коррозии, обладают пониженной жидкотекучестью при литье, пластически деформируются лишь при повышенных температурах (*225 °C* и более). Последнее обусловлено тем, что сдвиг в гексагональной решетке магния при низких температурах осуществляется лишь по плоскости базиса (основание шестигранной призмы). Нагрев до *200–300 °C* приводит к появлению дополнительных плоскостей скольжения и, соответственно, повышению пластичности. Малая диффузионная подвижность атомов в магниевых сплавах приводит к замедлению фазовых превращений в них. Поэтому термическая обработка (диффузионный или рекристаллизационный отжиг, закалка, старение) требует больших выдержек (до *24* ч).

В то же время магниевые сплавы характеризуются высокой удельной прочностью, хорошо поглощают вибрации, не взаимодействуют с ураном. Они хорошо обрабатываются резанием и удовлетворительно свариваются аргонодуговой и контактной сваркой. Основными легирующими элементами в магниевых сплавах являются *Mn, Al* и *Zn*.

Марганец повышает коррозионную стойкость и свариваемость сплавов магния. Алюминий и цинк оказывают большое влияние на прочность и пластичность магниевых сплавов: максимальные значения механических характеристик достигаются при введении в сплав *6–7%* алюминия или *4–6%* цинка. Эти элементы (*Al, Zn*) образуют с магнием упрочняющие фазы, выделяющиеся в мелкодисперсном виде после закалки со старением.

Цирконий, титан, щелочноземельные (*Ca*) и редкоземельные (*Ce, 1a)* металлы и торий измельчают зерно, раскисляют сплав, повышают его жаропрочность.

По технологии изготовления изделий магниевые сплавы разделяют на литейные (маркировка «*МЛ*») и деформируемые («*МА*»). Магниевые сплавы подвергаются различным видам термической обработки.

Так, для устранения ликвации в литых сплавах (растворения выделившихся при литье избыточных фаз и выравнивания химического состава по объему зерен) проводят диффузионный отжиг (гомогенизацию) фасонных отливок и слитков (*400–490 °C*, *10–24 ч*). Наклеп снимают рекристаллизационным отжигом при *250–350 °C*, в процессе которого уменьшается также анизотропия механических свойств, возникшая при пластической деформации.

Магниевые сплавы в зависимости от состава могут упрочняться закалкой (часто с охлаждением на воздухе) и последующим старением при *150–200 °C* (режим *Тб*). Ряд сплавов закаливается уже в процессе охлаждения отливок или поковок и может сразу упрочняться искусственным старением (минуя закалку). Но в большинстве случаев ограничиваются только гомогенизацией (закалкой) при *380–540 °C* (режим *Т4*), т. к. последующее старение, повышая на *20–35%* прочность, приводит к снижению пластичности сплавов.

В *литых магниевых сплавах* повышения механических свойств добиваются измельчением зерна посредством перегрева расплава или его модифицирования добавками мела или магнезита.

При этом в расплаве образуются твердые частицы, становящиеся центрами кристаллизации. Для предотвращения возгорания магниевых сплавов их плавку ведут в железных тиглях под слоем флюса, а разливку – в парах сернистого газа, образующегося при введении серы в струю металла. При литье в песчаные формы в смесь вводят специальные добавки (фториды алюминия) для уменьшения окисления магния. Среди литейных магниевых сплавов широкое применение нашли сплавы *МЛ5* и *МЛ6*, отличающиеся повышенными литейными и механическими свойствами. Они могут упрочняться как гомогенизацией и закалкой на воздухе (*Т4*), так и добавочным старением (*Т6*).

Деформированный (прессованный) *магний* обладает более высоким комплексом механических свойств, чем литой.

Деформируемые сплавы производят в виде поковок, штамповых заготовок, горячекатаных полос, прутков и профилей. Температурные интервалы технологических процессов обработки давлением магниевых сплавов находятся в следующих пределах: прессование при *300–480 °С*, прокатка при *440–225 °С* и штамповка (в закрытых штампах) при *480–280 °С*. Хорошей коррозионной стойкостью, свариваемостью и технологической пластичностью отличается сплав *МА1*, относящийся к группе сплавов низкой прочности.

Сплав *МА2-1* сочетает в себе оптимальный комплекс механических и технологических свойств (хорошо сваривается, штампуется), но подвержен коррозии под напряжением. Жаропрочным (до *250 °С*) является сплав системы (*Мд-Zn-Zr*) *МА14*. Сплав упрочняется искусственным старением (режим *Т5*) после прессования и охлаждения на воздухе. Он характеризуется повышенными механическими свойствами, но склонен к образованию при прокатке горячих трещин.

Из сплавов магния изготавливают корпуса ракет, насосов, приборов, топливные и кислородные баки, рамы двигателя, кожухи. Так, сплавы *МЛ5* и *МЛ6* используются для литья тормозных барабанов, штурвалов, коробок передач, *МЛ10* – деталей приборов высокой герметичности.

Арматуры, бензо- и маслосистемы, а также сварные детали изготавливают из деформируемых сплавов *МА1*, высоконагруженные детали – из *МА14*.

2.7. Антифрикционные (подшипниковые) сплавы

Антифрикционные материалы предназначены для изготовления подшипников (опор) скольжения, которые широко применяют в современных машинах и приборах из-за их устойчивости к вибрациям, бесшумности 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. Антифрикционность обеспечивают следующие свойства материала:

– высокая теплопроводность;

– хорошая смачиваемость смазочным материалом;

– способность образовывать на поверхности защитные пленки мягкого материала;

– 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 сопряженной детали.

Критериями для оценки антифрикционного материала служат коэффициент трения и допустимые нагрузочно-скоростные характеристики: давление p, действующее на опору скольжения; скорость скольжения v; параметр pv, определяющий удельную мощность трения. Допустимое значение параметра pv тем больше, чем выше способность материала снижать температуру нагрева и нагруженность контакта, сохранять граничную смазку.

Подшипниковый материал представляет собой сочетание достаточно прочной, относительно пластичной и вязкой основы, в которой имеются твердые опорные включения. При этих условиях изнашивается пластичная основа, вал в основном лежит на твердых опорных включениях, и, следовательно, трение идет не по всей поверхности подшипника и смазочный материал удерживается в изнашивающихся местах пластичной основы.

К антифрикционным материалам относятся сплавы на основе олова и свинца (так называемые баббиты), меди, алюминия, цинка, антифрикционные чугуны и порошковые подшипниковые материалы и некоторые пластмассы (с низким коэффициентом трения).

Баббиты. Марки баббитов обозначают буквой *Б*, справа от которой ставится цифра, показывающая процентное содержание олова, или буква, обозначающая дополнительный легирующий элемент. Например, марки *Б83*, *Б16* означают, что в эти баббиты входит соответственно *83%* и 16% олова; марка *БН* означает, что сплав содержит никель, т. е. обозначение носит условный характер, не показывая полностью состав сплава.

Для того чтобы на основе олова можно было получить антифрикционный сплав, в него вводят элементы, которые упрочняют слишком мягкое и непрочное олово, образуя твердые включения. Для этой цели служат добавляемые в сплав сурьма и медь. Сурьма растворяется в олове с образованием твердого раствора, который получает большую твердость и прочность, чем чистое олово, почти при той же пластичности.

Кроме того, сурьма с оловом образуют химическое соединение SbSn с высокой твердостью. Таким образом, сурьма упрочняет основу оловянных антифрикционных сплавов и создает опорные включения высокой твердости в виде химических соединений.

Медь с оловом образуют кристаллы химического соединения Cu_3Sn. Так как олово дорогой и дефицитный элемент, то оловянные баббиты применяют только в особо ответственных случаях (для вкладышей подшипников сильно нагруженных машин, например турбин, дизелей и др.).

Для подшипников более широкого применения, например в автомобильных и тракторных двигателях, прокатных станах, металлообрабатывающих станках, в баббиты в значительных количествах вводят свинец и понижают содержание олова до *5–17%*. В таких сплавах (например, *Б16*) основой служит свинец.

Для упрочнения свинца и создания твердых частиц в сплав также вводят сурьму и медь.

Вводимый в баббит никель (марка *БН*) улучшает форму включений и измельчает структуру. Самыми дешевыми являются свинцовые баббиты с кальцием и натрием, которые образуют со свинцом твердые растворы (мягкая основа), а твердыми включениями является химическое соединение.

Свинцовая бронза. Свинцовая бронза *БрС30* (*27–33%* свинца, остальное – медь) применяется для вкладышей подшипников мощных двигателей (авиационных, дизельных и др.).

Сплавы на основе алюминия. Сплавы на основе алюминия, например сплав *АН-2,5* (*2,7–3,3%* никеля) широко применяют для отливки вкладышей и получения прокаткой моно- и биметаллической ленты, используемой для последующей штамповки вкладышей, например для коленчатого вала автомобилей.

Сплавы на основе цинка. Сплавы на основе цинка, например сплав *ЦАМ 10–5* (*9–12%* алюминия, *4–5,5%* меди, *0,03–0,06%* магния), применяют в подшипниках металлорежущих станков, прессов и др.

2.8. Тугоплавкие металлы

Тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден, тантал и др.) и их сплавы нашли применение в современной технике вследствие исключительно высокой жаростойкости и достаточно высокой прочности. Физико-механические свойства некоторых тугоплавких и редких металлов приведены в таблице 2.7.

Тугоплавкие металлы, как правило, используют в сплавах в качестве легирующих добавок.

Бериллий. Наиболее легким из этих металлов является бериллий. По удельной прочности он значительно выше титановых и специальных сталей и сплавов, обладает хорошей электро- и теплопроводностью, высокой теплоемкостью; его упругие свойства не изменяются при нагреве до $600\ ^oC$. К недостаткам бериллия следует отнести его высокую хрупкость, повышенную склонность к окислению и токсичность. Он обладает также повышенной истирающей способностью при резании. Для его обработки применяется в основном твердосплавный инструмент. Режимы резания назначаются такими, чтобы температура в зоне резания не превышала $800\ ^oC$, иначе начинается интенсивное окисление.

Таблица 2.7 – Физико-механические свойства некоторых тугоплавких и редких металлов

Свойства	Металлы				
	Вольфрам	Тантал	Молибден	Ниобий	Бериллий
Температура плавления, ^oC	3410	2996	2620	2415	1285
Предел жаропрочности, ^oC	1800	1500	1700	–	–
Предел прочности, Н/мм^2	1100–1500	250–350	800–900	300–400	550–750
Плотность, г/см^3	19,3	16,6	10,2	8,57	1,847
Твердость, Н/мм^2	2000–4500	1250	1400	1100	1000–1300
Относительное удлинение, %	1	40	10–15	25–40	1,5–8
Удельная теплопроводность, кал/см·с·град	0,4	0,13	0,346	0,151	0,365

Особое внимание следует обращать на технику безопасности при обработке бериллия. Обработка ведется, как правило, всухую, чтобы не загрязнять стружку, которая из-за большой стоимости бериллия должна идти на переработку. По обрабатываемости бериллий можно сравнить с чугуном, но он более хрупок и обладает большей истирающей способностью.

Вольфрам является наиболее тугоплавким металлом. Его характерные особенности – высокая прочность, низкая пластичность и большая плотность. Это один из самых трудных в обработке металлов вследствие не только высокой прочности и хрупкости, но и истирающих (абразивных) свойств. Из-за хрупкости возможны разрушения тонкостенных деталей при закреплении на станке и сколы на кромках при обработке. Детали из него получаются горячим или холодным прессованием, а также литьем с последующим деформированием. Из-за высокой твердости обработку часто производят с предварительным подогревом. Для обработки применяют твердосплавные инструменты с пластинками типа *ВК*. Скорости резания при черновом точении не превышают *3–10 м/мин*, а при чистовом – *30–40 м/мин*. Шлифование ведется кругами из зеленого карбида кремния на керамической связке, твердостью *М2-СМ1* с обильным охлаждением. Вольфрам при этом весьма склонен к образованию трещин.

Вольфрам и его сплавы с молибденом, иридием, рением используют также для нагревательных элементов, работающих при температурах выше *1200 ºС*, и для высокотемпературных термопар. Благодаря высокой твердо-

сти, дугостойкости, электроэрозионной стойкости и низкой свариваемости вольфрам широко используется в высоконагруженных разрывных контактах.

Молибден, как и вольфрам, обладает большой прочностью, которая сохраняется и при высоких температурах. Для него характерно благоприятное сочетание высокой теплопроводности, низкой теплоемкости и малого коэффициента линейного расширения. Обрабатываемость его удовлетворительная, но осложняется хрупкостью и склонностью к окислению при температурах *400–500 ^{o}C*. Хрупкость связана с содержанием в металле кислорода, азота и углерода. Степень загрязненности указанными примесями зависит от способа получения молибдена и его сплавов – из порошков или электродуговой и электронно-лучевой плавкой. Способ получения определяет и структуру строения. Легче обрабатываются и дают более чистую поверхность сплавы с однородным волокнистым строением, когда длина зерна в несколько раз больше поперечного сечения.

При равноосной структуре легко вырываются целые зерна или группы зерен, поверхность получается рваной, с надрывами. Для обработки применяют инструмент из сплавов *ВК* и *ТК* или из быстрорежущих сталей. Лучше противостоит усиленному истиранию сплав *ВК6М*. Шлифование молибдена затруднено.

Ниобий и *тантал* имеют примерно одинаковый предел прочности, но сильно отличаются по плотности. Оба металла отличаются повышенной пластичностью. Ниобий более устойчив против окисления, чем молибден, но также может насыщаться кислородом, азотом и водородом и снижать при этом свои свойства. Обрабатываемость ниобия и тантала удовлетворительная. Из-за высокой пластичности эти металлы налипают на режущие кромки инструментов и образуют на обрабатываемой поверхности надиры и наволакивания. Этому благоприятствует низкая теплопроводность данных металлов, высокие температуры в зоне контакта и большие силы трения. Качество поверхности ухудшается с увеличением подачи более *0,4 мм*. Скорости резания ограничиваются также из-за того, что уже при температуре *180–200 ^{o}C* наблюдается газонасыщение металла и его легкое окисление.

При обработке деталей из ниобия и тантала и их сплавов чаще, чем при обработке заготовок из других тугоплавких металлов, применяют быстрорежущие сплавы. Можно сказать, что ниобий имеет механические свойства примерно такие же, как и сталь с содержанием углерода *0,15%*.

Скорости резания должны быть в *2,5* раза меньше, чем для такой стали, вследствие невысокой теплоемкости и большой адгезионной способности.

Следует отметить, что при обработке рассматриваемых тугоплавких материалов наблюдаются нередко иные закономерности, чем при обработке обычных сталей и сплавов.

Хром (Cr) обладает сравнительно невысокой температурой плавления ($T_{пл}$*=1900 ºС*) по сравнению с другими тугоплавкими металлами, но в противоположность остальным металлам этой группы является весьма распространенным в земной коре. Его отличительная особенность – высокая стойкость к окислению, поэтому хром используется для защитных покрытий изделий (хромирование), в том числе эксплуатируемых при повышенных температурах.

Хром обладает хорошей адгезионной способностью к стеклу, керамике, ситаллам и хорошо совместим с другими проводящими материалами. Поэтому технология осаждения тонких пленок хрома на подложку широко используется в микроэлектронике при изготовлении резисторов, адгезионных подслоев для контактных площадок и токопроводящих соединений.

Рений (Re) – редкий и тяжелый металл с температурой плавления, близкой к температуре плавления вольфрама ($T_{пл}$=*3180 ºС*). Рений твердый и прочный, как вольфрам, и пластичный, как молибден, имеет высокое удельное сопротивление (ρ=*0,214 мкОм·м*), стоек к дуге постоянного тока. Рений часто применяют в сплавах для высоконагруженных разрывных контактов, например, сплавы *W+15–20%Re* отличаются повышенной износостойкостью.

Рений и его сплавы с вольфрамом применяют в производстве электровакуумных приборов взамен вольфрама, так как он меньше испаряется в атмосфере водорода, отличается более длительным сроком службы. *Re-* и *W-Re*-сплавы используются для термопар до *2500–2800 ºС* в защитной среде.

В радиоэлектронике рений применяют для защиты от коррозии и износа деталей из меди, вольфрама и молибдена. Тонкие пленки рения используются для прецизионных резисторов в интегральных схемах.

2.9. Твердые сплавы

Твердые сплавы по сравнению с быстрорежущими сталями обладают более высокой твердостью, теплостойкостью, износостойкостью и теплопроводностью и не уступают им по прочности на сжатие (таблица 2.8). Теплостойкость твёрдых сплавов позволяет обрабатывать конструкционные материалы при более высоких скоростях резания (*50–100 м/мин*).

Недостатками твердых сплавов являются низкая прочность при изгибе, низкая технологичность, дефицитность и дороговизна сырья для их производства.

Твердые сплавы выпускаются пяти групп: *ВК*, *ТК*, *ТТК*, *ОМ*, *БВ*.

Вольфрамовые твердые сплавы (группа *ВК*). Состав: карбид вольфрама (режущий скелет) и кобальт (связка).

В марках твердых сплавов группы *ВК* буквы и цифры означают: *В* – карбид вольфрама, *К* – кобальт; цифры указывают на содержание в сплаве кобальта в процентах. Так, в сплаве *ВК8* содержится *8%* кобальта, остальное – карбид вольфрама.

Титано-вольфрамовые твердые сплавы (группа *ТК*). Состав: карбиды титана и вольфрама (режущий скелет), а кобальт – связка.

В марках твердых сплавов группы *ТК* буквы и цифры означают: *Т* – карбид титана, *К* – кобальт; цифры указывают на содержание в сплаве указанных компонентов в процентах. Так, в сплаве *Т15К6* содержится *15%* карбида титана, 6% кобальта, остальное – карбид вольфрама.

В сравнении со сплавами группы *ВК* сплавы группы *ТК* имеют более высокую твердость, теплостойкость и износостойкость, но меньшие прочностные характеристики (таблица 2.8).

Титано-тантало-вольфрамовые твердые сплавы (группа *ТТК*). Состав: карбиды титана, тантала, вольфрама (режущий скелет) и кобальт (связка).

В марках твердых сплавов групп *ТТК* буквы и цифры означают: первая буква *Т* – карбид титана, вторая *Т* – карбид тантала, *К* – кобальт; цифры, следующие за буквами *ТТ*, указывают на содержание в сплаве карбидов титана и тантала (в сумме) в процентах, цифра, следующая за буквой *К* – на содержание кобальта в процентах. Так, в сплаве *ТТ7К12* содержатся карбидов титана и тантала *7%,* кобальта *12%,* остальное – карбид вольфрама.

В сравнении со сплавами групп *ВК*, и *ТК* сплавы групп *ТТК* обладают пониженной твердостью, теплостойкостью (*750 ^{o}C*) и износостойкостью, но существенно превосходят их по прочности на изгиб (таблица 2.8).

Особомелкозернистые твердые сплавы (группа *ОМ*). Состав: карбид вольфрама (режущий скелет) и кобальт (связка).

В марках твердых сплавов группы *ОМ* буквы означают: *В* – карбид вольфрама, *К* – кобальт, *ОМ* – особомелкозернистый; цифры указывают на содержание кобальта в процентах. Сплавы группы *ОМ* сочетают в себе высокую твердость, теплостойкость и износостойкость сплавов группы *ТК* с повышенной изгибной прочностью сплавов группы ВК (таблица 2.8). Однако их отдельные марки резко отличаются друг от друга по своим свойствам.

Таблица 2.8 – Основные физико-механические свойства инструментальных материалов

Инструментальный материал	Микротвердость, МПа (до)	Твердость *HRA*	Твердость, ^{o}C	Предел прочности, *МПа* (до)	
				при сгибе	при сжатии
1	2	3	4	5	6
Стали:					
инструментальные углеродистые	10000	78–79	200–250	2200	4000
инструментальные легированные	10000	78–80	250–300	2200	4000
быстрорежущие нормальной производительности	15000	79–80	600–630	3100	4100
повышенной производительности	18000	81–82	625–670	2900	4100

Окончание таблицы 2.8

1	2	3	4	5	6
Твердые сплавы:					
группа ВК	25000	87,3–89	800–850	1400	4800
группа ТК	30000	88,5–92	850–900	1300	3700
группа ТТК	20000	до 88,5	700–750	1500	3000
группа ОМ	30000	–	900–1000	1650	4000
группа ББ	31000	88–92	1000–1100	1650	4000
Минералокерамика:					
оксидная	32000	92–95	1200	450	5000
оксидно-карбидная	31000	до 93	1100	700	4800
Алмаз	100000	–	800–900	500	2000
СТМ на основе нитрида бора:					
эльбор-Р	90000	–	1400–1500	700	–
гексанит-Р	70000	–	800–900	1300	–

Безвольфрамовые твердые сплавы (группа *БВ*). Все твердые сплавы групп *ВК*, *ТК*, *ТТК*, *ОМ* содержат более *50%* весьма дефицитного и дорогостоящего вольфрама. Безвольфрамовые твердые сплавы получены на основе карбида титана (режущий скелет) и тугоплавкой молибдено-никелевой связки.

В марках безвольфрамовых твёрдых сплавов буквы означают: *Т* – карбид титана, *М* – молибден, *Н* – никель. Безвольфрамовые сплавы сочетают в себе высокую твердость и теплостойкость сплавов группы *ТК* с высокой изгибной прочностью сплавов групп *ВК* и *ТТК* (таблица 2.8).

Примерное назначение различных марок всех групп твердых сплавов показано в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Примерное назначение твердых сплавов различных марок

Марка сплава	Примерное назначение
1	2
Группа *ВК*:	Обработка чугуна и цветных сплавов
ВК3 *ВК6* *ВК8*	Чистовая и получистовая при спокойной нагрузке, чистовая и получистовая при прерывистом резании и черновая при спокойной нагрузке черновая при переменной и ударной нагрузках, в том числе при обработке стальных наплавленных поверхностей
Группа *ТК*:	Обработка стали
Т5К10 *Т15К6* *Т30К4*	Черновая, в том числе – при переменной и ударной нагрузках получистовая и чистовая с малым сечением срезаемого слоя

Окончание таблицы 2.9

1	2
Группа *ТТК*: *ТТ7К12* *ТТ20К9* *ТТ10К8*	Обработка стали и чугуна с большими сечениями срезаемого слоя, при переменной и ударной нагрузках (взамен сплавов *Т5К10* и *ВК* при стойкости в *1,8–2* раза выше)
Группа *ОМ*: *ВК6-ОМ*	Чистовая обработка стали, в том числе закаленной, жаропрочной, нержавеющей, чугуна высокой твердости, алюминиевых сплавов (взамен сплавов *Т30К4* и *ВК3* при стойкости в *1,5–2* раза выше)
ВК10-ОМ	Черновая и получистовая обработка стали и чугуна (взамен сплавов Т15К6 и ВК6 при стойкости в *1,5–2* раза выше)
ВК15-ОМ	Черновая обработка стали и чугуна при переменной и ударной нагрузках, в том числе – в особо тяжелых случаях обработки нержавеющих сталей, титановых и никелевых сплавов, наплавленных поверхностей и т. п. (взамен сплавов *Т5К10* и *ВК8* при стойкости в *1,5–4* раза выше)
Группа *БВ*:	Обработка стали
МНТ	Чистовая и получистовая при спокойной нагрузке (взамен сплавов *Т30К4* и *Т15К6* при стойкости в *1,5–3* раза выше)
КНТ	Получистовая (взамен сплава *Т15К6*)
ТНМ	Чистовая при спокойной нагрузке (взамен сплава *Т30К4*)

2.10. Сверхтвердые материалы

Для изготовления лезвийного инструмента в настоящее время применяются три вида сверхтвердых материалов (*СТМ*): природные алмазы, поликристаллические синтетические алмазы и композиты на основе кубического нитрида бора.

Природные и синтетические алмазы обладают такими уникальными свойствами, как самая высокая твердость (*HV 10000-кгс/мм*^{2}), весьма малые коэффициент линейного расширения и коэффициент трения и высокие теплопроводность, адгезионная стойкость и износостойкость.

Недостатками алмазов являются невысокая прочность на изгиб, хрупкость и растворимость в железе при относительно низких температурах (*750 ºС*), что препятствует использованию их для обработки железоуглеродистых сталей и сплавов на высоких скоростях резания, а также при прерывистом резании и вибрациях. Теплостойкость алмаза характеризуется тем, что при температуре около *800 ºС* в обычных условиях он начинает превращаться в графит.

Природный алмаз является самым твердым из известных материалов (твердость порядка *100 ГПа*). Он обладает высокой износостойкостью, хоро-

шей теплопроводностью (λ=*140 Вт/(м-к*), малым коэффициентом трения и малой адгезионной способностью к металлам, за исключением железа и его сплавов с углеродом. К недостаткам алмаза как инструментального материала можно отнести сравнительно низкую теплостойкость и большую хрупкость ($\sigma_и$=*0,3–0,6 ГПа*), что требует использования станков высокой жесткости и виброустойчивости.

В природе чаще всего встречаются следующие разновидности алмаза: борт, карбонадо и баллас. К карбонадо относятся весьма тонкозернистые, плотные или несколько пористые агрегаты буровато-черного цвета. Черная окраска карбонадо обусловлена наличием в алмазе высокодисперсного графита.

Алмаз представляет собой одну из модификаций углерода кристаллического строения. Высокая твердость алмаза объясняется своеобразием его кристаллического строения, прочностью связей атомов углерода в кристаллической решетке, расположенных на равных и очень малых расстояниях друг от друга. Однако прочность алмаза не велика и он легко раскалывается по плоскостям спайкости.

Природные алмазы используются в виде кристаллов, закрепляемых в металлическом корпусе резца.

Синтетические алмазы. Совершенствование технологии получения синтетических алмазов позволило изготовлять поликристаллические образования достаточно больших размеров, из которых делают вставки-лезвия к металлорежущим инструментам.

Теплостойкость алмазов сравнительно низка – она составляет около *–650 ºС*. Этот недостаток компенсируется высокой теплопроводностью. Теплота, выделяющаяся в процессе резания на трущихся поверхностях вставок-лезвий, хорошо отводится в глубь алмаза и, таким образом, температура на рабочих поверхностях обычно не превышает его теплостойкости.

Синтетические поликристаллические алмазы содержат небольшие количества примесей тугоплавких металлов – вольфрама, титана и молибдена, которые выполняют функции катализаторов синтеза. Эти металлические включения располагаются по межкристаллическим плоскостям.

В зависимости от технологии выращиваемые кристаллы алмаза имеют различное строение (балласы, карбонадо, карболит) и соответственно различные физико-механические свойства. Синтетические алмазы могут быть различных марок, которые отличаются между собой прочностью, хрупкостью, удельной поверхностью и формой зерен. Как инструментальные материалы синтетические алмазы типа карбонадо лучше, чем алмазы типа баллас.

Синтетические алмазы изготовляют (синтезируют) из графита при высоких давлениях *(~1000 ГПа*) и температурах (*~ 2500 ºС*) с выдержкой от микросекунд до десятков секунд. При этих условиях происходит перестроение гексагональной решетки графита в более плотную кубическую структурную решетку, свойственную природному алмазу. Природные и синтетические алмазы имеют одинаковые параметры кристаллической решетки, близкие хи-

мические и физико-механические свойства. Однако синтетические алмазы значительно дешевле, кроме того, свойства синтетических алмазов можно регулировать, изменяя параметры технологического процесса их изготовления. Поэтому они нашли наибольшее применение в технике (более *90%* из всех используемых алмазов – синтетические). Отечественной промышленностью поликристаллические алмазы выпускаются в виде пластин цилиндрической и сегментной форм диаметром до *6–8 мм* и в виде порошков (монокристаллов), поликристаллов (*ГОСТ 9206–80*) и композиционных материалов. Полученные искусственным путем поликристаллы обладают рядом преимуществ перед монокристаллами, применяемыми в лезвийных инструментах. Во-первых, они имеют большие размеры (диаметр до *8 мм*), что значительно упрощает их крепление на инструментах. Во-вторых, поликристаллы, имеющие однородное зернистое строение, не обладают анизотропией физико-механических свойств. Благодаря присутствию в поликристаллах некоторого количества неалмазных (карбидных и графитовых) межзерновых фаз материал обладает высокой электропроводностью. По твердости указанные марки поликристаллов близки к монокристаллам природного алмаза, а по прочности на изгиб в *2–3* раза превосходят его.

Инструменты из поликристаллов синтетических алмазов показывают высокие режущие свойства при обработке титановых сплавов, высококремнистых алюминиевых сплавов, медных сплавов, стеклопластиков, композиционных материалов, минералокерамики и других материалов. Их стойкость значительно выше стойкости твердосплавных инструментов. При этом обеспечиваются высокая точность и качество поверхностного слоя. Однако алмазные инструменты малоэффективны при обработке сплавов на основе железа, так как проявляют к нему высокую химическую активность. В результате этого при высоких температурах резания происходит интенсивный износ алмазного инструмента.

На основе синтетических алмазов выпускаются композиционные материалы, состоящие из подложки (основания) и нанесенного на нее алмазного слоя. Толщина подложки *2–4 мм*, толщина покрытия около *1 мм*. В качестве подложки используются твердые сплавы (вольфрамовые и безвольфрамовые). Двухслойные пластины позволяют объединить высокие твердость и износостойкость синтетических алмазов и прочность твердого сплава.

По твердости синтетические поликристаллы лишь незначительно уступают природным монокристаллам алмаза. Обладая более высокими прочностными характеристиками, поликристаллические алмазные вставки позволяют успешно выдерживать значительные безударные нагрузки, имеющие место как при обработке резанием вязких и пластичных материалов, так и при выглаживании закаленных стальных поверхностей.

Синтетические алмазы маркируются буквами «*АС*». Например: марки *АСБ* (баллас) и *АСПК* (карбонадо). Применяются они для прецизионной обработки алюминиевых и медных сплавов, пластмасс, стеклопластиков, полу-

проводниковых материалов. Большие скорости резания *1000–1200 м/мин* обеспечивают высокую производительность обработки.

Синтетические алмазы по сравнению с природными имеют ряд преимуществ, обусловленных их более высокими прочностными и динамическими характеристиками. Их можно использовать не только для точения, но также и для фрезерования. Синтетические алмазы менее чувствительны к динамическим нагрузкам и позволяют вести обработку с большим сечением среза (глубиной и подачей).

Природные и синтетические алмазы нашли широкое применение в обработке медных, алюминиевых и магниевых сплавов баббитов, благородных металлов (золота, серебра, палладия, платины), титана и его сплавов, неметаллических материалов (пластмасс, текстолита, стеклотекстолита, органического стекла, прессованного и силицированного графита), а также твердых сплавов и керамики. В настоящее время выпускается большое количество разнообразного инструмента с использованием алмазов: шлифовальные круги, инструменты для правки шлифовальных кругов из электрокорунда и карбида кремния, пасты и порошки для доводочных и притирочных операций. Значительные по размерам кристаллы алмазов применяют для изготовления алмазных резцов, фрез, сверл и других режущих инструментов. Область применения алмазного инструмента с каждым годом все более расширяется.

Примерное назначение синтетических алмазов различных марок для лезвийного инструмента показано в таблице 2.10.

Кубический нитрид бора (*КНБ*) – уникальный синтетический инструментальный материал, его химический состав: *44%* бора и *56%* азота. Исходным материалом для его получения служит гексагональный нитрид бора (*ГНБ*), имеющий близкие к графиту характеристики. В результате синтеза, протекающего при высоких давлениях и температурах (есть значительная аналогия с синтезом алмаза), гексагональная решетка *ГНБ* превращается в более плотную и твердую кубическую решетку *КНБ*. По твердости *КНБ* (*90 ГПа*) близок к твердости алмаза, а по теплостойкости (*1500 ºС*) значительно превосходит все инструментальные материалы. Следует отметить чрезвычайную химическую инертность *КНБ*, в частности к железу и углеродистым сплавам.

Для изготовления лезвийных инструментов используются поликристаллы *КНБ* и композиционные материалы, созданные на его основе. Все они носят название «композиты». Первым поликристаллическим КНБ, выпущенным отечественной промышленностью, был эльбор-Р (композит *01*). В настоящее время разработана целая гамма поликристаллических материалов на основе твердых модификаций нитрида бора. К ним относятся: гексанит-Р (композит *10*), композит *05*, белбор (композит *02*), *ПТНБ* (композит *09*), композит *10Д*, композит *12*. Они синтезируются в виде цилиндрических столбиков диаметром *4–8 мм*, высотой *3–6 мм*, которыми затем оснащаются режущие инструменты. Перечисленные материалы отличаются технологией изготовления и соответственно свойствами.

Таблица 2.10 – Примерное назначение минералокерамики, синтетических алмазов и *СТМ* различных марок для лезвийного инструмента

Марка материала	Примерное назначение
	1. Алмазы синтетические
Карбонад (*АСПК*), баллас (*АСБ*), СВ и др.	Чистовая обработка цветных металлов и сплавов, твердых сплавов и других высокотвердых металлических материалов, не содержащих железа, любых высокотвердых неметаллов
	2. СТМ
Композит-01 (эльбор-Р)	Чистовая обработка закаленной стали твердостью до *HRC 67*, высокотвердого чугуна и других труднообрабатываемых материалов, прецизионная обработка незакаленной стали при спокойной нагрузке
Композит 05	Чистовая и получистовая обработка закаленной стали твердостью до *HRC 60* и высокотвердого чугуна при спокойной нагрузке
Композит 10 (гексанит-Р)	Получистовая и чистовая обработка закаленной стали твердостью до *HRC 60*, высокотвердых чугунов и других труднообрабатываемых материалов при переменной нагрузке
	3. Минералокерамика
	3.1. Оксидная
ЦМ-332, ВО-13, ВО-14, ВШ-75	Чистовая и получистовая обработка стали, в том числе – закаленной твердостью до *HRC 50–55*, чугуна, в том числе – высокой твердости, других металлических сплавов и неметаллов при спокойной нагрузке
ВОК-60, ВОК63, ВЗ	3.2. Оксидно-карбидная То же, что оксидная, но и в условиях переменной нагрузки

Эльбор и белбор содержат более *98% КНБ*, из-за чего они обладают повышенной твердостью и хрупкостью, гексанит содержит *95% КНБ* и *5%* более мягких компонентов, поэтому он обладает меньшей твердостью, но большей вязкостью. Материал «композит *05*» содержит *75% КНБ* и *25%* Al_2O_3.

Основным направлением в применении лезвийных инструментов на базе кубического нитрида бора является обработка сталей и чугунов различной твердости. Причем чем выше твердость стали или чугуна, а также скорость резания, тем значительнее преимущество инструментов из композита по сравнению с инструментами из твердого сплава и минералокерамики. Так,

при точении закаленных сталей твердостью *62–64 HRC* стойкость резцов из композита при скоростях резания *80–100 м/мин* выше стойкости резцов из твердого сплава *Т3ОК4* в *20* раз и выше стойкости резцов из минералокерамики в *3–4* раза. При этом обеспечиваются *5–6-й* квалитеты точности и шероховатость поверхности *Ra=0,16–0,08 мкм*. Поэтому применение лезвийных инструментов из композита позволяет во многих случаях заменить операции внутреннего и наружного шлифования.

Кроме имеющихся сверхтвердых материалов разработаны новые *СТМ*, показавшие достаточно высокие эксплуатационные свойства. К ним относится силинит-Р – инструментальный материал на основе нитрида кремния (*SiN*).

Силинит-Р обладает такой же прочностью на изгиб, как и оксидно-карбидная минералокерамика ($\sigma_и$*=49–68 кгс/мм*^{2}), но большей твердостью (*HRA 94–96*) и стабильностью свойств при высокой температуре. Теплостойкость достигает *1600 ºС*. Для силинита-Р характерно отсутствие адгезии с большинством сталей и сплавов на основе алюминия и меди. Из этого материала изготавливают как напайные, так и неперетачиваемые механически закрепляемые пластины.

Благодаря высокой твердости силинит-Р превосходит по стойкости твердые сплавы при обработке закаленных сталей. Он позволяет заменять вольфрамосодержащие твердые сплавы на операциях получистового и чистового точения различных материалов. При обработке закаленных сталей его применение может заменить шлифование.

Физико-механические свойства *СТМ* приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Физико-механические свойства СТМ

Материал	Микровердость	$\sigma_и$, *МПа*	$\sigma_{сж}$, *МПа*	Теплостойкость, *ºС*
АСБ	75–80	490–635	490–785	650–700
АСПК	80–85	490–685	785–1175	700–800
Композиты: *01*, *02,* 09	73–78	590–685	490–590	–1200
	39	686–980	3900–4900	~1400
Силинит-Р	20–31	500–700	2500	~1600

Контрольные вопросы

1. Что называют сталями?
2. Приведите классификацию сталей.
3. Виды термической обработки.
4. Методы поверхностного упрочнения деталей.
5. Что называют чугунами?
6. Для каких целей используют медные сплавы?
7. Как определяют предел выносливости?
8. Для каких целей используют алюминиевые, магниевые и титановые сплавы?

3. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

3.1. Общая характеристика процесса изнашивания

Многие детали машин выходят из строя вследствие изнашивания – разрушения поверхностных слоев трущихся тел, приводящего к уменьшению их размеров в направлении, перпендикулярном поверхности трения. Такие отказы связаны с потерей точности машин, приборов и инструментов, со снижением коэффициента полезного действия машин, снижением прочности деталей из-за появления динамических нагрузок и уменьшения сечений, с увеличением шума и другими негативными последствиями. Износ вызывает существенное удорожание эксплуатации машин. Ежегодные расходы на поддержание и восстановление действующего парка некоторых машин (например, автомобилей) соизмеримы со стоимостью годового выпуска новых машин. Существенно, что при постоянных условиях трения протекание изнашивания (по стадиям) подобно зависимости интенсивности отказов деталей от времени наработки.

На первой стадии происходит приработка поверхностей контакта (разрушение наиболее «уязвимых» микронеровностей и образование «равновесной» шероховатости). Затем наступает период установившегося изнашивания (вторая стадия), характеризующийся минимальной интенсивностью изнашивания для заданных условий трения. И, наконец, наступает третья стадия – катастрофический износ и резкое уменьшение размеров сечения детали.

3.2. Виды изнашивания

Различают механическое (усталостное, абразивное), молекулярно-механическое, коррозионно-механическое (окислительное, фреттинг-коррозия и т. д.) изнашивание.

По характеру промежуточной среды различают изнашивание при трении без смазочного материала, изнашивание при граничном трении, изнашивание при наличии абразива.

По характеру деформирования поверхностного слоя изнашивание может происходить при упругом и пластическом контакте, при микрорезании.

Абразивное изнашивание является результатом срезания и пластического деформирования микронеровностей (шероховатостей) твердыми посторонними частицами при относительном перемещении сопряженных поверхностей. В результате изнашивание идет в форме процесса микрорезания, либо в виде усталостного повреждения.

Для уменьшения абразивного изнашивания снижают уровень абразивного воздействия, повышают поверхностную твердость материалов деталей (закалкой, поверхностным пластическим деформированием, напылением порошками карбидов).

Для предотвращения чрезмерного абразивного (механического) изнашивания ограничивают удельное преодоление сопротивления в зоне контакта.

Молекулярно-механическое изнашивание происходит при высоких контактных напряжениях в зоне сопряжения деталей из однородных материалов (зубчатых и червячных передач, резьбовых соединений и др.). Оно начинается с локального пластического деформирования и разрушения окисных пленок на отдельных участках поверхности контакта, а заканчивается молекулярным сцеплением (схватыванием) материала этих участков деталей и последующим разрушением зон схватывания при относительном движении.

Процесс развития повреждений трущихся поверхностей деталей вследствие схватывания называют заеданием. Интенсивность заедания увеличивается с ростом контактных напряжений (давлений), скорости относительного перемещения, температуры в зоне контакта и других факторов.

Для предупреждения схватывания на поверхности контактирующих деталей наносят защитные покрытия и окисные пленки, подают смазочный материал в зону контакта, повышают поверхностную прочность (твердость) деталей, ограничивают контактные напряжения и скорость относительного перемещения.

Коррозионно-механическое изнашивание наблюдается в машинах и аппаратах, в которых трущиеся детали вступают в химическое взаимодействие со средой. Поверхность трения деталей разрушается под действием двух одновременно протекающих процессов: коррозии и механического изнашивания.

При вибрациях в условиях контакта металла с воздухом коррозионно-механическое изнашивание протекает в форме фреттинг-коррозии (от английского fret – подтачивать). В результате небольших циклических относительных смещений деталей разрушаются тонкие окисленные поверхностные слои металла, которые не удаляются из зоны трения и превращаются в абразивные частицы (черный порошок). Процесс окисления непрерывен на воздухе, поэтому разрушение носит прогрессирующий характер. Фреттинг-коррозия способствует разрушению заклепочных, прессовых, резьбовых, шлицевых и шпоночных соединений.

Для защиты от фреттинг-коррозии используют различные методы поверхностного упрочнения зон контакта, наносят мягкие гальванические покрытия, напыляют тефлоновые и резиновые пленки и т. п.

В химически активных средах, в жидкостях и различных газах, где процессы коррозии протекают активно, коррозионно-механическое изнашивание деталей наносит существенный ущерб. Для предотвращения коррозионно-механического изнашивания применяют коррозионно-стойкие материалы.

3.3. Фрикционные и антифрикционные материалы

Условно принято называть материалы с коэффициентом трения $f>0,2$ фрикционными, а с $f<0,2$ – антифрикционными.

Фрикционные материалы применяются в тормозах, муфтах сцепления, фрикционных механизмах и ременных передачах, на транспорте в виде колеса или рельса.

Антифрикционные материалы используются в подшипниках скольжения, направляющих, в системе «поршневые кольца – цилиндр», электрических (часто размыкающихся) контактах и других устройствах.

Природа фрикционности и антифрикционности обусловлена двойственностью трения (наличие молекулярной и деформационной составляющих сил трения), а также тем, что в процессе трения твердых тел участвуют лишь поверхностные слои, свойства которых могут заметно отличаться от объемных свойств.

К фрикционным и антифрикционным материалам предъявляются дополнительные требования:

– способность легко подвергаться механической обработке, простота технологии получения и отсутствие в их составе дорогих компонентов;

– стабильное значение коэффициента трения;

– способность быстро прирабатываться и иметь низкий износ;

– обладать коррозионной стойкостью, теплостойкостью, хорошей теплопроводностью и иметь низкий коэффициент теплового расширения;

– продукты износа не должны быть абразивными, токсичными и опасными в пожарном отношении.

Кроме того фрикционные материалы в ходе торможения не должны загораться открытым пламенем, набухать при наличии влаги, коэффициент трения должен укладываться в интервал *0,2–0,5*.

Антифрикционные материалы должны быть прочными, обеспечивая преимущественно упругий контакт, сохранять работоспособность узла трения при надежной смазке, хорошо смачиваться смазочными материалами и иметь низкий коэффициент трения.

На практике существуют следующие виды фрикционных материалов:

- металлические;
- асбокаучуковые;
- металлокерамические.

К *металлическим фрикционным материалам* относятся серые чугуны, работающие обычно в паре с высокоуглеродистыми сталями типа *У7, У8*. В чугунах содержится углерод в виде графита, который вместе с продуктами износа создает на контакте пленку, обладающую пониженным сопротивлением сдвигу.

Недостатком таких пар является сравнительно малый коэффициент трения, достоинством – низкая стоимость. Указанная пара применяется в тормозах колес железнодорожного транспорта.

Асбестокаучуковые материалы широко применяются в муфтах сцепления, тормозах автомобилей, тракторов и других машин. В их состав входят: асбест, каучук, сурик железный, сера, оксид цинка, свинец, латунная стружка, канифоль и др. Асбест, обладая волокнистой структурой, создает каркас

изделия и весьма теплостоек. Его коэффициент трения обычно составляет *0,7–0,8* и мало зависит от температуры. Каучук связывает все компоненты и обладает высоким коэффициентом трения. Сурик и оксид цинка весьма пластичны и способствуют образованию поверхностного слоя, обладающего противозадирными свойствами. Однако у этих материалов коэффициент трения уменьшается при температурах свыше *200–250* ^{o}C из-за размягчения каучука. Вторым недостатком является также то, что при температуре порядка *400* ^{o}C материал вспыхивает (горит каучук).

Асбестосмоляные материалы, в отличие от асбестокаучуковых, имеют связующее в виде синтетических смол, например, эпоксидной. Эти смолы при термическом распаде ведут себя иначе, чем каучуки. Продукты распада образуют пленку кокса. У кокса обычно пористая структура, которая заполняется продуктами распада. С ростом температуры коэффициент трения таких материалов падает и при *400–500* ^{o}C проходит через минимум, затем возрастает. Типичными асбестосмоляными материалами являются ретинаксы (*ФК-24А*, *ФК-1бЛ*), в которые вводится латунная проволока, улучшающая структуру промежуточного слоя.

Применяется ретинакс в тяжело нагруженных тормозах (буровые лебедки, авиаколеса). Общим недостатком асбестокаучуковых и асбестосмоляных фрикционных материалов является наличие асбеста, т. к. он является экологически опасным материалом.

Органические фрикционные материалы (дерево, кожа, пробка, резина) применяются в слабонагруженных узлах трения, чаще – в приборах. Общим недостатком этих материалов является низкая теплопроводность, теплостойкость, высокая стоимость и низкая нагрузочная способность.

Металлокерамические материалы весьма теплостойки, т. к. основа их может быть медная и железная. Однако они склонны к схватыванию. Перспективным является применение пористых металлокерамических материалов, пропитанных различными полимерами.

Антифрикционными называются материалы, которые при трении даже в тяжелых условиях нагружения имеют сравнительно небольшой коэффициент трения и мало изнашиваются. Наиболее многочисленной группой антифрикционных материалов являются материалы, предназначенные для подшипников скольжения.

Понятие «антифрикционность» включает комплекс свойств, которым должен удовлетворять подшипниковый материал: достаточную статическую и динамическую прочность при повышенных температурах; способность образовывать прочный граничный слой смазочного материала и быстро восстанавливать его в местах, где он разрушен; низкий коэффициент трения при несовершенной смазке, отсутствие заедания на валу в случае перерыва в подаче смазочного материала; высокие теплопроводность, теплоемкость, прирабатываемость, хорошую износостойкость сопряжения; недефицитность и высокую технологичность.

Существуют следующие виды антифрикционных материалов: металлические, природные, полимерные, самосмазывающие композиции и металлокерамические.

Среди металлических наиболее известные – баббиты (названы в честь автора этих сплавов – Баббита). Первые баббиты – это сплав олова, сурьмы и меди, затем – баббиты на основе свинца с добавлением меди, сурьмы, мышьяка, кадмия, никеля. Наиболее широко применялись и сейчас применяются для вкладышей баббиты типа *Б–83* (*83%* олова, остальное – сурьма и медь) для давлений до *10 МПа*, окружных скоростей до *50 м/с* и рабочих температур до $70\ ^oC$, они очень хорошо прирабатываются и имеют коэффициент трения $f \leq 0{,}005$ со смазкой.

Сплавы на основе меди: бронза – это сплав меди с оловом, латунь – сплав меди с цинком. Бронзы до настоящего времени являются основными материалами тихоходных подшипников скольжения, венцов червячных зубчатых колес. Латуни используются реже.

Сплавы на алюминиевой основе имеют два вида добавок: тугоплавкие (хром, железо, марганец, кремний) и легкоплавкие (олово, сурьма, свинец, кадмий, магний). Преимущества этих сплавов: невысокая стоимость, прочность, хорошая теплопроводность, высокая коррозионная стойкость и низкая плотность. Недостатки: значительный коэффициент теплового расширения и способность к схватыванию.

Сплавы на основе алюминия с высоким содержанием свинца или олова, кроме всего прочего, обладают низким схватыванием и достаточно высокой задиростойкостью. В современном автомобиле и тракторостроении распространение получил сплав *АО20–1* (массовая доля, *% – Ca – 1*, *Sn – 20*, *Ti – 0,0–0,1*, *Al* – остальное). Биметаллические вкладыши изготавливаются путем совместной прокатки с последующей штамповкой вкладышей из полосы.

К антифрикционным чугунам относятся: серый чугун с пластинчатым графитом, модифицированные чугуны с глобулярным графитом, ковкие чугуны, обладающие высокой пластичностью. С повышением содержания графита повышаются антифрикционные свойства чугуна. Недостаток – низкая износостойкость и высокий коэффициент трения. Поэтому чугуны применяют в малоответственных узлах трения при низких нагрузках и скоростях скольжения. Чугуны находятся на границе фрикционных и антифрикционных материалов.

К числу природных антифрикционных материалов относятся: древесина, драгоценные камни и т. д. Драгоценные камни успешно применяются в качестве опор скольжения в часовой промышленности. Они имеют низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. В чистом виде древесина применяется редко, обычно она пропитывается различными смазками и после пропитки прессуется. Преимущества обогащенной древесины: легко прирабатывается, мало изнашивается, самосмазывается, имеет невысокую стоимость. Недостатки: низкая твердость и теплопроводность, набухает, впитывает влагу.

Полимерные (искусственные) антифрикционные материалы изготавливаются на основе полиамидов и карбоцепных полимеров, фенолформальдегидных и эпоксидных смол, фторопласта. Фенолформальдегидные и эпоксидные смолы чаще всего используются в качестве основы и наполняются графитом, дисульфидом молибдена и др. Детали на основе эпоксидных смол обладают хорошей адгезией к металлам, химической стойкостью, повышенной механической прочностью. Для антифрикционных материалов чаще всего используются смолы *ЭД–5, ЭД–6, ЭД–П, ЭД–Л*.

Большой интерес для создания антифрикционных полимеров представляет фторопласт. Фторопласт химически инертен, не способен сорбировать влагу, обладает высокой пластичностью, низким модулем упругости и очень низким коэффициентом трения. Он теплостоек и термопластичен. Обычно во фторопласт вводится прочный каркас из металла или стекловолокна. Из металлофторопластовой полосы изготавливают вкладыши подшипников скольжения.

Антифрикционная металлокерамика обладает малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью, может работать без смазки в условиях загрязнения твердыми частицами. Выпускаются пористые сплавы на основе железа и графита (железографит), бронзы и графита (бронзографит), алюминия и графита (алюминографит), а также серебра и меди с графитом и др.

В современной технике получили широкое применение антифрикционные покрытия, наносимые на поверхность деталей трибосопряжения. Покрытия могут быть полимерными и металлическими, из твердых смазок, из оксидов или других соединений. Пленка должна иметь высокую адгезию к поверхности детали и близкий к материалу детали коэффициент теплового расширения, хорошую теплопроводность, низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. Технологии покрытий довольно сложны и постоянно совершенствуются.

Контрольные вопросы

1. Что такое абразивное изнашивание?
2. Назовите стадии изнашивания.
3. Какие материалы принято называть фрикционными?
4. Каковы достоинства и недостатки антифрикционных чугунов?
5. Назовите виды фрикционных материалов.

4. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ

При определении основных требований к износостойкости материалов для большинства трибосопряжений исходят из того, что при изготовлении и эксплуатации узлов трения необходимо обеспечить:

– максимальные или заданные значения прочности, жесткости, надежности и долговечности;

– минимальную массу, уровень шума и энергетические потери;

– низкую металлоемкость, высокую технологичность и минимальную стоимость;

– удобство монтажа и техобслуживания.

В широком смысле основные способы повышения долговечности (износостойкости) машин можно условно подразделить на три основные группы: конструкционные, технологические и эксплуатационные.

4.1. Конструктивные способы

Систематизация конструктивных решений, направленных на обеспечение износостойкости деталей машин, представляет большой интерес для машиностроения, но является очень сложной задачей, т. к. может насчитывать десятки тысяч предложений и вариантов решения. В этой связи рассмотрим отдельные из них.

Выбор материала

Применение материалов для изготовления деталей узла трения сложная задача. Выбор должен осуществляться с учетом большого количества факторов: уровень статической и динамической нагрузок, скорость относительного перемещения, температура эксплуатации, свойства смазочного материала и сопрягаемого тела, вид трения, конструкция узла и др.

Наиболее важным требованием является рациональное сочетание или учет совместимости материалов сопрягаемых тел. Должна быть исключена возможность схватывания поверхностей, образование адгезионных связей.

Не рекомендуется сочетать в трибосопряжении мягкий материал с мягким (алюминиевый сплав – медь, медный сплав – свинец и т.д.) и одноименные по природе материалы (медь – медь, бронза – бронза, титан – титан).

Наоборот, рекомендуется сочетать твердый материал с мягким, что обеспечивает высокую долговечность узла трения при низких нагрузках и температуре. Если реализовать такую пару трения невозможно, то отдавать предпочтение сочетанию твердого материала с твердым, но в этом случае приработку (обкатку) узла трения проводить на облегченном по нагрузке режиме.

Целесообразно применять, где это возможно, полимеры и металлокерамику. Это будет снижать расход дефицитных материалов, массу деталей и понижать вибрацию и уровень шума при работе машины.

Выбор материала необходимо проводить с учетом не только твердости, но и площади поверхности трения. Установлено, что более износостойкой является обратная пара трения (по поверхности с большей площадью скользит более мягкое тело). В случае прямой пары трения (по поверхности мягкого материала с большой площадью скользит тело из твердого материала, имеющее малую поверхность трения) интенсивность изнашивания более высокая. Из-за трудностей технологического характера этот прием реализуется довольно редко.

Оптимизация макрогеометрии поверхностей трения

Этот метод направлен на достижение возможно более равномерного распределения напряжений в зоне контакта, снижение фрикционного нагрева и разделение поверхностей трения слоем смазочного материала.

Изыскание оптимальной формы занимает важное место при конструировании деталей. Первоначальная форма и ее изменения в процессе изнашивания влияют на работоспособность деталей. В то же время темп износа отдельных деталей после приобретения ими формы естественного износа замедляется многократно.

Таким образом, при выборе формы сопрягаемых деталей руководствуются несколькими принципами:

– изначально поверхности трения должна задаваться такая форма, какую она имеет в период установившегося трения;

– сопрягаемые детали должны иметь форму, близкую к идеальной;

– выбирать оптимальную волнистость;

– придание детали такой формы, при которой по мере износа одних участков поверхности трения в контакт вступают соседние, менее изношенные.

Выбор наиболее оптимальной схемы машины

К числу конструктивных способов относится и выбор наиболее оптимальной принципиальной схемы машины (механизма) с учетом повышения износостойкости деталей. Конструкторская практика показывает, что, выбирая принципиальную схему, необходимо:

– рационально организовывать смазку трибосопряжений;

– обеспечивать возможность регулирования зазоров в трибосопряжениях;

– предусматривать возможность оперативной замены быстроизнашивающихся деталей;

– по возможности увеличивать толщину деталей в запас на износ;

– учитывать возможные температурные деформации деталей узлов трения и этим самым исключать возможность схватывания и заедания деталей в трибосопряжении.

Замена внешнего трения на внутреннее трение

При малых линейных или угловых перемещениях трущихся тел применим принцип замены внешнего трения внутренним. Для реализации этого принципа между двумя движущимися относительно друг друга телами раз-

мещают эластичный элемент, жестко закрепленный с их поверхностями. При перемещении тел эластичный элемент испытывает циклические знакопеременные деформации, амплитуда и асимметрия цикла которых определяют его долговечность. Благодаря этому исключено попадание абразивных частиц в сопряжение и, соответственно, исключен абразивный износ.

Нет необходимости в смазке такого сопряжения, и резко уменьшается уровень шума при работе механизма.

Рациональный выбор вида трения

Потери энергии в условиях трения скольжения значительно выше, чем при реализации трения качения. Поэтому необходимо там, где это возможно, использовать в конструкции узлов трения опоры качения.

Применение опор качения наиболее оправдано в узлах трения, эксплуатирующихся при малых и средних нагрузках и скоростях, отсутствии химически активных веществ, вибраций и ударных нагрузок. Нерационально их применять при реверсивном движении тел с малыми углами поворота. Применение опор качения требует подачи смазочного материала в зону трения, высокой точности изготовления и монтажа деталей подвижных сочленений. Существенным недостатком опор качения являются большие габаритные размеры.

Применение опор скольжения возможно в широком интервале нагрузок и скоростей, в несмазываемых узлах трения, не требует высокой точности изготовления. Они менее чувствительны к вибрациям, ударным нагрузкам и воздействию абразивсодержащих химически активных сред. К основным недостаткам опор скольжения относятся высокие коэффициенты трения и интенсивность изнашивания, износ сопрягаемой поверхности, зависимость триботехнических характеристик от температуры.

Снижение тепловой нагруженности контакта

Наличие температурных градиентов по касательной и нормали к поверхности трения приводит к возникновению высоких температурных напряжений, изменению зазоров и рельефа поверхности трения. В итоге возможно схватывание поверхностей, заедание и заклинивание подвижного сопряжения.

Меры борьбы с этим явлением включают:

– расчет зазоров с учетом величины температурных деформаций элементов узлов трения;

– выбор материалов с близким значением коэффициентов теплового расширения;

– применение схем контактирования с оптимальным коэффициентом трения;

– реализацию средств теплозащиты и теплоотвода.

4.2. Технологические способы

Технологические способы снижения интенсивности изнашивания направлены на достижение оптимальной топографии поверхности трения, обеспечение низкого сопротивления сдвигу на границе раздела трущихся тел и улучшение структуры поверхностного слоя изнашиваемого тела.

Формирование оптимальной топографии

Для каждого узла трения и определенных режимов его эксплуатации характерна своя оптимальная топография сопрягаемых поверхностей, при которой наблюдается минимальная интенсивность изнашивания. Она устанавливается в процессе приработки независимо от исходной микрогеометрии. Чем ближе исходная микрогеометрия к равновесной, тем меньше период приработки. Для деталей узлов трения в определенных режимах работы необходимо обеспечить непрерывное существование смазочной пленки в зоне контакта.

Поэтому разработан ряд технологических приемов создания на поверхности трения карманов смазки:

– с помощью абразивного инструмента создается сетка редко расположенных глубоких канавок;

– обкатка деталей роликами, шариками или алмазным инструментом.

В период перехода от трения покоя к трению скольжения смазочный материал выдавливается из канавок и частично восполняет его недостаток в зоне трения.

Нанесение защитных покрытий

Наиболее перспективным методом повышения износостойкости является нанесение защитных покрытий на поверхность трения деталей. Для этого используют материалы, обладающие высокой адгезионной способностью к детали, низким сопротивлением сдвигу и способностью выдерживать без разрушения многократные деформации.

К ним относят: мягкие металлы (медь, олово, свинец и т.п.), твердые смазочные материалы (графит, диселениды и дисульфиды металлов) и композиты на основе полимеров. Особое внимание заслуживают покрытия, представляющие собой пористый каркас, например из меди, поры которого заполняются сухим смазочным веществом.

Для тяжело нагруженных узлов трения используют детали, на поверхности которых сформирована пленка из твердых материалов типа нитрид титана, оксид алюминия, карбиды и бориды, покрытия на основе металлов или полимеров, содержащих ультраалмазы (частицы синтетических алмазов размером *4–8 нм*).

Покрытия наносят осаждением, напылением, окунанием, припеканием, электромагнитной наплавкой и др.

Облучение потоками энергии высокой плотности

Для повышения износостойкости деталей используют лазерное легирование тонких поверхностных слоев металлов и сплавов, локальную поверх-

ностную закалку сталей, лазерное упрочнение титановых сплавов путем оксидирования поверхностного слоя и снижения их наводороживания в процессе трения.

Также производят ионную бомбардировку, обработку электронным лучом, радиационное облучение (для деталей из полиэтилена), ионную имплантацию, ионно-лучевое перемешивание.

Химико-термическая обработка поверхности

Этот метод позволяет изменять структуру и свойства поверхностного слоя металлов путем насыщения его атомами легирующих элементов в процессе тепловой обработки в химически активной среде.

В зависимости от вида легирующего элемента различают: цементацию, азотирование, сульфоцианирование, силицирование, оксидирование, фосфатирование, сульфидирование, хромирование и др.

Цементация – насыщение углеродом поверхностного слоя малоуглеродистых (до *0,3% С*) сталей. Этот слой толщиной *0,5–2,3 мм* становится более твердым, но в нем возникают значительные внутренние напряжения, что снижает эффективность метода.

Азотирование – насыщение поверхностного слоя деталей из черных металлов азотом. Азот диффундирует в металл и образует с легирующими элементами нитриды. Это повышает твердость поверхности и увеличивает износостойкость в 8–10 раз.

Силицирование – насыщение черных металлов кремнием на глубину *0,3–1 мм*. Повышается стойкость к изнашиванию и воздействию химически активных сред. Однако поверхностный слой становится хрупким, обладает высокими внутренними напряжениями и трудно обрабатывается.

Оксидирование – процесс образования оксидной пленки толщиной до *3 мкм* на поверхности металлической детали. На поверхности стали образуется пористый поверхностный слой из мельчайших кристаллов FeO с низкой твердостью. Этот слой прочно соединен с основным металлом, обладает низким сопротивлением сдвигу и способен удерживать в своем объеме смазочный материал.

Фосфатирование – образование на поверхности изделий из черных и цветных металлов пленок толщиной до *50 мкм* из нерастворимых фосфорнокислых солей. Пленка обладает высокой стойкостью к воздействию активных веществ и изнашиванию, имеет высокую пористость и твердость.

Сульфидирование – насыщение поверхностного слоя серой, процесс сопровождается образованием сульфида и дисульфида железа. Слой обладает высокой адсорбционной активностью, низким сопротивлением сдвигу и обеспечивает высокую износостойкость детали.

Сульфоцианирование – метод упрочнения деталей при их тепловой обработке в ванне, содержащей соли серы, азота и углерода. Поверхностный слой содержит нитриды, карбиды и сульфиды железа.

В качестве термообработки применяется поверхностная закалка:

– пламенная – нагрев поверхности детали газовыми горелками (газовая среда – смесь кислорода с ацетиленом) или при помощи плазмотрона (устройство, генерирующее плазму);

– поверхностная закалка с контактным нагревом тока от понижающего трансформатора (сварочного).

– ТВЧ-закалка – индуктор с охлаждением;

– закалка с нагревом в электролите.

Наплавка износостойких слоев

Это один из наиболее распространенных способов восстановления изношенных деталей. Все известные виды наплавки имеют общие металлургические и физико-химические основы. К ним относятся: расплавление наносимого металла с частичным расплавлением поверхностного слоя детали, перемешивание расплавов, кристаллизация.

Наибольшее распространение получила электродуговая наплавка (ручная, полуавтоматическая), наплавка под слоем флюса и плазменно-дуговая. Наилучшие результаты получаются тогда, когда удается исключить контакт наплавленного металла с кислородом воздуха. Для этого процесс проводят в среде углекислого газа, аргона и их смесей.

Напыление покрытий из порошковых материалов

Если в высокотемпературную струю газа подать частицы порошка, то при столкновении с поверхностью они деформируются и прочно сцепляются с деталью. Существует две разновидности такой технологии: газоплазменное напыление и напыление с помощью электрической дуги или индукционных токов высокой частоты.

Главным достоинством метода напыления является его универсальность – независимость от природы материала детали.

Напыление не оказывает заметного теплового воздействия на основу. Напыляют цветные металлы и сплавы, стали, твердые сплавы и керамику, пластмассы и т.п. Напыление широко применяется для восстановления формы изношенных деталей.

Механическое упрочнение поверхностей

Это один из простых и наиболее экономичных способов упрочнения деталей машин. Этот метод чаще называют пластической деформацией. Он основан на использовании в качестве деформирующих тел роликов, шариков, струи из мелких стальных или стеклянных шариков, а также сферических алмазных наконечников. Помимо упрочнения поверхность детали выглаживается, снижается ее шероховатость. Все это повышает усталостную износостойкость и прочность детали, снижает срок приработки.

Материаловедческие способы повышения износостойкости

Эти методы направлены на создание новых износостойких материалов, оптимальное сочетание механических, химических и теплофизических свойств которых обеспечивает низкие коэффициент трения и интенсивность изнашивания при требуемых режимах нагружения.

Оптимизация макроструктуры материалов

Макроструктура или конструкция материала играет важную роль в обеспечении долговечности узла трения. В зависимости от режимов нагружения используют материалы блочные, ленточные, многослойные, армированные и с плавно изменяющимися по толщине свойствами (интегральные).

Детали однородной макроструктуры (блочные) выполняются из одного материала. Выбор типа и состава материала определяется конкретными условиями эксплуатации, свойства такого материала являются изотропными.

Ленточные материалы обладают рядом преимуществ. Они в меньшей степени зависимы от коэффициентов температурного расширения и теплопроводности, позволяют уменьшить габариты узла трения и расход дорогостоящих материалов, технологичны. Наиболее эффективно применение ленточных материалов в узлах трения с ограниченной смазкой. Чаще всего используют ленты из биметаллов и многослойные. Широко распространены ленты из порошковых материалов, нанесенных в виде тонкого слоя на стальную основу. Пористый слой может заполняться жидким или твердым смазочным материалом, полимерами.

Триботехническими характеристиками материала можно управлять, изменяя их пористость. Поры выполняют роль резервуаров для смазочного материала, который по мере износа материала выдавливается из его объема и поступает в зону трения. Наиболее эффективно получение пористых материалов спеканием из порошков (порошковая металлургия).

Одним из методов улучшения макроструктуры материалов является их армирование. Наиболее распространен этот метод при создании композитов на основе полимеров. Он направлен на устранение наиболее существенного недостатка полимеров – низких нагрузочной способности и теплопроводности. Для армирования широко используют стеклянные, металлические, асбестовые, арамидные и базальтовые волокна.

4.3. Эксплуатационные способы

Долговечность узлов трения машин и механизмов в значительной мере зависит от условий их эксплуатации, соблюдения норм, направленных на снижение интенсивности изнашивания трущихся тел, своевременности проведения профилактических мероприятий, замены или восстановления изношенных деталей. Рассмотрим наиболее широко применяемые эксплуатационные методы обеспечения высокой износостойкости узлов трения.

Обкатка машин и механизмов

Данный метод предназначен для одновременной приработки всех узлов трения, входящих в состав машины, создания равновесной шероховатости. Обкатку производят, как правило, при пониженной нагрузке, обильной смазке, с обязательным контролем температуры в парах трения. Применение специальных приработочных смазок, имеющих в своем составе ПАВ, позволяет сократить время приработки и уменьшить износ в этот период. За время при-

работки коэффициент трения уменьшается и постепенно стабилизируется. Окончание процесса приработки можно установить по стабилизации коэффициента трения и температуры. Обкатку чаще проводят на специальных стендах.

Организация смазки узлов трения

Это одна из наиболее эффективных мер продления срока службы трибосистем. В процессе эксплуатации машин и механизмов происходит утечка и старение смазочных материалов, они теряют свои смазочные свойства, насыщаясь продуктами износа и деструктируя. Это приводит к необходимости периодической фильтрации и (или) замены смазочного материала.

Применение смазочного материала после истечения срока его замены приводит к повышенному износу элементов узла трения. Преждевременная замена смазочного материала также нецелесообразна.

Период эксплуатации смазочного материала до полной замены зависит от его свойств, конструкции узла трения, условий и режимов эксплуатации. Важной мерой в организации смазки является очистка деталей и смазочной системы от шлаков.

Выбор режимов эксплуатации

Важным условием предупреждения интенсивного изнашивания узлов трения является исключение перегрузок. Превышение допустимых нагрузки или скорости скольжения приводит к нарушению теплового режима работы узла трения, вытеканию смазочного материала из зоны трения и интенсивному износу трущихся тел.

В значительной мере долговечность трибосопряжений определяется частотой и правильностью выполнения запуска машины. Именно в пусковой период износ деталей является наиболее интенсивным. В период запуска нагрузка должна повышаться плавно и достигать требуемого значения в момент стабилизации теплового состояния узла трения.

Диагностика и ремонт узлов трения

Замена или восстановление изношенных деталей осуществляются после достижения ими предельно допустимого износа, который определяется по техническому, функциональному или экономическому критерию.

Согласно техническому критерию, предельному износу детали соответствует начало резкого увеличения коэффициента трения, интенсивности изнашивания, температуры, вибрации или изменение выше допустимого значение размеров детали. Оценка по техническому критерию требует непрерывной или периодической диагностики изнашивания подвижных сопряжений или анализ проб масла.

В основу функционального критерия положено изменение функций, выполняемых узлом трения или машиной. Это потеря мощности двигателя, снижение точности обработки изделия на металлорежущем станке, снижение давления на выходе компрессора, появление или рост утечки рабочей жидкости или смазочного материала в различных механизмах и т.п.

В качестве экономического критерия могут служить производительность машины, затраты на выпуск единицы продукции.

Ремонт узлов трения осуществляется как после достижения ими допустимого износа, так и после превышения ими предельного срока службы, определяемого нормативными документами.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы повышения долговечности деталей?
2. Охарактеризуйте конструктивные способы.
3. На что направлены технологические способы снижения интенсивности изнашивания?
4. Эксплуатационные методы обеспечения высокой износостойкости узлов трения, их суть.

5. МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

5.1. Термомеханическая обработка сталей

Термомеханическая обработка (*ТМО*) относится к комбинированным способам изменения строения и свойств материалов. При *ТМО* совмещаются пластическая деформация и термическая обработка (т.е. производится закалка предварительно деформированной стали в аустенитном состоянии).

Повышение прочности при термомеханической обработке объясняют тем, что в результате деформации аустенита происходит дробление его зерен (блоков). Размеры блоков уменьшаются в 2–4 раза по сравнению с обычной закалкой. Также увеличивается плотность дислокаций. При последующей закалке такого аустенита образуются более мелкие пластинки мартенсита, снижаются напряжения.

Преимуществом термомеханической обработки является то, что при существенном увеличении прочности характеристики пластичности снижаются незначительно, а ударная вязкость выше в *1,5–2* раза по сравнению с ударной вязкостью для той же стали после закалки с низким отпуском.

В зависимости от температуры, при которой проводят деформацию, различают высокотемпературную термомеханическую обработку (*ВТМО*) и низкотемпературную термомеханическую обработку (*НТМО*).

Высокотемпературная термомеханическая обработка – заключается в нагреве стали до температуры аустенитного состояния. При этой температуре осуществляют деформацию стали, что ведет к наклепу аустенита. Сталь с таким состоянием аустенита подвергают закалке. Последующий отпуск при температуре *100–200 ºС* проводится для сохранения высоких значений прочности.

ВТМО практически устраняет развитие обратимой отпускной хрупкости, ослабляет необратимую отпускную хрупкость и резко повышает ударную вязкость при комнатной температуре. Понижается температурный порог хладноломкости (охрупчивание металла при низких температурах), уменьшает чувствительность к трещинообразованию при термической обработке.

Низкотемпературная термомеханическая обработка (*аусформинг*) – нагрев до аустенитного состояния, выдержка, охлаждение до температуры, выше температуры начала мартенситного превращения (*400–600 ºС*), но ниже температуры рекристаллизации, и при этой температуре осуществляют обработку давлением и закалку.

Низкотемпературная термомеханическая обработка, хотя и дает более высокое упрочнение, но не снижает склонности стали к отпускной хрупкости. Кроме того, она требует высоких степеней деформации (*75–95%*), поэтому требуется мощное оборудование.

5.2. Обработка стали холодом

Высокоуглеродистые и многие легированные стали имеют температуру конца мартенситного превращения (*Мк*) ниже *0 ºС*. Поэтому в структуре стали после закалки наблюдается значительное количество остаточного аустенита, который снижает твердость изделия, а также ухудшает магнитные характеристики. Для устранения аустенита остаточного проводят дополнительное охлаждение детали в области отрицательных температур, до температуры ниже т. *Мк* (*– 80 ºС*). Обычно для этого используют сухой лед.

Такая обработка называется *обработкой стали холодом*.

Обработку холодом необходимо проводить сразу после закалки, чтобы не допустить стабилизации аустенита. Увеличение твердости после обработки холодом обычно составляет *1–4 HRC*.

После обработки холодом сталь подвергают низкому отпуску, так как обработка холодом не снижает внутренних напряжений.

Обработке холодом подвергают детали шарикоподшипников, точных механизмов, измерительные инструменты.

5.3. Старение сплавов

Старение сплавов связано с переменной растворимостью избыточной фазы, а упрочнение при старении происходит в результате дисперсионных выделений при распаде пересыщенного твердого раствора и возникающих при этом внутренних напряжений.

Естественным старением называется самопроизвольное повышение прочности и уменьшение пластичности закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре. Нагрев сплава увеличивает подвижность атомов, что ускоряет процесс.

Повышение прочности в процессе выдержки при повышенных температурах называется *искусственным старением*.

Предел прочности, предел текучести и твердость сплава с увеличением продолжительности старения возрастают, достигают максимума и затем снижаются (*явление перестаривания*).

При естественном старении перестаривания не происходит. С повышением температуры стадия перестаривания достигается раньше.

Если закаленный сплав, имеющий структуру пересыщенного твердого раствора, подвергнуть пластической деформации, то также ускоряются процессы, протекающие при старении – это *деформационное старение*.

Старение является основным способом упрочнения алюминиевых и медных, а также многих жаропрочных сплавов.

5.4. Поверхностная закалка стали

Конструкционная прочность часто зависит от состояния материала в поверхностных слоях детали. Одним из способов поверхностного упрочнения стальных деталей является поверхностная закалка.

В результате поверхностной закалки увеличивается твердость поверхностных слоев изделия с одновременным повышением сопротивления истиранию и предела выносливости.

Общим для всех видов поверхностной закалки является нагрев поверхностного слоя детали до температуры закалки с последующим быстрым охлаждением. Эти способы различаются методами нагрева деталей. Толщина закаленного слоя при поверхностной закалке определяется глубиной нагрева.

Наибольшее распространение имеют электротермическая закалка с нагревом изделий токами высокой частоты (*ТВЧ*) и газопламенная закалка с нагревом газово-кислородным или кислородно-керосиновым пламенем.

Закалка токами высокой частоты. Метод основан на том, что если в переменное магнитное поле, создаваемое проводником-индуктором, поместить металлическую деталь, то в ней будут индуцироваться вихревые токи, вызывающие нагрев металла. Чем больше частота тока, тем тоньше получается закаленный слой.

Индукторы изготавливаются из медных трубок, внутри которых циркулирует вода, благодаря чему они не нагреваются. Форма индуктора соответствует внешней форме изделия, при этом необходимо постоянство зазора между индуктором и поверхностью изделия.

Высокая скорость нагрева смещает фазовые превращения в область более высоких температур. Температура закалки при нагреве токами высокой частоты должна быть выше, чем при обычном нагреве. Так, например, при нагреве *ТВЧ* со скоростью *250 °С/с* температуры нагрева под закалку стали *45* составит *880–920 °С*, а при скорости *500 °С/с – 980–1020 °С*. Поскольку время нагрева очень короткое, зерно в стали не успевает вырасти и перегрева не происходит.

При правильных режимах нагрева после охлаждения получается структура мелкоигольчатого мартенсита. Твердость повышается на *2…4 HRC* по сравнению с обычной закалкой, возрастает износостойкость и предел выносливости.

Преимущества метода:

- большая экономичность, нет необходимости нагревать все изделие;
- более высокие механические свойства;
- отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности детали;
- снижение брака по короблению и образованию закалочных трещин;
- возможность автоматизации процесса;
- использование закалки *ТВЧ* позволяет заменить легированные стали на более дешевые углеродистые;
- позволяет проводить закалку отдельных участков детали.

Основной недостаток метода – высокая стоимость индукционных установок и индукторов. Целесообразно использовать в серийном и массовом производстве.

Газопламенная закалка. Нагрев осуществляется ацетилено-кислородным, газокислородным или керосинокислородным пламенем с температурой *3000–3200 ºС*. Толщина закаленного слоя *2–4 мм*, твердость *50–56 HRC*.

Метод применяется для закалки крупных изделий, имеющих сложную поверхность, для закалки стальных и чугунных прокатных валков.

Используется в массовом и индивидуальном производстве, а также при ремонтных работах.

Недостатки метода:

- невысокая производительность;
- сложность регулирования глубины закаленного слоя и температуры нагрева (возможность перегрева).

5.5. Механическое упрочнение поверхности

Основное назначение методов механического упрочнения поверхности – повышение усталостной прочности. Методы механического упрочнения заключаются в наклёпывании поверхностного слоя на глубину *0,2–0,4 мм*.

Разновидностями являются дробеструйная обработка и обработка роликами.

Дробеструйная обработка – обработка дробью поверхности готовых деталей. Осуществляется с помощью специальных дробеструйных установок, выбрасывающих стальную или чугунную дробь на поверхность обрабатываемых деталей. Диаметр дроби – *0,2–4 мм*.

Метод применяют для упрочнения изделий типа пружин, рессор, звенья цепей, гусениц, гильзы, поршни, зубчатые колеса.

При обработке роликами деформация осуществляется давлением ролика из твердого металла на поверхность обрабатываемого изделия.

При усилиях на ролик, превышающих предел текучести обрабатываемого материала, происходит наклеп на нужную глубину. Обработка улучшает микрогеометрию. Создание остаточных напряжений сжатия повышает предел усталости и долговечность изделия.

Обкатка роликами применяется при обработке шеек валов, проволоки, при калибровке труб, прутков.

Метод не требует специального оборудования, можно использовать токарные или строгальные станки.

5.6. Химико-термическая обработка стали

Химико-термической обработкой (*ХТО*) называют поверхностное насыщение стали некоторыми химическими элементами – неметаллами и металлами (например, углеродом, азотом, алюминием, хромом и др.) путем их

диффузии в атомарном состоянии из внешней среды при высокой температуре. В ходе данных процессов обязательно изменяется химический состав, микроструктура и свойства поверхностных слоев изделий. *ХТО* – это основной способ поверхностного упрочнения деталей.

При *ХТО* обрабатываемые детали нагревают в каких-либо химически активных средах. Основные параметры обработки – температура нагрева и продолжительность выдержки. *ХТО* обычно осуществляется за длительное время. Температуру процесса выбирают конкретно для каждого вида обработки.

Основными видами *ХТО* являются цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование и диффузионная металлизация.

Цементацией называется процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом с целью повышения работоспособности деталей машин (всевозможные шестерни, зубчатые муфты, втулки и т.п.), испытывающих в процессе эксплуатации статические, динамические и переменные нагрузки и подверженных изнашиванию. Как правило, цементацию проводят при температурах выше точки Ac3 (*930–950 ºС*), когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в большом количестве.

Окончательные свойства цементованные изделия приобретают в результате закалки и низкого отпуска, выполняемых после цементации.

Для цементации обычно используют низкоуглеродистые (*0,10–0,18% С*), чаще легированные стали.

Для цементации крупногабаритных деталей применяют сплавы с более высоким содержанием углерода (*0,2–0,3%).* Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом при цементации, сохраняла высокую вязкость после закалки.

Концентрация углерода в поверхностном слое должна составлять *0,8–1,0%.* Для более высокой износостойкости содержание углерода может быть повышено до *1,1–1,2%.* Более высокая концентрация углерода вызывает ухудшение механических свойств цементуемого изделия.

Цементацию проводят, в основном, в твердом, газообразном и жидком карбюризаторах.

Цементация твердым карбюризатором. В данном процессе насыщающей средой является древесный уголь (дубовый или березовый) в зернах размером *3,5–10,0 мм*. Для ускорения процесса цементации добавляют активизаторы: углекислый барий ($BaCO_3$) и кальцинированную соду – углекислый натрий (Na_2CO_3) в количестве *10–40%* от массы угля.

Цементация газообразным карбюризатором. Это наиболее распространенный способ цементации, имеющий ряд преимуществ. В ходе него можно получить заданную концентрацию углерода в слое; сокращается длительность процесса, так как отпадает необходимость прогрева ящиков, наполненных малотеплопроводным карбюризатором; обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процессов и значительно упрощается последующая термическая обработка изделий.

Наиболее качественный цементованный слой получается при использовании в качестве карбюризатора природного газа, состоящего почти полостью из метана CH_4 и пропанбутановых смесей, подвергнутых специальной обработке, а также жидких углеводородов.

Азотирование – это процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при нагреве ее в диссоциированном аммиаке. Такой химико-термической обработке подвергают детали, которые работают на износ при разогреве поверхности до *400 ºС*.

Азотирование значительно повышает твердость поверхностного слоя, его износостойкость, предел выносливости, коррозионные свойства. Твердость азотированного слоя выше, чем цементованного. При этом, в отличие от твердости цементованного слоя, сохраняющегося до *200–225 ºС*, твердость азотированной поверхности сохраняется при нагреве до высоких температур (*500–550 ºС*).

Нитроцементация – это процесс одновременного насыщения стали углеродом и азотом в среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. По сравнению с цементацией, нитроцементацию проводят при более низких температурах – *850–870 ºС*. Азот, выполняя роль легирующего элемента, понижает критические точки стали. Понижение температуры насыщения без увеличения длительности процесса позволяет снизить деформацию обрабатываемых деталей.

Для нитроцементации используют контролируемую эндотермическую атмосферу, которую получают в результате частичного сжигания метана при большом недостатке воздуха и распада большей части метана без доступа воздуха. В контролируемую эндотермическую атмосферу добавляют *3–15%* не отработанного природного газа и *2–10%* аммиака NH_3.

Нитроцементации обычно подвергают легированные стали с содержанием углерода до *0,25%*. Продолжительность процесса *4–10 ч*. Толщина нитроцементованного слоя составляет *0,2–0,8 мм*.

Цианированием называют также совместное насыщение поверхности стали углеродом и азотом вследствие окисления расплавленных цианистых солей при нагревании до *820–960 ºС*.

Для получения слоя небольшой толщины (*0,15–0,35 мм*) процесс проводят в ваннах, содержащих *20–25%* цианистого натрия – *NaCN, 25–50%* хлорида натрия – *NaCI* и *25–50%* кальцинированной соды – Na_2CO_3. Продолжительность насыщения определяется требуемой глубиной слоя и составляет *30–90* минут.

Диффузионной металлизацией называется *ХТО*, при которой поверхность стальных деталей насыщается различными металлами; алюминием, хромом, цинком и др. После такой обработки повышаются жаро-, износо- и коррозионная стойкость.

Алитирование – насыщение поверхности изделия алюминием. Оно осуществляется для стальных деталей с содержанием углерода *0,1–0,2%*. Детали приобретают высокую жаростойкость, они могут работать при температуре

до *1150 ºС* за счет образования на их поверхности плотной пленки из оксида алюминия Al_2O_3.

Хромирование, т. е. насыщение поверхности стальных изделий хромом, обеспечивает повышенную устойчивость против газовой коррозии (окалиностойкость) до *800 ºС*, высокую коррозионную стойкость в таких средах, как пресная и морская вода, азотная кислота. У средне- и высокоуглеродистых сталей оно повышает твердость (до *HV 1600–1800*) и износостойкость. Ему подвергают детали, изготовленные из сталей с самым различным содержанием углерода.

Хромированию подвергают детали паросилового оборудования, паровodяной арматуры, клапанов, вентилей, патрубков, а также изделий, работающих на износ в агрессивных средах.

Цинкование – насыщение поверхностного слоя цинком для повышения коррозионной стойкости стали в атмосфере, пресной воде, бензине и некоторых других средах. На металлургических заводах цинкованию подвергают тонкие листы, трубы, проволоку и готовые изделия (втулки, фитинги и т. д.).

5.7. Наплавка и напыление поверхности деталей

Наплавка износостойких слоев. Это один из наиболее распространенных способов восстановления изношенных деталей. Все известные виды наплавки имеют общие металлургические физико-химические основы. К ним относятся: расплавление наносимого металла с частичным расплавлением поверхностного слоя детали, перемешивание расплавов, кристаллизация.

Наибольшее распространение получила электродуговая наплавка (ручная, полуавтоматическая), наплавка под слоем флюса плазменно-дуговая. Наилучшие результаты получаются тогда, когда удается исключить контакт наплавленного металла с кислородом воздуха, для этого процесс проводят в среде углекислого газа, аргона и их смесей.

Высокоэффективным методом наплавки является наплавка порошковой проволокой.

Напыление покрытий из порошковых материалов. Если в высокотемпературную струю газа подать частицы порошка, то при столкновении с поверхностью они деформируются и прочно сцепляются с деталью. Существует две разновидности такой технологии: газоплазменное напыление и напыление с помощью электрической дуги или индукционных токов высокой частоты.

Главным достоинством метода напыления является его универсальность – независимость от природы материала детали. Можно наносить покрытия не только на металлы, но и на керамику, дерево, бетон, полимеры, ткани, бумагу. Это связано с тем, что напыление не оказывает заметного теплового воздействия на основу. То же можно сказать и о напыляемых материалах. Напыляют цветные металлы и сплавы, стали, твердые сплавы и керамику, пластмассы и т. п. Напыление широко применяется для восстановления формы изношенных деталей.

Плакирование. Этот метод применяется при изготовлении деталей или восстановлении их формы после изнашивания. Толщина наносимого слоя может составлять несколько миллиметров.

Толстослойные покрытия часто наносят методом прокатки. Сцепление слоев осуществляется за счет диффузии при высокой температуре. Таким методом получают биметаллические полосы, кольца и др.

Электрохимические покрытия. Их наносят на поверхности деталей методом электролиза. Чаще всего применяются электрохимическое хромирование, серебрение, нанесение покрытия олова, свинца, цинка, индия и др. Одно из главных мест занимает гладкое или пористое хромирование, которое хорошо удерживает смазку и обладает высоким сопротивлением износу в условиях граничного трения.

В технике для подшипников скольжения широко применяются электролитические покрытия деталей оловом, свинцом, и другими мягкими и пластичными металлами и сплавами. Использование таких покрытий позволяет ускорить приработку поверхностей деталей. Чаще всего для этих целей используются оловянные и олово-свинцовые покрытия.

Контрольные вопросы

1. Виды термомеханической обработки сталей.
2. Когда применяют обработку стали холодом?
3. Что такое естественное старение и деформационное старение?
4. Чего добиваются поверхностной закалкой стали?
5. Основное назначение методов механического упрочнения поверхности.
6. Что представляет собой химико-термическая обработка стальной поверхности?
7. Какую роль играет оловянно-свинцовое покрытие деталей?
8. Какова сущность наплавки деталей?
9. Что представляет собой процесс плакирования?
10. Каков процесс электрохимического покрытия?

6. ЭФФЕКТ БЕЗЫЗНОСНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

6.1. Самоорганизация в узлах трения

Изыскание оптимальной формы занимает важное место при конструировании деталей. Первоначальная форма и ее изменения в процессе изнашивания влияют на работоспособность деталей. В то же время темп износа отдельных деталей после обретения ими формы естественного износа замедляется многократно. Впервые это заметили спортсмены, которые спортивную обувь с прямым каблуком и носком заменили на закругленную. Сообщив ей форму естественного износа, они получили ряд положительных результатов, в том числе износостойкость такой обуви в несколько раз увеличилась. Кроме того, такая форма оказывала положительное влияние на осанку спортсмена и его выносливость.

Такой же эффект по износостойкости был получен у цилиндрических и конических зубчатых колес путем обработки концов зубьев и придания им бочкообразной формы. Бочкообразная форма зуба не только способствует увеличению долговечности передачи, но и уменьшает шум во время работы.

Рассмотрим один из примеров самоорганизации – узлы трения компрессора домашнего холодильника. Компрессор холодильника работает десятки лет в тяжелых условиях (постоянные пуски и остановки) практически без износа. Детали, работающие на трение, выполнены из стали, смазочным материалом служит смесь *50%* масла и *50%* фреона. В процессе работы на поверхностях трения стальных деталей – шейках коленчатого вала (шатунной и коренных), сопряженных подшипниках, поршне и цилиндре – самопроизвольно образуется тонкая медная пленка толщиной *1–2 мкм*. Пленка формируется из ионов меди, образующихся в смазочном материале в результате незначительного коррозионного процесса медных трубок охладителя. Медные трубки растворяются маслофреоновой смесью, и в ней появляются ионы меди. К месту контакта трущихся деталей ионы приносит охлаждающая смесь из фреона и масла, исполняющая также роль смазочного материала.

Активность маслофреоновой смеси по отношению к медным трубкам охладителя повышается в результате образования в зоне трения при начальной работе компрессора слабых кислот (окисление масла). После того, как в зоне контакта образуется пленка меди, условия трения деталей изменяются: снижается давление, уменьшается сила трения и падает температура. В результате процессы, образующие пленку меди (окисление масла и растворение трубок), могут прекратиться. Таким образом, можно отметить следующую цепочку взаимообусловленных явлений, происходящих в смазочной системе компрессора и на поверхностях трения деталей.

Начальный период:

– в паре трения «сталь – сталь» смазочный материал окисляется, образующиеся кислоты растворяют поверхностные слои медных трубок охладителя и доставляют в смазочную систему ионы меди;

– ионы меди, циркулируя в смазочной системе, осаждаются на поверхности деталей только в зоне трения, узкие щели на деталях по отношению к массе детали представляют собой анодные участки; ионы меди втягиваются в зазоры сопряжений;

– в результате коллективного взаимодействия ионов происходит кристаллизация и образуется тонкая пленка меди, покрывающая поверхности трения деталей.

Установившийся режим:

– после того, как поверхности трения покроются пленкой меди, пара трения «сталь – сталь» становится парой «медь – медь»; это приводит к снижению трения и, как результат, к снижению интенсивности окисления маслофреоновой смеси и прекращению растворения медных трубок;

– в установившемся режиме трения медная пленка не изнашивается. Её частицы могут переходить с одной поверхности трения на другую. Продукты износа пленки удерживаются в зазоре электрическими силами.

На основании рассмотренного примера можно утверждать, что трение может сопровождаться эволюционными процессами, в результате которых разрушение поверхностей становится второстепенным. Главным выступает созидательный характер трения, который обусловлен обменом узла трения с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов меди, из которых формируется тонкая медная пленка, защищающая поверхности трения от изнашивания.

Металлическую медную пленку, образующуюся в процессе трения, называют «сервовитной». Она представляет собой вещество (в данном случае металл), образованное потоком энергии и существующее в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, оно её создает. Образование защитной пленки относится к новому классу самоорганизующихся явлений неживой природы. Их изучение только началось.

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. Структура пленки отличается от структуры обычной меди; она квазижидкая – имеет много вакансий и мало дислокаций, которая образовалась в процессе трения (в естественных условиях).

6.2. Избирательный перенос при трении

Другой формой самоорганизации в узлах трения является избирательный перенос. Это явление было обнаружено в парах трения «сталь – бронза» при использовании глицериновой смазки, а также в паре «сталь – сталь» в узлах трения компрессора домашнего холодильника при смазывании маслофреоновой смесью. Исследования и практика показывают, что медная пленка в паре «бронза – сталь» образуется в результате анодного растворения бронзы глицерином. Глицерин действует при трении как слабая кислота. Атомы леги-

рующих элементов бронзы (олово, цинк, железо и др.) уносятся в смазочный материал, в результате поверхность бронзы обогащается атомами меди. В то же время стальная поверхность также покрывается тонким слоем меди.

После того, как медная пленка покроет бронзовую и стальную поверхности, молекулы глицерина уже не могут взаимодействовать с бронзой («вытягивать» атомы легирующих элементов), процесс растворения бронзы прекращается и наступает установившийся режим избирательного переноса. В этих условиях медная пленка, ее называют сервовитной, как мягкий материал работает по мягкому. Нагрузка в этом случае распределяется равномерно по поверхности трения и имеет небольшую величину на единице площади, что способствует резкому снижению интенсивности изнашивания трибосопряжения и, в целом, повышению ресурса узла трения.

Избирательный перенос – вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта тонкой неокисляющейся металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и не способной накапливать при деформации дислокации. На пленке, образуя с ней химическую связь, может происходить образование координационных соединений из продуктов механической деструкции углеводородов смазки, создавая дополнительный антифрикционный слой. Эта пленка повышает износостойкость поверхности (до *2* порядков) и снижает силы трения (на порядок) по сравнению с аналогичными условиями трения при граничной смазке.

Для нее характерен нелинейный режим взаимодействия вакансий и дислокаций – вакансионно-дислокационный механизм сдвига, задаваемый повышенной концентрацией вакансий при избирательном растворении упрочненных участков поверхности в процессе трения.

При некоторой критической концентрации вакансий в пленке происходит переход от консервативного движения дислокаций к их неконсервативному переползанию к поверхности и выходу на нее. Дислокации переходят на другой уровень взаимодействия с кристаллической решеткой металла с существенно меньшей затратой энергии, что сопровождается релаксацией напряжений.

Поскольку при эффекте безызносности трение сопровождаеся эволюционными процессами – образование металлической пленки на трущихся поверхностях, то главным в этом случае становится самоорганизующийся характер трения, который обусловлен обменом трущейся пары с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов металла, из которых формируется металлическая пленка. Она представляет собой металл в особом состоянии, имеющем место только в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, так как оно ее воспроизводит.

Пленка при трении образуется из одного из материалов, участвующих в трении (бронзы, латуни), или другого медного сплава, или же из смазочного материала, содержащего порошки пластичных металлов, их соли, комплексные соединения металлов, металлорганические соединения.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой сервовитная пленка?
2. Сущность избирательного переноса.
3. Каков процесс самоорганизации в узлах трения?
4. Суть эффекта безызносности.
5. Каким образом выбирается материал в узлах трения?

7. КУЗОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Кузов – один из основных и дорогих агрегатов любого автомобиля. Например, стоимость изготовления кузова легкового автомобиля составляет *60–70%* стоимости всего автомобиля, а трудоемкость изготовления достигает *60%* трудоемкости изготовления автомобиля в целом. На изготовление кузова затрачиваются в большом количестве дорогие материалы.

Кузова по материалу корпуса делятся на металлические, пластиковые и комбинированные.

Основным материалом для изготовления кузовов легковых автомобилей служит тонколистовая сталь. В последнее время все чаще применяются легкие сплавы алюминия.

Пластмассовые кузова используются при изготовлении автомобилей единичного производства.

Комбинированные кузова, состоящие из металла и пластмассы, используют с целью снижения массы и облегчения автомобиля. Последовательно рассмотрим все материалы, применяемые для изготовления деталей и узлов кузова автомобиля

7.1. Листовая сталь для изготовления кузова

Производство современных автомобилей должно учитывать сегодня целый ряд экономических факторов. Наряду со снижением производственных затрат возрастают требования к энерго- и материалосбережению.

Выбор материалов также очень важен.

Кузов автомобиля состоит из большого числа узлов и деталей, изготовленных из различных материалов. От их правильного выбора и умелого применения при изготовлении кузова зависят впоследствии качество его обслуживания и ремонта, затраты труда и расход материалов. При изготовлении автомобильных кузовов применяют листовой металл и сплавы, изделия из стекла и полимерных материалов и т. д.

Все металлы и их сплавы, из которых изготавливают кузова автомобилей, должны отвечать следующим требованиям: высокая усталостная прочность; высокие противокоррозионные свойства; хорошие прочностные качества детали в сочетании с необходимыми пластическими свойствами при штамповке и достижении заданной формы.

Основным материалом, из которого изготавливается большая часть деталей кузовов отечественных и зарубежных автомобилей, является листовая сталь. Для изготовления штампованных деталей кузовов отечественных автомобилей используется низкоуглеродистые стали *08Ю* и *08КП*. Анализ химического состава и механических свойств этих сталей показывает, что они обладают наибольшим относительным удлинением по сравнению со сталями с большим содержанием углерода, что обуславливает их использование для штамповки, так как на этом участке образуются большие, местами различ-

ные, растяжения, при которых не должно возникать трещин и складок. Формообразование гладкого места при изготовлении крыльев, капота и других больших и малых фасонных деталей предъявляет высокие требования к пластическим свойствам материала. Кроме того, эти стали не требуют дополнительной термической обработки детали и заготовки, обладают хорошей свариваемостью.

Специальным требованиям к пластичности отвечают тонкие листы стали с содержанием углерода менее *1%*. У таких специальных сортов сталей глубокой вытяжки суммарное содержание фосфора и серы составляют менее *0,07%.*

При изготовлении кузовов легковых автомобилей обычно используют стальной лист глубокой вытяжки толщиной *0,55–1,5 мм*. Меньшая толщина листа применяется для изготовления внешних деталей кузова, а большая – для элементов его несущей части. Преимущества уменьшения толщины листа заключаются в следующем: сокращаются производственные расходы, снижается собственная масса автомобиля, повышается степень безопасности пассажиров при правильно рассчитанной жесткости кузова. Необходимая толщина листов, определяемая действующими нагрузками, составляет *0,55–0,88 мм* – для внешних деталей облицовки и *1,25–1,5 мм* – для несущих деталей корпуса (лонжероны, стойки и т. д.).

Кроме снижения веса автомобиля низкоуглеродистая сталь позволяет делать детали различных сложных форм, что позволяет дизайнерам воплотить в жизнь новые идеи.

Теперь к недостаткам.

Сталь очень подвержена коррозии, поэтому современные кузова обрабатывают сложными химическими составами и красят по определенной технологии. Также к недостаткам можно отнести высокую плотность материала.

Кузовные элементы выштамповывают из листов стали, а затем сваривают в единое целое. Сегодня сварка полностью осуществляется роботами.

Достоинства стальных кузовов:

- стоимость;
- легкость в ремонте кузовов;
- хорошо отлаженная технология производства.

Недостатки:

- высокая масса;
- необходимость антикоррозийной обработки;
- большое количество штампов;
- ограниченный срок службы.

7.2. Кузовные материалы с антикоррозионными покрытиями

Подверженность стальных кузовов коррозии побудило иностранных производителей уже в конце *1960-х* годов применять при изготовлении автомобилей оцинкованный лист. У оцинкованных листов к толщине собственно-

го листа добавляется еще толщина оцинкованного слоя, которая составляет около *10–20 мкм*.

Некоторые кузовные детали отечественных автомобилей, наиболее подверженные коррозии (крылья, пороги, панели пола и т. п.) изготавливают также из специальной стали – цинкометалла, имеющей одностороннее или двустороннее двухслойное покрытие, состоящее из неорганического слоя на хромовой основе и цинконасыщенного слоя на эпоксидной основе. Толщина слоя цинкового покрытия определяется толщиной стального листа, из которого штампуются детали кузова, и коррозионной нагрузкой отдельных участков кузова. На те места, куда падает особенно много химически разрушающих веществ, наносят более *270 г* цинка на *1 м²* площади кузова с каждой стороны.

В серийном производстве применение оцинкованных листов обуславливает изменение технологии штамповки деталей кузова и использование специальной сварочной техники. Сегодня можно утверждать, что оцинкованная сталь с большим успехом применяется в серийном производстве, вследствие чего срок службы кузова современного легкового автомобиля значительно возрос.

В настоящее время применяют в основном два вида панелей кузовов с нанесенными цинковыми покрытиями. Первые имеют гальваническое покрытие с толщиной слоя цинка *7,5 мкм* с каждой стороны. Эти детали имеют очень хорошие характеристики качества поверхности и устанавливаются снаружи кузова. Вторые, имеющие покрытие, полученное способом горячего цинкования в ванне при температуре *450 ºС*, толщиной не менее *10 мкм* с каждой стороны, используются в основном для изготовления несущих элементов кузова. Их поверхность относительно грубая, т. е. шероховатая, и не подходит для получения качественного лакокрасочного покрытия. Но зато этот способ нанесения цинкового покрытия более дешевый, обеспечивает толщину слоя *60–120 мкм* и с успехом применяется для рам, лонжеронов и других аналогичных деталей кузова. Кроме того, при последующей сварке этих деталей между собой вокруг сварной зоны образуется защитное кольцо из расплавленного и вновь остывшего цинка. Оцинкованные таким способом детали впоследствии не окрашиваются, а необходимую декоративную отделку при необходимости обеспечивают наружные детали из синтетических материалов, покрытых лаком.

Современная зарубежная (Япония) техника и технологии поверхностной обработки кузовных сталей позволяют повышать эксплуатационные свойства кузовов. Листовые кузовные стали, подвергнутые поверхностной обработке, не говоря уже о коррозионной стойкости, одновременно обладают довольно высокими штампуемостью, свариваемостью, теплостойкостью и способностью отражать тепло, демпфирующими свойствами и отделочной окрашиваемостью. В зависимости от назначения применяются стальные материалы, гальванизированные (в основном цинком) с одной стороны, с двух сторон или с разной толщиной покрытий. Кроме того, внедряются листовые стали,

гальванизированные разными металлами, а также комбинированная листовая сталь.

Листовая сталь, оцинкованная методом погружения в горячий расплав цинка, приобретает высокую противокоррозионную стойкость и имеет хорошую экономичность. Для деталей с таким цинковым покрытием не предусматривается последующее окрашивание.

Листовая сталь, оцинкованная методом погружения в легированный горячий расплав из цинка и железа, обладает высокими противокоррозионными свойствами, хорошей свариваемостью и способностью к последующему окрашиванию. Детали, требующие высокой степени отделки окрашиванием, выполняют с покрытием.

Электролитическое цинкование используют для широкого ассортимента сталей, к которым предъявляются высокие требования как по пластичности, так и по прочности. Полученное цинковое покрытие имеет хороший, равномерно покрытый внешний вид и не требует последующего окрашивания (усилители дверей, порогов, крыши и т. п.).

Листовая сталь, гальванизированная цинко-никелевым сплавом, имеет противокоррозионную стойкость в *3* раза большую, чем цинковое покрытие, нанесенное электролитическим способом. Данное покрытие может служить в качестве грунтового слоя для деталей кузова, предназначенных для последующего окрашивания. Листовая сталь с двухслойным покрытием, состоящим из гальванического слоя, полученного из раствора цинко-никелевого расплава, скомбинированного с органическим покрытием, обладает повышенной противокоррозионной стойкостью в сравнении с покрытием «цинк – никель».

Сталь, алюминированная методом погружения в горячий алюминиево-кремневый расплав, имеет хорошую теплостойкость, способность отражать тепло и противокоррозионные свойства. Оценка свойств стали с данным покрытием на теплостойкость и коррозионную стойкость показала, что они близки к свойствам нержавеющей стали. Коррозионная стойкость, оцениваемая по коэффициенту образования коррозии при нанесении искусственного конденсата выхлопных газов на глушитель автомобиля, изготовленного из различных материалов, составляет для холоднокатаной листовой стали – *1*; для электролитически оцинкованной листовой стали – *0,928*; для стали с алюминиевым покрытием – *0,301*; для нержавеющей стали – *0,275*. Оценка теплостойкости покрытий по увеличению массы при непрерывном нагревании в атмосфере до температуры *600 ºС* показала, что глушители, изготовленные из холоднокатаной стали, разрушаются за *15* часов, а изготовленные из стали с алюминиевым покрытием – за *4000 ч*. Теплостойкость глушителей из нержавеющей стали еще выше, чем из сталей с алюминированным покрытием. Такие высокие эксплуатационные показатели данного покрытия позволяют использовать его для деталей системы выхлопных газов двигателя: промежуточных и задних труб, наружного и внутреннего кожухов, внутренней трубы и перегородок глушителя.

Листовая сталь с покрытием из свинцово-оловянного сплава имеет хорошую способность к пайке твердым припоем, а также высокие противокоррозионные свойства.

Демпфирующая листовая сталь предназначена для снижения уровня шума, как издаваемого самим автомобилем, так и внутри его салона. Отличная демпфирующая способность объясняется использованием структуры «сэндвич» – между двумя стальными листами находится слой упруговязкой смолы толщиной *40–80 мкм*. Демпфирующий эффект достигается за счет деформации упруговязкой смолы как при работе стальных листов на сдвиг, так и на изгиб или кручение. Вариации выбора исходного материала «сэндвича» создают широкие возможности для получения различных эксплуатационных свойств демпфирующей стали: пластичности, коррозионной стойкости, свариваемости, теплостойкости и т. п. в соответствии с областью использования детали (масляный поддон, капот, внутренние панели кузова, акустические и звукоизоляционные детали и т. п.). Интенсивно разрабатываются новые материалы для применения в автомобилестроении. Решающим фактором для применения алюминия в кузовостроении стала его малая плотность – *2,7 г/см³,* что составляет около трети плотности стали, а также высокая устойчивость против коррозии (благодаря образованию окисного слоя).

Современная техника позволяет применять алюминиевые сплавы для изготовления передней и задней панелей, облицовки дверей и других подобных деталей кузова. Прогресс в технике изготовления материалов сделал возможным использование специальных термообработанных сплавов алюминия в несущих элементах кузова автомобиля. Эти материалы характеризует не только чрезвычайно высокая прочность, но и очень высокая способность к энергопоглощению. Несмотря на неоспоримые преимущества сплавов из алюминия не следует, однако, упускать из виду, что алюминий является «материалом высокой технологии», и работа с ним связана с повышенными технологическими требованиями.

В настоящее время содержание алюминия в европейских автомобилях составляет *130 кг* (порядка *10–11%* от общего веса). У некоторых марок автомобиля еще больше: Audi A2 – *258 кг*; Audi A8 – *546 кг*; Renault Laguna – *160 кг* и т. д.; в новых моделях автомобилей содержание алюминия доходит до 20% от общего веса.

В США создан автомобильный алюминиевый альянс, открыты центры, в которых совместно работают специалисты в области алюминиевого производства и конструкторы автомобилей.

7.3. Новые материалы для изготовления кузова автомобиля

Потенциал снижения массы автомобиля заменой стали и алюминия деформируемыми магниевыми сплавами зависит прежде всего от их плотности, модуля упругости, предела текучести. Магний легче стали на *75%*, а алюминия – на *35%*. Причиной незначительного использования магниевых сплавов

в автостроении является высокая стоимость и недостаточный опыт в технологии изготовления заготовок и конечных изделий.

В настоящее время в Германии реализуется программа «Магний в автостроении», которая охватывает комплекс научно-исследовательских работ, направленных на разработку перспективных технологий изготовления деталей автомобиля из магниевых сплавов марок *AZ31* и *AZ80*. В работе по этой программе участвуют ряд фирм и компаний, а также Высший технический университет в Котбусе (Германия). Исследования показали, что при прокате и вытяжке заготовок из листового материала следует очень точно выдерживать температурный режим; выявлено резкое увеличение пластичности сплава *AZ31* при температуре *225 ºC*. Разработана и создана пилотная установка для получения листового материала из литых заготовок с подогреваемыми валками, которые поддерживают необходимый температурный режим при обработке магниевых сплавов давлением. Установка позволяет получать лист толщиной от *1,0* до *1,5 мм* при ширине до *600 мм* и длине *1000 мм*. После прокатки лист подвергается струйной очистке от остатков смазочных материалов, которая исключает упрочнение его поверхностного слоя. Напротив, при необходимости можно получить упрочнение материала в определенных узлах его поверхности подбором режима струйной обработки и рабочей жидкости.

Одной из вероятных областей применения деформируемых магниевых сплавов в автостроении является изготовление из них несущих деталей кузова. Однако при этом необходимо определить способы соединения этих деталей между собой и с деталями из других материалов. В связи с этим были проведены специальные исследования таких способов соединения, как лазерная сварка и пайка, а также соединения посредством заклепок и винтов. При применении двухсторонней лазерной сварки были получены гладкие швы без провалов, отличающиеся высокой плотностью. Прочность материала в зоне шва только на *7%* меньше, чем у основного материала деталей.

Другим принципиально новым для отечественной автомобильной промышленности техническим решением в конструкции кузова является применение листовых сварных заготовок для штамповки деталей кузова (дверей автомобиля с внедренными панелями из листовых сварных заготовок). Это повышает жесткость дверей без увеличения массы, а также сокращает расход материала и снижает их себестоимость в сборе.

В перспективных моделях планируется увеличить применение горячеоцинкованного проката, имеющего защиту с двух сторон, как для нелицевых, так и для лицевых деталей кузова с целью предупреждения косметической коррозии, а также использования алюминиевых сплавов для кузовов и широкой номенклатуры силовых элементов и пространственных конструкций.

Среди различных современных материалов широко используются в кузовах автомобилей высокопрочные *1F*-стали (стали без свободных атомов внедрения) – сверхнизкоуглеродистые материалы с пределом текучести, равным *340 МПа*, высокопрочные марки сталей с *TRIP*-эффектом (с фазовым

превращением остаточного аустенита в бейнит, а также сталей с пределом текучести *780–980 МПа* (двухфазные стали с микроструктурой мартенситных островков от 5 до 30% объема в ферритной основе).

Контрольные вопросы

1. Требования, предъявляемые к кузовным материалам.
2. Какую роль играет алюминий в кузовных материалах?
3. Какую роль играют хром, цинк при антикоррозионных покрытиях листового материала?
4. В чем сущность гальванического покрытия?
5. В чем сущность горячеоцинкованного проката?
6. Достоинства микролегированных сталей.
7. Сущность комбинированного кузова.
8. Что собой представляет демпфирующая листовая сталь?

8. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

8.1. Общие сведения о композиционных материалах

Композиционные материалы (композиты) состоят из химически разнородных компонентов, нерастворимых друг в друге и связанных между собой в результате адгезии. Основой композитов является пластическая матрица, которая связывает наполнители, определяет форму изделия, его монолитность, теплофизические, электро- и радиотехнические свойства, герметичность, химическую стойкость, а также распределение напряжений между наполнителями.

В качестве матрицы применяют металлы (алюминий, магний, их сплавы), полимеры (эпоксидные, фенолформальдегидные смолы, полиамиды), керамические, углеродные материалы.

Для композитов характерны высокая прочность, жесткость и вязкость, а также коррозионная стойкость, жаропрочность и термическая стабильность.

Композиты с полимерными матрицами используют в автомобиле-, авиа-, судостроении (детали шасси, кузовов, трансмиссионные валы вертолетов, гребные винты, лопатки компрессоров), для деталей химической аппаратуры и криогенной техники (трубы, емкости для реактивов), для вычислительных машин.

Композиционные материалы представляют собой металлические и неметаллические матрицы (основы) с заданным распределением в них упрочнителей (волокон, дисперсных частиц и др.); при этом эффективно используются индивидуальные свойства составляющих композиции.

Композиционные материалы позволяют иметь заданное сочетание разнородных свойств: высокой удельной прочности и жесткости, жаропрочности, износостойкости, теплозащитных свойств и др. Спектр свойств композиционных материалов невозможно получить при использовании обычных материалов. Их применение дает возможность создавать ранее недоступные, принципиально новые конструкции.

Благодаря композиционным материалам стал возможен новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, уменьшении массы машин и конструкций и повышении весовой эффективности транспортных средств и авиационно-космических аппаратов.

Матрица придает требуемую форму изделию, влияет на создание свойств композиционного материала, защищает арматуру от механических повреждений и других воздействий среды.

В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, полимеры органические и неорганические, керамические, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и её эксплуатационные свойства: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Армирующие или упрочняющие компоненты равномерно распределены в матрице. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Вместо термина «армирующий компонент» можно использовать термин «наполнитель».

Преимущества композиционных материалов:

- высокая удельная прочность;
- высокая жёсткость (модуль упругости *130–140 ГПа*);
- высокая износостойкость;
- высокая усталостная прочность;
- из композиционных материалов возможно изготовить размеростабильные конструкции.

Причём разные классы композитов могут обладать одним или несколькими преимуществами. Некоторых преимуществ невозможно добиться одновременно.

Недостатки композиционных материалов:

Большинство классов композитов (но не все) обладают недостатками:

- высокая стоимость;
- анизотропия свойств;
- повышенная наукоёмкость производства, необходимость специального дорогостоящего оборудования и сырья, а следовательно, развитого промышленного производства и научной базы страны.

8.2. Классификация композиционных материалов

Композиционные материалы классифицируют по геометрии наполнителя, расположению его в матрице, природе компонентов.

По геометрии наполнителя композиционные материалы подразделяются на три группы:

- с нуль-мерными наполнителями, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок;
- с одномерными наполнителями, один из размеров которых значительно превышает два других;
- с двухмерными наполнителями, два размера которых значительно превышают третий.

По схеме расположения наполнителей выделяют три группы композиционных материалов:

- с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;
- с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;
- с трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его расположении.

По природе компонентов композиционные материалы разделяются на четыре группы:

- композиционные материалы, содержащие компонент из металлов или сплавов;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неорганических соединений оксидов, карбидов, нитридов и др.;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неметаллических элементов, углерода, бора и др.;
- композиционные материалы, содержащие компонент из органических соединений эпоксидных, полиэфирных, фенольных и др.

Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и от прочности связи между ними. Максимальная прочность достигается, если между матрицей и арматурой происходит образование твердых растворов или химических соединений.

В композиционных материалах с нуль-мерным наполнителем наибольшее распространение получила металлическая матрица. Композиции на металлической основе упрочняются равномерно распределенными дисперсными частицами различной дисперсности. Такие материалы отличаются изотропностью свойств.

В таких материалах матрица воспринимает всю нагрузку, а дисперсные частицы наполнителя препятствуют развитию пластической деформации. Эффективное упрочнение достигается при содержании *5–10%* частиц наполнителя.

В композиционных материалах с одномерными наполнителями упрочнителями являются одномерные элементы в форме нитевидных кристаллов, волокон, проволоки, которые скрепляются матрицей в единый монолит. Важно, чтобы прочные волокна были равномерно распределены в пластичной матрице. Для армирования композиционных материалов используют непрерывные дискретные волокна с размерами в поперечном сечении от долей до сотен микрометров.

Материалы, армированные нитевидными монокристаллами, были созданы в начале *70-х* годов для авиационных и космических конструкций. Основным способом выращивания нитевидных кристаллов является выращивание их из перенасыщенного пара (*ПК*-процесс). Для производства особо высокопрочных нитевидных кристаллов оксидов и других соединений осуществляется рост по *П–Ж–К* механизму (пар–жидкость–кристалл), направленный рост кристаллов происходит из парообразного состояния через промежуточную жидкую фазу.

Осуществляется создание нитевидных кристаллов вытягиванием жидкости через фильеры. Прочность кристаллов зависит от сечения и гладкости поверхности.

Композиционные материалы этого типа перспективны как высокожаропрочные материалы. Для увеличения *КПД* тепловых машин лопатки газовых турбин изготавливают из никелевых сплавов, армированных нитями сапфира

(Al_2O_3), это позволяет значительно повысить температуру на входе в турбину (предел прочности сапфировых кристаллов при температуре *1680 ºС* выше *700 МПа*).

Армированные нити оксида алюминия (Al_2O_3) получают прессованием алюминиевой пудры с последующим спеканием (*САП* – спеченная алюминиевая пудра). Преимущества *САП* проявляются при температурах выше *300 ºС*, когда алюминиевые сплавы разупрочняются. Дисперсионно упрочненные сплавы сохраняют эффект упрочнения до температуры $0{,}8\ T_{пл}$.

Сплавы *САП* удовлетворительно деформируются, легко обрабатываются резанием, свариваются аргонодуговой и контактной сваркой. Из *САП* выпускают полуфабрикаты в виде листов, профилей, труб, фольги. Из них изготавливают лопатки компрессоров, вентиляторов и турбин, поршневые штоки.

Применяют дисперсные частицы тугоплавких фаз типа Al_2O_3, SiO_2, *BN*, *SiC*, имеющие малую плотность и высокий модуль упругости. Композиционные материалы обычно получают методом порошковой металлургии, важным преимуществом которого является изотропность свойств в различных направлениях.

Марки *САП*, применяемые в России, содержат *6–23%* Al_2O_3. Различают *САП-1* с содержанием *6–9, САП-2 – с 9–13, САП-3 –* с *13–18%* Al_2O_3. С увеличением объемной концентрации оксида алюминия возрастает прочность композиционных материалов. При комнатной температуре характеристики прочности *САП-1* таковы: $\sigma_в$*=280 МПа*, $\sigma_{0,2}$*=220 МПа*; *САП-3* таковы: $\sigma_в$*=420 МПа,* $\sigma_{0,2}$*=340 МПа*.

Армирование пропиточного полимера стеклотекстолитов нитевидными волокнами увеличивает их прочность. Армирование литого металла снижает его хрупкость в конструкциях. Перспективно упрочнение стекла неориентированными нитевидными кристаллами.

Для армирования композиционных материалов применяют металлическую проволоку из разных металлов: стали разного состава, вольфрама, ниобия, титана, магния – в зависимости от условий работы. Стальная проволока перерабатывается в тканые сетки, которые используются для получения композиционных материалов с ориентацией арматуры в двух направлениях.

Для армирования легких металлов применяются волокна бора, карбида кремния. Особенно ценными свойствами обладают углеродистые волокна, их применяют для армирования металлических, керамических и полимерных композиционных материалов.

Эвтектические композиционные материалы – сплавы эвтектического или близкого к эвтектическому состава, в которых упрочняющей фазой выступают ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации. В отличие от обычных композиционных материалов, эвтектические получают за одну операцию. Направленная ориентированная структура может быть получена на уже готовых изделиях. Форма образующихся кристаллов может быть в виде волокон или пластин. Способами направленной кристаллизации получают композиционные материалы на ос-

нове алюминия, магния, меди, кобальта, титана, ниобия и других элементов, поэтому они используются в широком интервале температур.

8.3. Применение композиционных материалов

Области применения композиционных материалов не ограничены. Они применяются в авиации для высоконагруженных деталей самолетов (обшивки, лонжеронов, нервюр, панелей и т. д.) и двигателей (лопаток компрессора и турбины и т. д.), в космической технике для узлов силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву, для элементов жесткости, панелей, в автомобилестроении для облегчения кузовов, рессор, рам, панелей кузовов, бамперов и т. д., в горной промышленности (буровой инструмент, детали комбайнов и т. д.), в гражданском строительстве (пролеты мостов, элементы сборных конструкций высотных сооружений и т. д.), в металлургической промышленности – в качестве огнеупорных материалов для футеровки печей, кожухов и другой арматуры печей, наконечников термопар; в строительстве – для пролётов мостов, опор мостовых ферм, панелей для высотных сборных сооружений и др.; в химической промышленности – для автоклавов, цистерн, аппаратов сернокислотного производства, ёмкостей для хранения и перевозки нефтепродуктов и др.; в текстильной промышленности – для деталей прядильных машин, ткацких станков и др.; в сельскохозяйственном машиностроении – для режущих частей плугов, дисковых косилок, деталей тракторов и др.; в бытовой технике – для деталей стиральных машин, рам гоночных велосипедов, деталей радиоаппаратуры и в других областях народного хозяйства.

Применение композиционных материалов обеспечивает новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, энергетических и транспортных установок, в уменьшении массы машин и приборов.

Технология получения полуфабрикатов и изделий из композиционных материалов достаточно хорошо отработана.

Композиционные материалы с неметаллической матрицей, а именно полимерные карбоволокниты используют в судо- и автомобилестроении (кузова гоночных машин, шасси, гребные винты); из них изготовляют подшипники, панели отопления, спортивный инвентарь, части *ЭВМ*. Высокомодульные карбоволокниты применяют для изготовления деталей авиационной техники, аппаратуры для химической промышленности, в рентгеновском оборудовании и другом.

Карбоволокниты с углеродной матрицей заменяют различные типы графитов. Они применяются для тепловой защиты, дисков авиационных тормозов, химически стойкой аппаратуры.

8.4. Гибридные композиционные материалы

К классу гибридных композиционных материалов относятся полиматричные и полиармированные композиционные материалы. В зависимости от распределения компонентов гибридные композиционные материалы подразделяют на следующие виды:

– однородные – с равномерным распределением каждого компонента по объему композиционных материалов;

– с линейной неоднородностью – волокна одного или обоих армирующих компонентов объединены в жгуты, равномерно объединены по объему композиционных материалов;

– с плоскостной неоднородностью – волокна каждого компонента образуют чередующиеся слои;

– макронеоднородные – волокна различных компонентов образуют зоны, соизмеримые с размером изделия.

К наиболее технологичным относятся гибридные композиционные материалы с плоскостной неоднородностью и макронеоднородные. Возникающие при их изготовлении термические напряжения можно устранить или свести к минимуму оптимальным подбором состава компонентов как матриц, так и наполнителей, что приводит к значительному повышению технологических и эксплуатационных свойств гибридных композиционных материалов по сравнению с двухкомпонентными материалами. Например, коэффициент линейного расширения стекло- и углеволокнитов значительно изменяется с увеличением температуры, в то время как у стекловолокнитов и органоволокнитов он остается постоянным в широком интервале температур. Применение стеклянного и углеродных волокон в гибридных композиционных материалах позволяет повысить модуль упругости за счет увеличения объемного содержания углеродного наполнителя. К новому поколению гибридных композиционных материалов относятся алюмополимерные композиционные материалы, состоящие из чередующихся склеенных тонких листов (*0,3–0,8 мм*) алюминиевых деформированных сплавов и прослоек полимера (*0,2–0,5 мм*), армированных стеклянным или органическим волокном. Типичная структура алюмополимерного композиционного материала состоит из двух слоев алюминиевого сплава и прослойки армированного полимера (*2:1*) или из трех слоев алюминиевого сплава, разделенных прослойками стекло- или органоволокнитов (*3:2*).

При этом слои алюминиевого сплава всегда расположены на поверхности композиционных материалов.

По сравнению с обычными алюминиевыми сплавами эти материалы отличаются пониженной плотностью (на *15–20%),* повышенными прочностными и усталостными характеристиками. Скорость развития усталостной трещины у них на порядок ниже, чем у соответствующих алюминиевых сплавов. Кроме того, они имеют высокие акустические и демпфирующие свойства.

Контрольные вопросы и задания

1. Что называют композиционным материалом?
2. Какова структура композиционных материалов?
3. Какие существуют упрочнители?
4. Как классифицируются композиционные материалы?
5. Назовите основные области применения композиционных материалов.
6. Строение и свойства гибридного алюмополимерного композиционного материала.
7. Особенности композиционных материалов с нуль-мерными упрочнителями.

9. УПРОЧНЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

9.1. Дисперсно-упрочненные и волокнистые композиционные материалы

В дисперсно-упрочненных композиционных материалах наполнителями служат дисперсные частицы тугоплавких фаз-оксидов, баридов, карбидов (Al_2O_3 ,SiO_2, *BN, SiC* и др.). К достоинствам тугоплавких соединений относятся высокое значение модуля упругости, низкая плотность, пассивность к взаимодействию с материалами матриц, а таких как окислы алюминия и кремния – большая распространенность в природе и невысокая стоимость образующих их элементов.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы в основном получают порошковой технологией, но существуют и другие способы, например, метод непосредственного введения наполнителей в жидкий металл или сплав перед разливкой. В последнем случае для очистки от жировых и других загрязнений, улучшения смачиваемости частиц жидким металлом и равномерного распределения их в матрице применяют ультразвуковую обработку жидкого расплава.

В дисперсно-упрочненных композиционных материалах основную нагрузку воспринимает матрица, а дисперсные частицы упрочнителя оказывают сопротивление движению дислокаций при нагружении металла, мешают развитию пластической деформации. Чем больше это сопротивление, тем выше прочность. Прочность зависит также от дислокационной структуры, формирующейся в процессе пластической деформации при изготовлении изделий из композиционных материалов. Кроме того, дисперсные частицы наполнителя оказывают «косвенное» упрочняющее действие, способствующее образованию структуры с большей степенью неравномерности зерен (волокнистой). Такая структура формируется при сочетании пластической деформации и отжигов. При этом дисперсное включение частично или полностью препятствует рекристаллизационным процессам.

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:

$$\sigma = \frac{Gb}{l},$$

где G – модуль сдвига;

b – межатомное расстояние;

l – расстояние между частицами.

Большее 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 композиционных материалов по сравнению с волокнистыми – изотропность свойств. К дисперсно-упрочнен-

ным композиционным материалам на алюминиевой основе, нашедшим промышленное применение, относится материал из спеченной алюминиевой пудры (*САП*). Материал *САП* характеризуется высокой прочностью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и термической стабильностью свойств.

САП состоит из алюминия и его оксида. Получают *САП* путем последовательного брикетирования, спекания и прессования. 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 используется 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 разлома: чем продолжительнее время разлома, 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 четырех марок и соответствующих им марок *САП* (таблица 9.1).

Таблица 9.1 – Механические свойства *САП*

Материал	Содержание $Al_2O_{3,\ \%}$	σ_b, *Мпа*	$\frac{\sigma_b}{pd}$, *км*	$\sigma_{0,2}$, *Мпа*	δ, *%*	*Е, ГПа*	$\frac{E}{pd}\cdot 10^{-3}$
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 равномерными дисперсными включениями *Al_2O_3*. С увеличением содержания *Al_2O_3* повышается прочность (рисунок 9.1). Высокая прочность *САП* объясняется большой дисперсностью оксидной фазы, малым расстоянием между её частицами. Нерастворимость в алюминии и отсутствие склонности к коагуляции тонкодисперсных частиц *Al_2O_3* обеспечивает стабильность структуры и высокую прочность при температуре до *500 ºС*.

САП хорошо деформируется в горячем состоянии, хуже – в холодном, легко обрабатывается резанием и удовлетворительно сваривается контактной и 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.

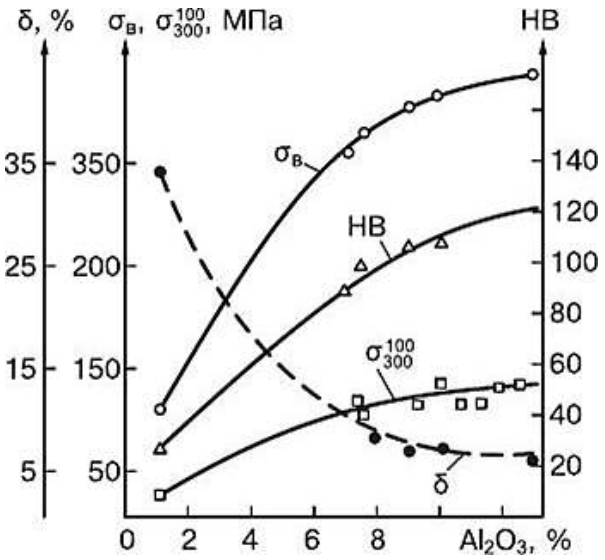


Рисунок 9.1 – Зависимость механических свойств *САП* от содержания Al_2O_3

САП используют для деталей, работающих при *300–500 ºС*, от которых требуются высокая удельная прочность и коррозионная стойкость (поршневые штоки, лопатки компрессоров, лопатки вентиляторов и турбин, конденсаторы, обмотки трансформаторов и т. д.).

Спеченные алюминиевые сплавы (*САС*) изготавливают в основном по той же технологии, что и *САП* – из порошков, полученных распылением сплавов заданных составов. Практическое значение имеют сплавы с низким температурным коэффициентом линейного расширения, близким к коэффициенту линейного расширения стали, и высоким модулем упругости. Так, *САС*, содержащий *25–30% Si*, *5–7% Ni*, остальное *Al*, имеет:

$$A=(14{,}5–15{,}5)\cdot 10^{-6}\ K^{-1};\ E=100\ ГПа.$$

Эти сплавы заменяют более тяжелые стали при изготовлении отдельных деталей. Механические свойства *САС* характеризуются достаточно высокой прочностью, твердостью (σ_b*=260 МПа, 120НВ*) и низкой пластичностью (δ*=1,5–1%*). Преимущества спекаемых алюминиевых сплавов по сравнению с обычными аналогичного состава – отсутствие линейных дефектов (ликвации, шлаковых включений и т. д.) и мелкозернистая структура с равномерным распределением фаз.

Высокими механическими свойствами при комнатной и повышенной температурах обладают композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов, упрочненные частицами карбида алюминия $A_{14}C_3$. Их получают методом механического легирования углеродом порошка алюминия с последующим компактированием, прессованием и прокаткой. В процессе нагрева алюминий образует с углеродом карбид $A_{14}C_3$. Композиционные материалы $Al–A_{14}C_3$ имеют σ_b*=450–500 МПа*, $\sigma_{0,2}$*=430–470 МПа*, δ*=4%*. По длительной

прочности ($\sigma_{100}^{500} = 60 МПа$) он превосходит все стандартные алюминиевые сплавы.

К перспективным относятся композиционные материалы с малой плотностью на основе бериллия и магния: *Be−BeO, Be−Be_2C* и *Mg−MgO*. Однако они не нашли большого применения из-за технологических сложностей и низкой коррозионной стойкости.

В качестве матриц жаропрочных композиционных материалов используют никель, кобальт и их сплавы. Композиционные материалы с кобальтовой матрицей, обладая незначительным преимуществом перед никелевым композиционным материалом в жаропрочности, нашли ограниченное применение из-за высокой стоимости.

Существуют дисперсно-упрочненные композиционные материалы на никелевой основе.

В качестве матрицы в этих материалах используют никель и его сплавы с хромом *(~20%*) со структурой твердых растворов. Сплавы с хромоникелевой 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% HfO_2* (σ_b*=750–850 МПа*, $\frac{\sigma_b}{pd}$ = 9–10 *км*, δ*=8–12%*). Легирование никелевой матрицы *W, Ti, Al*, обладающими переменной растворимостью в никеле, дополнительно упрочняет материалы в результате дисперсионного отвердения 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 охлаждения) порошком никеля, содержащим дисперсный оксид гафния или другого элемента.

После холодного прессования смеси порошков проводят горячую экструзию брикетов.

В волокнистых композиционных материалах упрочнителями служат волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (*B, C, Al_2O_3, SiC* и др.), а также проволока из металлов и сплавов (*Mo, W, Be*, высокопрочная сталь и др.). Для армирования композиционных материалов используют непрерывные дискретные волокна диаметром от долей до сотен микрометров.

При упрочнении волокнами конечной длины нагрузка на них передается через матрицу с помощью касательных напряжений. В условиях прочного (без проскальзывания) соединения волокна с матрицей нагрузка на волокна при растяжении равна:

$$\tau \cdot \pi \cdot d \cdot l,$$

где τ – касательное напряжение, возникающее в матрице в месте контакта с волокном;

d – диаметр волокна;

l – длина волокна.

С увеличением длины волокна повышается возникающее в нем напряжение. При определенной длине, называемой критической, напряжение достигает максимального значения. Оно не меняется при дальнейшем увеличении длины волокна. Определяют $l_{кр}$ из равенства усилий в матрице на границе с волокном и в волокне с учетом симметричного распределения в нем напряжений:

$$\tau\pi d/2=\sigma_B\pi d^2/4;$$
$$l_{кр}=\sigma_B d/(2\tau),$$

или

$$l_{кр}/d=\sigma_B/(2\tau).$$

Теоретические расчеты, подтвержденные практикой, показывают, что чем тоньше и длиннее волокно, а точнее, чем больше отношение длины к диаметру, тем выше степень упрочнения ($\sigma_{B\ КМ}/\sigma_{B.B}$) композиционных материалов (рисунок 9.2).

В качестве матриц металлических композиционных материалов используют металлы: алюминий, магний и титан, жаропрочный никель и сплавы на их основе; для неметаллических композиционных материалов – полимерные, углеродистые, керамические материалы.

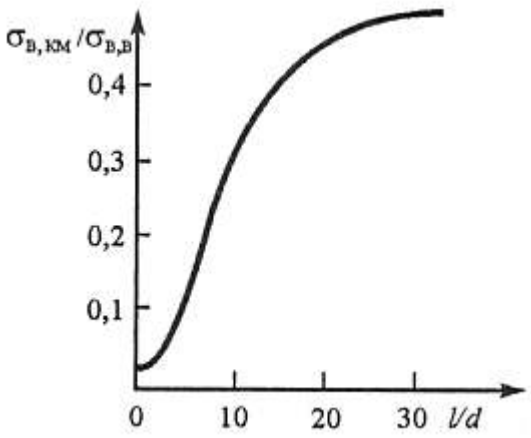


Рисунок 9.2 – Теоретическая зависимость эффективного упрочнения композиционных материалов от соотношения *l/d* упрочнителя

Свойства волокнистых композиционных материалов в большей степени зависят от схемы армирования (рисунок 9.3). Ввиду значительного различия в свойствах волокон и матрицы при одноосном армировании физическим и механическим свойствам композиционных материалов присуща анизотропия. При растяжении временное сопротивление и модуль упругости композиционных материалов достигают наибольших значений в направлении расположения волокон, наименьших – в поперечном направлении. Например композиционные материалы с матрицей из технического *АД1*, упрочненного волокнами бора, в направлении волокон имеет σ_B*=1000–1200 МПа,* а в поперечном направлении – всего *60–90 МПа*. Анизотропия свойств не наблюдается при двухосном армировании с взаимно перпендикулярным расположени-

ем упрочняющих волокон (рисунок 8.3). Однако по сравнению с одноосным армированием прочность вдоль оси волокон уменьшается почти в *3* раза – с *1000* до *350 МПа* (рисунок 9.4).

Остаются низкими характеристики при сжатии и сдвиге. При растяжении материала вдоль волокон нагрузки в основном воспринимают высокопрочные волокна, а матрица служит средой для передачи усилий.

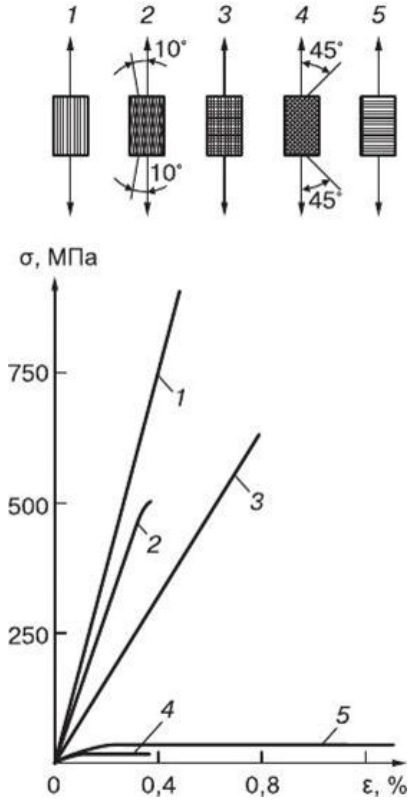


Рисунок 9.3 – Схемы армирования (*1–5*) композиционных материалов и их влияние на напряжения при растяжении эпоксидных углепластиков

Нагрузки, воспринимаемые волокнами (*Рв*) и матрицей (*РМ*), выражаются через возникающие в них напряжения σ_B и σ_M следующим образом:

$$P_B/P_м = \sigma_B V_B/[\sigma_M(1-V_B)],$$

где V_B – объем волокна.

Согласно закону Гука, напряжения можно выразить через модули упругости. Тогда

$$P_B/P_м = E_B\xi_B V_B/[E_M\xi_M (1-V_B)].$$

При условии прочного (без проскальзывания) соединения волокон с матрицей в момент приложения нагрузки в них возникает одинаковая деформация, т. е. $\xi_B = \xi_M$. Следовательно,

$$P_B/P_м = E_B Y_B/[E_M(1-V_B),$$

т. е. чем выше модуль упругости волокон *Ев* и больше их объем, тем в большей степени они воспринимают приложенную нагрузку.

Объемная доля упрочнителя колеблется в широких пределах – от нескольких единиц до *80–90%*. При этом композиционные материалы с ориен-

тированными непрерывными волокнами содержат их, как правило, в количестве *60–70%.* Содержание хаотически расположенных дискретных волокон и нитевидных кристаллов ограничивается *20–30%,* поскольку различие в их длине и диаметре создает технологические трудности в получении плотноупакованных материалов.

Модуль упругости композиционных материалов сравнительно достоверно подсчитывают, исходя из свойств и объемного содержания волокон и матрицы:

$$E_{КМ} = E_в V_в + E_М(1 - V_в).$$

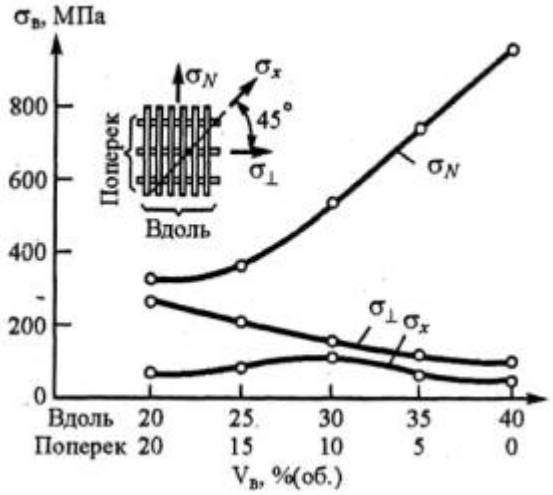


Рисунок 9.4 – Зависимость временного сопротивления композиционных материалов *ВКА-1* от содержания и ориентации волокон

Например, модуль упругости упрочненных материалов с алюминиевой матрицей (*Е=70 МПа*), упрочненного *50%* волокон бора (*Е=420 МПа*), равен *70·0,5+420·0,5 = 245 ГПа*, что хорошо согласуется с модулем упругости реального *КМ ВКА–1* (*Е = 240 ГПа*, таблица 9.2).

Временное сопротивление композиционных материалов изменяется в зависимости от объемного содержания наполнителя также по закону аддитивности (рисунок 9.5). Исключение составляют материалы с очень малым *(<5%*) или очень большим *(> 80%*) содержанием волокна.

Временное сопротивление композиционных материалов подсчитывают по формуле

$$\sigma_{В.КМ} = \sigma_{В.В} V_В + \sigma_{В.М}(1 - V_В),$$

где $\sigma_{В.В}$ *и* $\sigma_{В.М}$ – соответственно временное сопротивление волокна и матрицы.

Малые значения прочности и жесткости композиционных материалов в направлении, перпендикулярном расположению волокон, при растяжении объясняются тем, что в этом случае, так же, как и при сжатии и сдвиге, они определяются свойствами матрицы. Большую роль играет матрица в сопротивлении композиционных материалов усталостному разрушению, которое начинается с матрицы.

Таблица 9.2 – Механические свойства одноосноармированных композиционных материалов с металлической матрицей

Композиционные материалы	Матрица	Наполнитель		ρ, $т/м^3$	E, $МПа$	$E/(\rho g)\cdot 10^{-3}$, $км$	$\sigma_в$, $МПа$ (20 °С)	σ–1, $МПа$ (на базе 107 циклов)
		Материал	Количество, %					
ВКА-1	Алюминий	Борное волокно	50	2,65	240	9	1200	600
ВКУ-1	–	Углеродное волокно	30–40	2,2–2,3	270	12	900–1000	200
КАС-1	–	Стальная проволока	40	4,8	120	2	1600	350
ВКМ-3	Магний	Борное волокно	45	2,2	200	9	1250	–

Гетерогенная структура поверхности раздела между волокном и матрицей затрудняет распространение трещины в направлении, перпендикулярном оси волокон. В связи с этим композиционные материалы характеризуются высокими значениями предела выносливости. Так, по пределу выносливости композиционные материалы на алюминиевой основе превосходят лучшие алюминиевые сплавы в *3–4* раза.

При изготовлении деталей из композиционных материалов волокна ориентируют так, чтобы с максимальной выгодой использовать их свойства с учетом действующих в конструкции нагрузок.

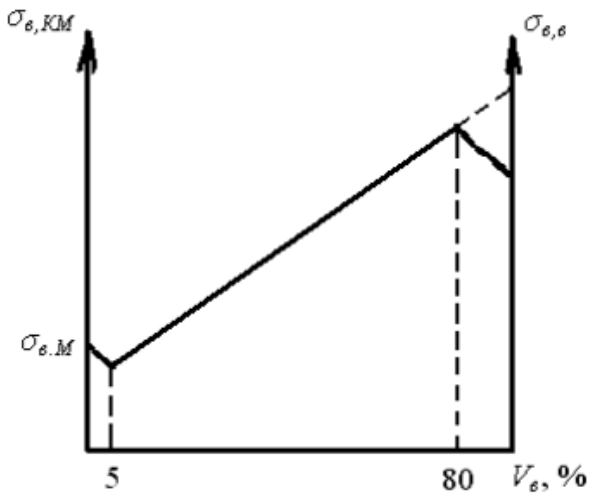


Рисунок 9.5 – Схема изменения прочности волокнистого материала в зависимости от содержания упрочнителя

Прочность композиционных материалов в большей степени зависит от прочности сцепления волокон с матрицей. Между матрицей и наполнителем в композиционных материалах возможны различные типы связи:

1. Механическая связь, возникающая благодаря зацеплению неровностей поверхностей матрицы и наполнителя, а также действию трения между ними. Композиционные материалы с механическим типом связи (например, *Cu–W*) имеют низкую прочность при поперечном растяжении и продольном сжатии.

2. Связь, обеспечиваемая силами поверхностного натяжения при пропитке волокон жидкой матрицей вследствие смачивания и небольшого растворения компонентов (например, *Mg–B* до *400 ºC*).

3. Реакционная связь, обусловленная химическим взаимодействием компонентов (*Ti* и *B*, *Ti* и *SiC)* на границе раздела, в результате чего образуются новые химические соединения (TiB_2, Ti_5Si_3).

4. Обменно-реакционная связь, возникающая при протекании двух и более стадийных химических реакций. Например алюминий из твердого раствора матрицы титанового сплава образует с борным волокном AlB_2, который затем вступает в реакцию с титаном, образуя TiB_2 и твердый раствор алюминия.

5. Оксидная связь, возникающая на границе раздела металлической матрицы и оксидного наполнителя ($Ni–Al_2O_3$) благодаря образованию сложных оксидов типа шпинели и др.

6. Смешанная связь, реализуемая при разрушении оксидных пленок и возникновении химического и диффузионного взаимодействий компонентов (*Al–B*, *Al–сталь*).

Для качественного соединения волокон с матрицей необходимо прежде всего обеспечить хороший контакт (без загрязнений, газовых и других включений) по всей поверхности соединений. Композиционные материалы относятся в основном к термодинамически неравновесным системам, что является главной причиной диффузионных процессов и химических реакций, происходящих на границе раздела между волокном и матрицей. Эти процессы протекают в композиционных материалах при их использовании. Некоторое взаимодействие между компонентами необходимо для обеспечения прочной связи между ними, передачи напряжений.

Для металлических композиционных матириалов прочная связь между волокном и матрицей осуществляется благодаря их взаимодействию и образованию очень тонкого слоя (*1–2 мкм*) интерметаллидных фаз. Если между волокнами и матрицей нет взаимодействия, то на волокна наносят специальные покрытия для его обеспечения, но прослойки, образующиеся при этой фазе, должны быть очень тонкими.

Связь между компонентами в композиционных материалов на неметаллической основе осуществляется с помощью адгезии. Плохой адгезией к матрице обладают высокопрочные борные, углеродные, керамические во-

локна. Улучшение сцепления достигается травлением, поверхностной обработкой волокон, называемой вискеризацией.

Вискеризация – это выращивание монокристаллов карбида кремния на поверхности углеродных, борных и других волокон перпендикулярно их длине. Полученные таким образом «мохнатые» волокна бора называют «борсик». Вискеризация способствует повышению сдвиговых характеристик, модуля упругости и прочности при сжатии без снижения свойств вдоль оси волокна. Так, увеличение объемного содержания нитевидных кристаллов до *4–8%* повышает сдвиговую прочность в *1,5–2* раза, модуль упругости и прочность при сжатии на *40–50%.*

На поверхности соединения компонентов не должно происходить химических реакций, приводящих к повреждению волокон, ухудшению их свойств и свойств композиционных материалов. При сильном взаимодействии компонентов временное сопротивление волокон и композиционных материалов в целом значительно снижается. Например, временное сопротивление волокон карбида кремния в композиционных матириалах с титановой матрицей в результате такого взаимодействия снизилось с *320* до *210 МПа*, что вызвало снижение временного сопротивления композиционных материалов на *30%*. Для уменьшения взаимодействия применяют легирование как матриц, так и волокон, защитные покрытия волокон, низкотемпературные и высокоскоростные способы изготовления композиционных материалов.

Кроме того, прочность сцепления между компонентами зависит от механической совместимости, на которую влияет разница в пластических свойствах, в коэффициентах Пуассона и линейного расширения, модулей упругости. Механическая несовместимость приводит к возникновению остаточных напряжений на границе раздела компонентов, которые при достижении определенного значения вызывают нарушение связи между компонентами.

9.2. Композиционные материалы на металлической основе

Композиционные материалы с металлической матрицей – это класс материалов, состоящих из металлической матрицы, в которую внедрены другие материалы, такие как волокна, частицы или пластики. Металлическая матрица обеспечивает прочность и устойчивость, а внедренные материалы добавляют дополнительные свойства, такие как легкость, жесткость или теплопроводность.

Композиционные материалы с металлической матрицей широко используются в различных отраслях, включая авиацию, автомобильную промышленность, строительство и энергетику. Они обладают высокой прочностью при небольшом весе, что делает их идеальными для создания легких и прочных конструкций.

Примеры композиционных материалов с металлической матрицей включают углепластиковые композиты, гибридные композиты и металлокерамические композиты. Углепластиковые композиты состоят из углеродных волокон, внедренных в металлическую матрицу, и обладают высокой проч-

ностью и жесткостью. Гибридные композиты сочетают различные типы волокон, такие как стекловолокна и углеродные волокна, с металлической матрицей. Металлокерамические композиты состоят из керамических частиц, внедренных в металлическую матрицу, и обладают высокой теплостойкостью и термической устойчивостью.

Из металлических упрочнителей широко применяют стальную проволоку, которая является наиболее дешевым и технологичным упрочнителем. В настоящее время в основном используют проволоку из коррозионно-стойких сталей аустенитного, аустенитно-мартенситного и мартенситного классов. Высокая степень пластической деформации при получении проволоки обуславливает большую пластичность структурных дефектов и высокие прочностные характеристики. Например, проволока из стали *18Х15Н5АМ3* диаметром *0,16–0,3 мм* имеет σ_B=*3500–4000 МПа*. Высокая температура рекристаллизации обеспечивает стальной проволоке сохранение прочности при высокой температуре (до *500 ºС*), особенно из сталей аустенитного класса.

При изготовлении композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированной стальной проволокой, температура не должна превышать *550 ºС* во избежание активного взаимодействия между компонентами. Композиционные материалы получают сваркой взрывом, прокаткой в вакууме, диффузионным спеканием.

Для надежного сцепления компонентов при использовании твердофазных методов необходимо обновление контактных поверхностей, разрушение оксидных пленок.

Более высокой жаропрочностью обладает проволока из тугоплавких металлов (*Mo, W, Ta*). Высокие прочностные свойства такой проволоки сохраняются до *1200–1500 ºС* и поэтому ее применяют для армирования жаропрочных матриц.

Для повышения длительной прочности на поверхность проволоки наносят методом напыления тонкие (*4–12 мкм*) барьерные покрытия, например, из карбидов титана и гафния, оксидов алюминия и гафния. Это увеличивает рабочие температуры и срок службы жаропрочных сплавов. Недостатком напылителя является их высокая плотность.

Малой плотностью и большой удельной прочностью обладает проволока из бериллия. Механические свойства проволоки высоко зависят от качества ее поверхности. Бериллиевую проволоку получают выдавливанием из литой или порошковой заготовки, заключенной в оболочку. Лучшим материалом оболочки является никель. После волочения оболочку с проволоки удаляют и для улучшения поверхности проволоку подвергают электрохимическому полированию. При волочении проволоки, предназначенной для получения композиционных материалов в качестве оболочки, используют материал матрицы, и в этом случае отпадают операции правки и полирования. Ценным свойством сильнодеформируемой бериллиевой проволоки является высокая температура рекристаллизации (*700 ºС*). Бериллиевую проволоку целесообразно

применять для армирования матриц, обладающих малой плотностью, т. е. на алюминиевой, титановой или магниевой основах.

Для армирования металлических и полимерных матриц широко используют борные волокна. Они характеризуются высокой прочностью, твердостью, малой склонностью к разрушению при повышении температуры. Борные волокна получают разложением хлорида и бромида бора в среде водорода по реакции

$$2BCl_3 + 3H_2 \rightarrow 2B + 6HCl$$

с последующим осаждением бора из газовой среды на горячей вольфрамовой нити (*d=12 мкм*). В результате взаимодействия бора с вольфрамом сердцевина борных волокон состоит из боридов вольфрама различного состава: WB, W_2B_5, WB_5. При продолжительном нагреве сохраняется в основном WB_4. Волокна бора имеют ромбическую кристаллическую решетку и диаметр *d=70–200 мкм*.

Прочность сердцевины значительно ниже прочности волокна в целом. В сердцевине возникают напряжения растяжения. Это приводит к появлению остаточных напряжений и возникновению радиальных трещин. При небольшой плотности волокна бора обладают высокой прочностью и жесткостью. Высокая прочность борных волокон объясняется мелкокристаллической структурой. Большое влияние на прочность оказывает и структура их поверхности. Поверхность имеет ячеистое строение, напоминающее по внешнему виду початок кукурузы. Наличие крупных зерен на поверхности, а также включений, трещин, пустот снижают прочность борных волокон. При температуре выше *400 ºС* борные волокна окисляются, а выше *500 ºС* вступают в химическое взаимодействие с алюминиевой матрицей. Для повышения жаростойкости и предохранения от взаимодействия с матрицей на борные волокна наносят покрытия из карбида кремния, карбида и нитрида бора толщиной *3–5 мкм*.

В настоящее время наряду с чисто борными волокнами выпускают волокна бора, оплетенные стекловолокном. Такие комбинированные волокна обладают более высокой устойчивостью. Основной недостаток борных волокон – высокая стоимость, которую можно снизить путем увеличения диаметра, а также заменой вольфрамовой основы на углеродную.

Высокими прочностью, удельной прочностью и термической стабильностью механических свойств отличаются высокомодульные углеродные волокна. Их получают путем высокотемпературной термической обработки в инертной среде из синтетических и органических волокон.

В зависимости от вида исходного продукта углеродные волокна могут быть в виде нитей, жгута, тканых материалов, лент, войлока. Наиболее широко для производства углеродных волокон используют вискозу, полиакрил натрия (*ПАН*).

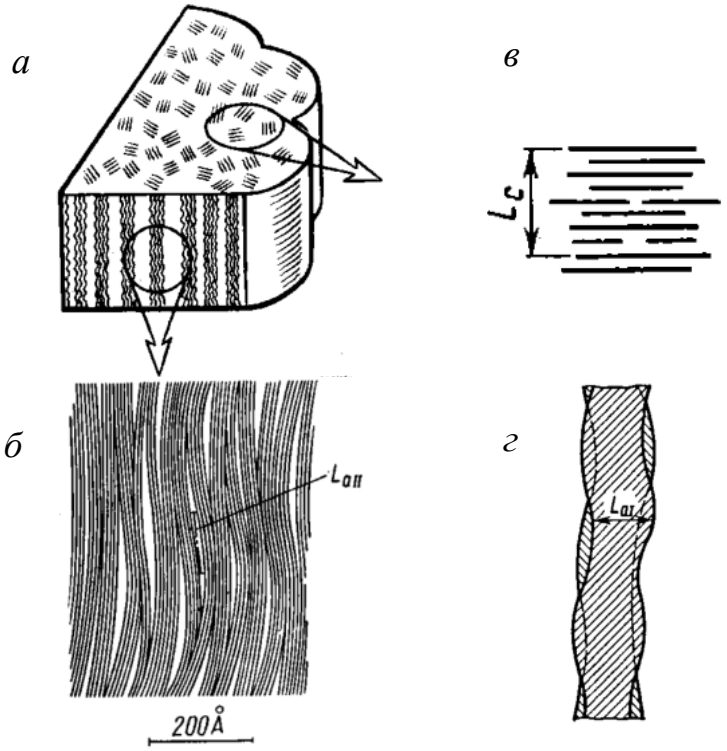
При нагреве синтетическое волокно разлагается с образованием лентообразных слоев углерода с гексагональной структурой, называемых микрофибриллами (рисунок 9.6 *а–в)*. Группы одинаково ориентированных микро-

фибрилл, разделенных узкими порами, образуют фибриллы. Поперечные размеры фибрилл лежат в широких пределах. Каждое углеродное волокно состоит из тысяч фибрилл. Структура углеродного волокна, в частности, взаимное расположение фибрилл и степень их ориентации зависят от исходного сырья: состава макромолекул, степени вытяжки волокон, технологии их получения и др. В связи с этим углеродные волокна, полученные из разных синтетических волокон, имеют различные свойства и даже различный характер соотношения между прочностью и жесткостью (рисунок 9.6).

Структура и свойства углеродных волокон в большей степени зависят также от температуры термической обработки синтетических волокон (рисунок 9.8). Кроме того, прочность углеродных волокон сильно зависит от наличия таких дефектов, как пустоты, трещины. Она значительно снижается, если размеры дефектов превышают *0,05 мкм*. При нагреве выше *450 °С* на воздухе углеродные волокна окисляются, в восстановительной и нейтральной среде сохраняют свои механические свойства до *2200 °С*.

К другим достоинствам углеродных волокон относятся высокая теплопроводность, электрическая проводимость, коррозионная стойкость, стойкость к тепловым ударам, низкие коэффициенты трения и линейного расширения; к недостаткам относится плохая смачиваемость расплавленными материалами, используемыми в качестве матриц. Для улучшения смачиваемости и уменьшения химического взаимодействия с матрицей на углеродные волокна наносят покрытия.

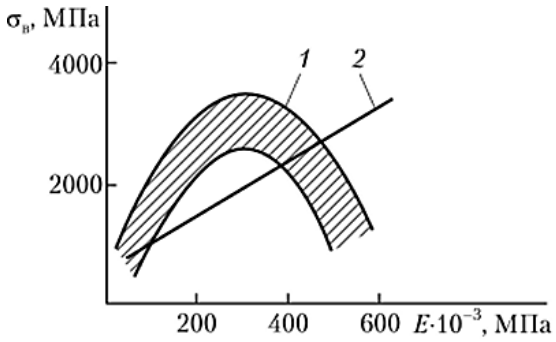
Хорошие результаты в контакте с алюминиевой матрицей показывают покрытия из боридов титана и циркония.



а – общий вид; *б* – продольное сечение фибриллы; *в* – поперечное сечение микрофибриллы; *la* и *lc* – поперечные размеры микрофибрилл

Рисунок 9.6 – Строение углеродных волокон (схема)

Керамические волокна оксидов, нитридов, карбидов характеризуются высокими твердостью, прочностью, модулем упругости, относительно небольшой плотностью и высокой термической стабильностью.



1 – ПАН; *2* – вискоза

Рисунок 9.7 – Связь между временным сопротивлением и модулем упругости углеродных волокон при различном исходном сырье

Из таблицы 9.3 видно, что особо высокие прочность и жесткость присущи нитевидным монокристаллам («усам»). Высокая прочность объясняется совершенством их структуры, для которой характерна очень малая плотность дислокаций. Доказано, что скручивание усов в процессе образования монокристаллов Al_2O_3 и SiO_2 вызвано наличием в них единственной винтовой дислокации, расположенной вдоль оси роста кристаллов.

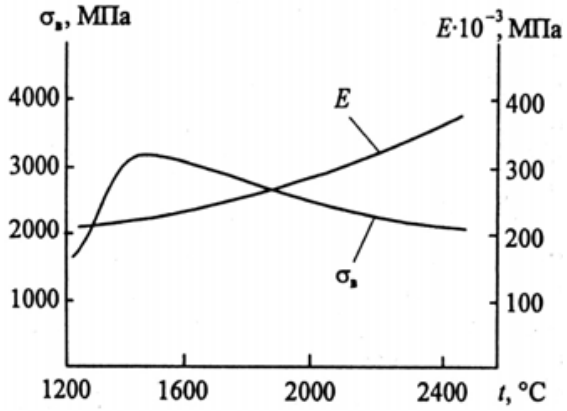


Рисунок 9.8 – Влияние температуры графитизации на свойства углеродного волокна

Стекловолокно характеризуется сочетанием высокой прочности (σ_B=*3000–5000 МПа*), теплостойкости, диэлектрических свойств, низкой теплопроводности, высокой коррозионной стойкости. Стекловолокно получают продавливанием стекломассы через специальные фильтры или вытягиванием из расплава. Изготавливаются два вида стекловолокна: непрерывное – диаметром *3–100 мкм*, длиной *20 км* и более и штательное – диаметром *0,5–20 мкм*, длиной *0,01–0,5 м*. Штательные волокна применяют для изготовления конструкционных композиционных материалов с однородными свой-

ствами, а также теплоизоляционных композиционных материалов; непрерывные – в основном для высокопрочных композиционных материалов на неметаллической основе. Выпускаемые в настоящее время непрерывные профильные волокна с квадратной, прямоугольной, шестиугольной формой поперечного сечения повышают прочность и жесткость композиционных материалов благодаря более плотной упаковке в материале.

Применение полых профильных волокон уменьшает пластичность, повышает жесткость при изгибе и прочность при сжатии композиционных материалов, улучшает их изоляционные свойства.

Таблица 9.3 – Свойства волокон и нитевидных монокристаллов

Материал	Температура плавления или размягчения, ^oC	ρ, $т/м^3$	σ_B, *МПа*	$\sigma_B/(\rho g)$, *км*	*Е, ГПа*	Средний размер волокна, *мкм*
Волокна						
Углерод или графит	3650	1,6–2	1687–3374	110–210	216–677	5,8–7,6
Бор на вольфрамовой проволоке	2300	2,63	2707–4060	110–160	373–402	102–142
Борсик на вольфрамовой проволоке	2300	2,77	2707–4060	100–160	373–412	104
Карбид кремния на вольфрамовой проволоке	2200	3,35–3,46	2236–3893	67–120	492–471	102
Оксид алюминия Al_2O_3	2040	3,14	2030	66	169	3
Стекло	–	2,5	4482	183	89,3	–
Бериллий	1284	1,85	981–1100	38–54	295	125–130
Вольфрам	3410	19,3	1657–3207	9–17	420	51–1270
Сталь *18Х15Н5АМ3*	–	7,8	3500–3800	48	200	150
Нитевидные монокристаллы						
Сапфир, Al_2O_3	2040	3,96	4021–23634	110–620	402–1010	0,51–11
Карбид кремния	2690	3,22	13533–40600	440–1320	441–1010	0,51–11

Преимуществом композиционных материалов на металлической основе являются более высокие значения характеристик, зависящих от свойств матрицы. Это прежде всего временное сопротивление и модуль упругости при растяжении в направлении, перпендикулярном оси армирующих волокон, прочность при сжатии и изгибе, пластичность, вязкость разрушения. Кроме того, композиционные материалы с металлической матрицей сохраняют свои прочностные характеристики до более высоких температур, чем многие материалы с неметаллической основой. Они более влагостойки, негорючи, обладают электрической проводимостью.

Наиболее перспективными материалами для матриц металлических композиционных материалов являются металлы, обладающие небольшой плотностью (*Al, Mg, Ti*), и сплавы на их основе, а также никель, широко применяемый в настоящее время в качестве основного компонента жаропрочных сплавов. Свойства некоторых композиционных материалов на металлической основе приведены в таблице 9.4.

Таблица 9.4 – Механические свойства одноосно-армированных композиционных материалов с металлической матрицей

Композиционный материал	Матрица	Наполнитель		ρ, $т/м^3$	$\sigma_B/(\rho g)$, *км*	*E*, *ГПа*	$E/(\rho g)\cdot 10^{-3}$, *км*	σ_B, *МПа (20 °С)*	Σ_{-1}, *МПа* (на базе 10^7)
		Материал	Количество, % (об.)						
ВКА-1	Алюминий	Борное волокно	50	2,65	45	240	9	1200	600
ВКУ-1	–	Углеродное волокно	30–40	2,2–2,3	42	270	12	900–1000	200
КАС-1	–	Стальная проволока	40	4,8	33	120	2	1600	350
ВКМ-3	Магний	Борное волокно	45	2,2	57	200	9	1250	–

Нашедшие промышленное применение композиционные материалы с алюминиевой матрицей в основном армируют стальной проволокой, борным и углеродными волокнами. В качестве матрицы используют как технический алюминий (например, *АД1*), так и сплавы (*АМг6*, *В95*, *Д20* и др.). Применение в качестве матрицы сплава (например, *В95*), упроченного термообработкой

(закалка и старение), дает дополнительный эффект упрочнения композиционных материалов.

Механические свойства композиционных материалов на основе алюминия с борным волокном в качестве наполнителя (без термической обработки – числитель и после нее – знаменатель) приведены ниже:

	Вдоль волокон	Поперек волокон
σ, МПа	1580/1670	137/259
Е, ГПа	232/239	141/148

Примечание. Временное сопротивление матрицы (*Al–1%, Mg–0,6%, Si–0,2% Cr*) до термической обработки составляло *130 МПа*, после – *320 МПа*.

Видно, что в направлении оси волокон эффект упрочнения невелик, тогда как в поперечном направлении, где свойства определяются в основном свойствами матрицы, он достигает *50%*.

Наиболее дешевым, достаточно эффективным и доступным армирующим материалом является высокопрочная стальная проволока. Например, армирование технического алюминия проволокой из стали *ВНС9* диаметром *0,15 мм* (σ_B*=3600 МПа*) увеличивает его σ_B в *10–12* раз при содержании волокна *25%* объема, после чего σ_B достигает соответственно *1000–1200* и *1450 МПа*. Если для армирования использовать проволоку меньшего диаметра, т. е. большей прочности (σ_B*=4200 МПа*) σ_B композиционных материалов увеличится до *1750 МПа*. Таким образом, алюминий, армированный стальной проволокой (*25–40%* объема), по основным свойствам значительно превосходит даже высокопрочные алюминиевые сплавы и выходит на уровень соответствующих свойств титановых сплавов. При этом плотность композиций находится в пределах *3,9–4,8 т/м*^{3}.

Упрочнение алюминия и его сплавов более дорогими волокнами *B*, *C*, Al_2O_3 повышает стоимость композиционных материалов, но при этом улучшаются некоторые его свойства. Например, при армировании борными волокнами модуль упругости увеличивается в *3–4* раза, углеводородные волокна способствуют снижению плотности. На рисунке 9.9 показано влияние объемного содержания волокон бора *Vв* на прочность и жесткость композиции «алюминий – бор»:

Vв, % (объемн.)	0	10	20	30	40	50
σ_B*, МПа*	70–140	300–380	500–650	700–900	900–1140	1100–1400
Е, ГПа	70	105	135	180	190–200	200–257

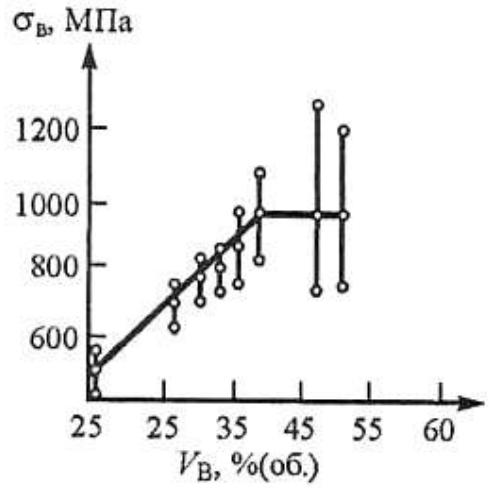


Рисунок 9.9 – Зависимость временного сопротивления бороалюминиевых листов от объемного содержания борных волокон

Бор мало разупрочняется с повышением температуры, поэтому композиционные материалы, армированные борными волокнами, сохраняют высокую прочность до *400–500 ºС*. Промышленное применение нашел материал *ВКА-1*, содержащий 50% объема непрерывных высокопрочных и высокомодульных волокон бора. По модулю упругости и временному сопротивлению в интервале *20–500 ºС* он превосходит все стандартные алюминиевые сплавы, в том числе высокопрочные *В95*, и сплавы, специально предназначенные для работы при высоких температурах (например, *АК4-1*). Наглядно это представлено на рисунке 9.10. Высокая демпфирующая способность материала обеспечивает вибропрочность изготовленных из него конструкций. Плотность композиционных материалов *ВК4-1* равна *2,65 т/м*^{3}, а удельная прочность – *45 км*. Это значительно выше, чем у высокопрочных сталей и титановых сплавов.

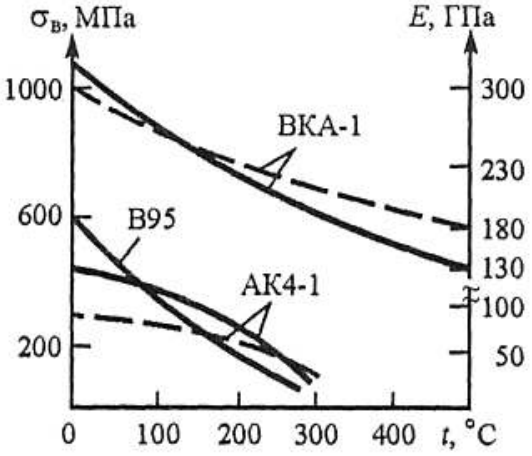


Рисунок 9.10 – Зависимость временного сопротивления (сплошные линии) и модуля упругости (штриховые линии)

Расчеты показали, что замена сплава *В95* на титановый сплав при изготовлении лонжерона крыла самолета с подкрепляющими элементами из *ВКА-1* увеличивает его жесткость на *45%* и дает экономию в массе около *42%*. Композиционные материалы на алюминиевой основе, армированные углеродными волокнами (*ВКУ*), дешевле и легче, чем материалы с борными волокнами. И, хотя они уступают последним по прочности, их удельные прочности близки. Однако изготовление композиционных материалов с углеродным упрочнителем связано с большими технологическими трудностями вследствие взаимодействия углерода с металлическими матрицами при нагреве, вызывающего снижение прочности материала. Для устранения этого недостатка применяют специальные покрытия углеродных волокон.

Материалы с магниевой матрицей характеризуются меньшей плотностью (*1,8–2,2 т/м*^{3}), чем с алюминиевой, при почти такой же высокой прочности (*1000–1200 МПа*) и поэтому более высокой удельной прочностью. Деформируемые магниевые сплавы (*МА2* и др.), армированные борным волокном (*50%* объема), имеют более высокую прочность. Хорошая совместимость магния и его сплавов с борным волокном, с одной стороны, позволяет изготовить детали методом пропитки практически без последующей механической обработки, с другой – обеспечивает большой ресурс работы деталей при повышенных температурах. Удельная прочность этих материалов повышается благодаря применению в качестве матрицы сплавов, легированных легким литием, а также в результате использования более легкого углеродного волокна. Как уже отмечалось, введение углеродного волокна усложняет технологию производства сплавов. Как известно, магний и его сплавы обладают низкой технологической пластичностью, склонностью к образованию рыхлой оксидной пленки.

При создании композиционных материалов на титановой основе встречаются трудности, вызванные необходимостью нагрева до высоких температур. При таких температурах титановая матрица становится очень активной; она приобретает способность к газопоглощению, взаимодействию с многими упрочнителями: бором, карбидом кремния, оксидом алюминия и др. В результате образуются реакционные зоны, снижается прочность как самих волокон, так и композиционных материалов в целом. Кроме того, высокие температуры приводят к рекристаллизации и разупрочнению многих армирующих материалов, что снижает эффект от армирования. Поэтому для упрочнения материалов с титановой матрицей используют проволоку из бериллия и керамических волокон тугоплавких оксидов (Al_2O_3), карбидов (*SiC*), а также тугоплавких металлов, обладающих большим модулем упругости и высокой температурой рекристаллизации (*Mo, W*). Причем целью армирования является в основном не повышение и без того высокой удельной прочности, а увеличение модуля упругости и рабочих температур. Механические свойства титанового сплава *ВТ6* (*6% Al, 4% V*, остальное *Ti*), армированного волокнами *Mo*, *Be* и *SiC,* представлены в таблице 9.5. Видно, что наиболее эффектив-

но удельная жесткость повышается при армировании волокнами карбида кремния.

Таблица 9.5 – Механические свойства *КМ* на основе сплава *ВТ6*

Упрочнитель	Содержание упрочнителя, % (об.)	ρ, $т/м^3$	σ_B, *МПа* в скобках σ_B упрочнителя	$\sigma_B/(\rho g)$, *км*	*Е, ГПа*	$E/(\rho g)\cdot 10^{-3}$, *км*
Mo	30	6,25	1400 (2300)	22	200	3,2
Be	*33*	–	*1050 (1050)*	–	*168*	–
SiC	25	4,3	910 (2550)	23	210	5

Армирование сплава *ВТ6* молибденовой проволокой способствует сохранению высоких значений модуля упругости до *800 ºС*. Его значение при этой температуре соответствует *124 ГПа*, т. е. снижается на *33%*, тогда как временное сопротивление при этом уменьшается до *420 МПа*, т. е. более чем в *3* раза.

Основная задача при создании композиционных материалов на никелевой основе заключается в повышении рабочих температур до *1000 ºС* и более. И одним из лучших металлических упрочнителей, способных обеспечить хорошие показатели прочности при столь высоких температурах, является вольфрамовая проволока. Введение вольфрамовой проволоки в количестве от *40* до *70%* объема в сплав никеля с хромом обеспечивает σ_{100}^{1000} в пределах *130–250 МПа*, тогда как лучший неармированный никелевый сплав, предназначенный для работы в аналогичных условиях, имеет σ_{100}^{1000}=*75 МПа*. Использование для армирования проволоки из сплавов вольфрама с рением или гафнием увеличивает этот показатель на *30–50%*.

Контрольные вопросы

1. Каким образом получают дисперсно-упрочненные композиционные материалы?
2. Достоинства и недостатки дисперсно-упрочненных композиционных материалов.
3. Что такое *САП* и какова его структура?
4. Что такое *САС* и какова технология его получения?
5. Какими волокнами армируют композиционные материалы?
6. Как изменяется степень упрочнения при изменении отношения длины к диаметру?
7. Какова роль матрицы композиционных материалов при усталостных нагрузках?
8. Что такое вискеризация и какова её роль?

10. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

10.1. Структура композиционных материалов на неметаллической основе

По сравнению с композиционными материалами на металлической основе эти материалы отличают хорошая технологичность, низкая плотность и в ряде случаев более высокие удельные прочность и жесткость. Кроме того, эти материалы имеют высокую коррозионную стойкость, хорошие теплозащитные и амортизационные свойства и т.д.

Для большинства композиционных материалов с неметаллической матрицей характерны следующие недостатки: низкая прочность связи волокна с матрицей, резкая потеря прочности при повышении температуры выше *100–200 ºС*, плохая свариваемость.

Среди неметаллических композиционных материалов наибольшее распространение получили композиции с полимерной матрицей: эпоксидной, фенолоформальдегидной и полиамидной.

В настоящее время для композиционных материалов особо высокой теплостойкости используют керамические и углеродные матрицы. В качестве упрочнителей применяют высокопрочные углеродные и борные, стеклянные и органические волокна в виде нитей, жгутов, лент, нетканых материалов.

Группы композиционных материалов, армированные однотканными волокнами, имеют специальные названия, данные им по названию волокна. Композиции с углеродными волокнами называются углеволокнитами, с борными – бороволокнитами, стеклянными – стекловолокнитами, органическими – органоволокнитами. Для органоволокнитов используют эластичные (лавсан, капрон, нитрон) и жесткие (ароматический полиамид, винол) синтетические волокна. Для обеспечения высокой прочности связи между компонентами необходимо полное смачивание волокон (которое достигается, например, растеканием жидкого связующего по поверхности волокон); при этом поверхностная энергия волокон должна быть больше поверхностного натяжения жидкой матрицы. Поверхностную энергию волокон повышают различными методами обработки их поверхности: травлением, окислением.

По сравнению с другими полимерами, применяемые в качестве матриц композиционных материалов, эпоксидные обладают более высокими механическими свойствами в интервале от *–60* до *180 ºС*, что обеспечивает композиционным материалам более высокие прочностные характеристики при сжатии и сдвиге. Эпоксидные материалы отверждаются при сравнительно невысоких температурах с небольшой усадкой, позволяющей изготовить на основе композиционных материалов крупногабаритные детали. При этом не требуется больших давлений, что особенно важно при использовании для армирования высокопрочных хрупких волокон, так как уменьшается вероятность их повреждения.

Эпоксидные матрицы уступают фенолоформальдегидным и особенно полиамидным в теплостойкости.

Из-за быстрого отверждения и низкого коэффициента диффузии в неметаллической матрице (исключение составляют органоволокниты) в композиционных материалах нет переходного слоя между компонентами. Связь между волокнами и матрицей носит адгезионный характер, т. е. осуществляется путем молекулярного взаимодействия. Прочность связи, характеризуемая параметром $\tau_0\xi$ (τ_0 – прочность сцепления, ξ – коэффициент контакта), повышается с увеличением критического поверхностного натяжения волокна (σ_C).

Для обеспечения высокой прочности связи между компонентами необходимо полное смачивание волокон (которая достигается, например, растеканием жидкого связующего по поверхности волокон); при этом поверхностная энергия волокон должна быть больше поверхностного натяжения жидкой матрицы. Однако для жидких смол, обладающих лучшей адгезией к наполнителям среди других полимеров, поверхностное натяжение составляет $5{,}0\cdot10^{-5}$ *Дж/м*^{2}, тогда как для углеродных волокон оно находится в интервале $(2{,}7–5{,}8)\cdot10^{-5}$ *Дж/м*^{2}, а для борных равно $2{,}0\cdot10^{-5}$ *Дж/м*^{2}. Поверхностную энергию волокон повышают различными методами обработки их поверхности: травлением, окислением, вискеризацией. Например, после травления борных волокон в азотной кислоте их критическое поверхностное натяжение достигает сотен джоулей на квадратный метр. На рисунке 10.1 видно, что благодаря травлению поверхностное натяжение борного волокна увеличивается и параметр $\tau_0\xi$ резко возрастает. Это свидетельствует об увеличении прочности связи между волокнами и матрицей.

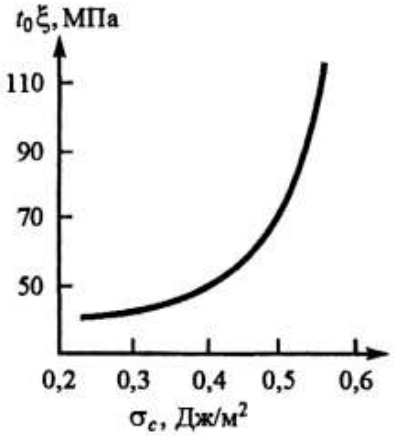


Рисунок 10.1 – Зависимость параметра $\tau_0\xi$ боропластика от критического натяжения борных волокон

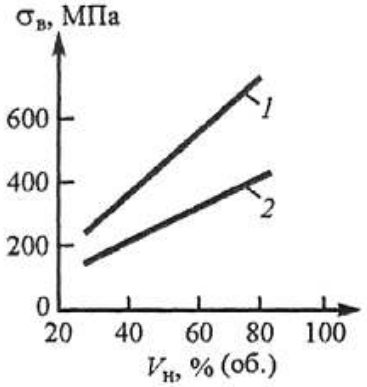
10.2. Способы улучшения свойств композиционных материалов

Одним из способов улучшения свойств композиционных материалов является увеличение жесткости матрицы с помощью введения в их структуру ионов металлов, которые усиливают взаимосвязь между полимерными молекулами. Как видно из таблицы 10.1, введение в матрицу *15%* Ba^{2+} или Ni^{2+}

повышает модуль упругости при изгибе полиметиленфенольной матрицы соответственно на *25* и *50%*. При этом предел прочности при изгибе матрицы, армированной стеклянным волокном, возрастает более чем в *14* раз, а матрицы, армированной углеродным волокном, – более чем в *16* раз. Увеличение прочности композиционных материалов объясняется не столько повышением прочности самой матрицы (она изменяется мало), сколько увеличением жесткости и адгезионной прочности ее сцепления с волокнами.

Таблица 10.1 – Влияние добавок Ba^{2+} и Ni^{2+} на свойства одноосно-армированных композиционных материалов

Материал	$E_И$, МПа			$\sigma_И$, МПа			$\tau_0\xi$, МПа		
	без добавок	Ba^{2+}	Ni^{2+}	без добавок	Ba^{2+}	Ni^{2+}	без добавок	Ba^{2+}	Ni^{2+}
Полиметилен-фенольная матрица	2060	2580	3100	81	87	90	–	–	–
То же + стеклянное волокно	44500	45000	45600	1260	1260	1330	1580	2160	2280
То же + углеродное волокно	106000	107000	108000	1370	1370	1520	–	–	–



1 – непрерывное ориентированное волокно;
2 – короткое неориентированное волокно
Рисунок 10.2 – Зависимости прочности стекловолокнитов от содержания и вида наполнителя

Механические свойства некоторых одноосно-армированных волокнистых композиционных материалов представлены в таблице 10.2. Самую высокую прочность и удельную прочность имеют стекловолокниты. Их временное сопротивление повышается приблизительно в три раза по мере уве-

личения объемного содержания наполнителя до *80%* и достигает *700 МПа* при армировании непрерывными нитями (рисунок 10.2).

Уменьшение диаметра непрерывных волокон, нанесение на них специальных покрытий, дополнительное введение в матрицу монокристаллов оксида алюминия способствуют повышению временного сопротивления стекловолокнитов до *2000–2400 МПа*. Они обладают хладостойкостью (до *–196 ºС*) и хорошей теплостойкостью; способны длительное время работать в диапазоне температур *200–400 ºС*. Кроме того, благодаря демпфирующей способности их используют для работы в условиях вибрационных нагрузок.

Таблица 10.2 – Свойства одноосно-армированных композиционных материалов с полимерной матрицей

Композиционные материалы	ρ, *МПа*	σ_B, *МПа*	$\sigma_B/(\rho g)$, *км*	δ, *%*	*E*, *ГПа*	$E/(\rho g)\cdot 10^{-3}$, *км*	σ_{-1}, *МПа* (на базе 10^7 циклов)
Углеволокниты:							
КМУ-1л	1,4	650	46	0,5	120	8,6	300
КМУ-1у	1,47	1020	70	0,6	180	12,2	500
КМУ-1в	1,55	1000	65	0,6	180	11,5	350
КМУ-2в	1,3	380	30	0,4	81	6,2	135
Бороволокниты:							
КМБ-1к	2	900	43	0,4	214	10,7	350
КМБ-2к	2	1000	50	0,3	260	13	400
КМБ-3к	2	1300	65	0,3	260	12,5	420
Органоволокниты с упрочнителем:							
эластичным	1,15–1,3	100–190	8–15	10–20	2,5–8,0	0,22–0,6	100
жестким	1,2–1,4	650–700	50	2-5	35	2,7	–
Стекловолокниты	2,2	2100	96	–	70	3,2	–

Достоинствами стекловолокнитов являются недефицитность и низкая стоимость упрочнителя, недостатком – сравнительно низкий модуль упругости. Однако по удельной жесткости они превосходят легированные стали и сплавы алюминия, магния и титана (*2500–2800 км*).

Частичная замена стеклянных волокон на углеродные и увеличение доли последних вплоть до полной замены при общем постоянном содержании наполнителя вызывают повышение жесткости композиционных материалов

(рисунок 10.3). При полной замене модуль упругости увеличивается приблизительно в *3* раза и у углеволокнитов достигает *180 ГПа*. Однако временное сопротивление и удельная прочность при любом содержании волокон не достигают уровня стекловолокнитов.

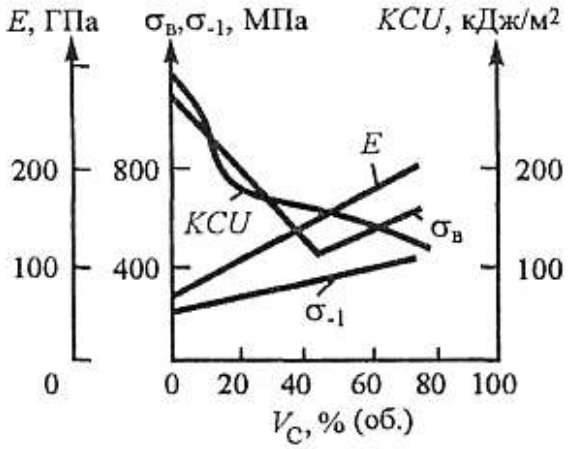


Рисунок 10.3 – Зависимости механических свойств волокнита при разном соотношении армирующих стеклянных и углеродных волокон (общее содержание наполнителя *62%* (*об.*))

Углеволокниты обладают низкими теплопроводностью и электрической проводимостью, но все же их теплопроводность в *1,5–2* раза выше, чем у стекловолокнитов. Они имеют малый и стабильный коэффициент трения и обладают хорошей износостойкостью. Температурный коэффициент линейного расширения углеволокнитов в интервале *20–120 ºС* близок к нулю.

К недостаткам углеволокнитов относят низкую прочность при сжатии и межслойном сдвиге. Специальная обработка поверхности волокон (окисление, травление, вискеризация) повышает эти характеристики.

Бороволокниты характеризуются высокими временным сопротивлением, пределами прочности при сжатии и сдвиге, твердостью и модулем упругости. Зависимости механических свойств бороволокнитов от объемного содержания волокон представлены на рисунке 10.4.

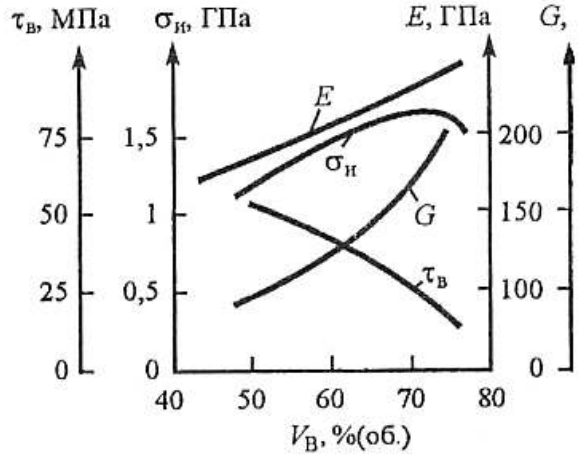


Рисунок 10.4 – Зависимости механических свойств бороволокнита *КМБ-1* от объемного содержания борных волокон

Однако свойства бороволокнитов зависят не только от свойств волокон и их объемного содержания, но и в большей степени от их геометрии и диаметра. Так, ячеистая структура волокна обеспечивает высокую прочность при сдвиге и срезе. Большой диаметр волокон и высокий модуль упругости придают устойчивость бороволокниту и способствуют повышению прочности при сжатии. Вместе с тем большой диаметр вызывает необходимость увеличения эффективной длины волокон, повышает чувствительность к разрушению отдельных волокон, уменьшает временное сопротивление по сравнению с тонковолокнистым материалом.

Органоволокниты обладают высокой удельной прочностью в сочетании с хорошими пластичностью и ударной вязкостью. Их характерной особенностью являтся единая полимерная природа матриц и волокон. Матрица и наполнитель имеют близкие значения коэффициента линейного расширения, им свойственны химическое взаимодействие и прочная связь. Органоволокниты имеют бездефектную и практически беспористую структуру (пористость *1–3%*), хорошую стабильность механических свойств. Слабым местом при нагружении материала является не только граница раздела между волокном и матрицей, сколько межмолекулярные связи в самом волокне.

Структура органического волокна неоднородна. Большая степень ориентации фибрилл в направлении оси волокон обеспечивает им высокие прочность и жесткость при растяжении в этом направлении. Однако неоднородность структуры волокон обуславливает различные напряженные состояния в отдельных её элементах. Между этими элементами возникают напряжения сдвига, которые приводят сначала к расщеплению волокна вдоль оси, а затем – к разрушению. Такой механизм разрыва волокон вызывает большую работу разрушения в целом. Это характеризует высокую прочность при статическом и динамическом нагружении. Органоволокниты, особенно с эластичным наполнителем, имеют очень высокую ударную вязкость (*0,6–0,7 Мдж/м²*). Слабые межмолекулярные связи являются причиной низкой прочности и жесткости при сжатии. При этом предельная деформация при сжатии определяется не разрушением волокон, а их искривлением. Дополнительное армирование органоволокнитов волокнами, затрудняющими это искривление, например, углеродными и борными, повышает прочность при сжатии.

Существуют керамические композиционные материалы, в состав которых входят керамическая матрица и металлические и неметаллические наполнители. Керамические композиционные материалы обладают высокими температурой плавления, стойкостью к окислению, термоударам и вибрации. Их получают порошковой технологией, гидростатическим, изостатическим и горячим прессованием, а также центробежным, геликерным и вакуумным литьем. В качестве матриц используют силикатные (SiO_2), алюмосиликатные (Al_2O_3–SiO_2), алюмоборосиликатные (Al_2O_3–B_2O_3–SiO_2) и другие стекла, тугоплавкие оксиды (ThO_2, BeO, Al_2O_3, ZrO_2, и т. д.), нитрид Si_3N_4, бориды (TiB_2, ZrB_2) и карбиды (SiC, TiC).

Керамические композиционные материалы на основе карбидов и окислов с добавками металлического порошка *(< 50%* (*об*)) называют керметами. Они не нашли широкого применения из-за высокой хрупкости. Помимо порошков для армирования керамических композиционных материалов используют металлическую проволоку из жаропрочной стали, вольфрама, молибдена, ниобия, а также неметаллические волокна (углеродные, керамические). Ориентация волокон в зависимости от условий нагружения может быть направленной или хаотичной.

Использование металлической проволоки из тугоплавких металлов и жаропрочных сталей имеет целью создать пластичный каркас, предохраняющий композиционные материалы от преждевременного разрушения при растрескивании керамической матрицы. Ударная вязкость и термостойкость керамических композиционных материалов повышаются при увеличении содержания волокна не более чем на *25%* объема, затем возрастающая пористость вызывает снижение прочности этих композиционных материалов. Недостатком керамических композиционных материалов, армированных металлическими волокнами, является низкая жаростойкость.

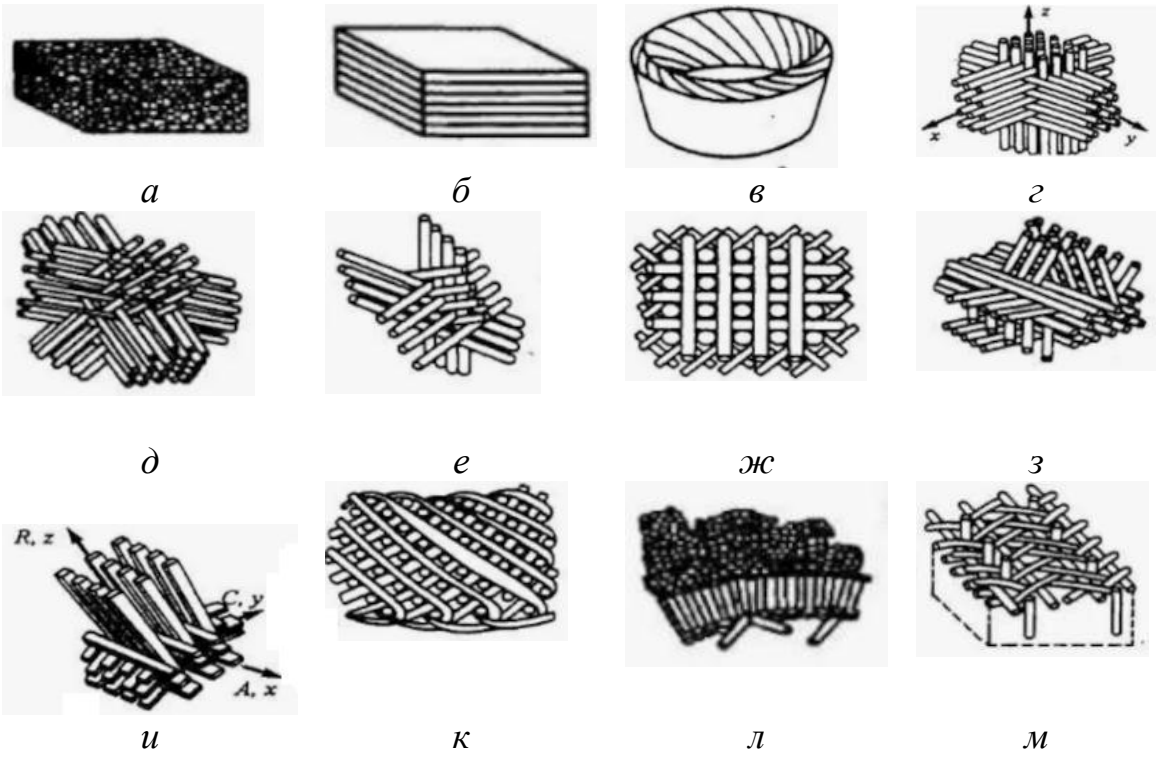
Перспективным наполнителем для керамических композиционных материалов является высокомодульное углеродное волокно. Для обеспечения максимальной прочности доля углеродного волокна должна составлять *50–60%* объема при оптимальном отношении модулей упругости матрицы и волокна, равном *0,1*. Однако свойства и температура эксплуатации этих композиционных материалов в большей степени зависит от материала матрицы. Рабочие температуры для углекерамических композиционных материалов со стеклянной матрицей, отличающихся высокой стабильностью механических свойств практически до температур размягчения (*600–800 ºС*), не должны превышать эти температуры. Композиционные материалы с матрицей из тугоплавких оксидов можно использовать до *1000 ºС*, из боридов и нитридов – до *2000 ºС*, из карбидов – свыше *2000 ºС*. Кроме того, свойства керамических композиционных материалов зависят от способа формования.

Преимуществом керамических композиционных материалов, армированных волокнами *SiC*, является химическое сродство матрицы и наполнителя в этих композиционных материалах, которые обеспечивают высокую прочность связи между ними, что в сочетании со стойкостью к окислению при высоких температурах позволяет их использовать для ответственных тяжелонагруженных изделий (высокотемпературные подшипники уплотнений, направляющие и рабочие лопатки газотурбинных двигателей, носовые обтекатели ракет и т. д.).

10.3. Углерод-углеродные композиционные материалы

Углерод-углеродными называются композиционные материалы, представляющие собой углеродную матрицу, армированную углеродными волокнами или тканями. Одинаковая природа и близкие физико-химические свой-

ства обеспечивают прочную связь волокон с матрицей и уникальные свойства этим композиционным материалам. Механические свойства упомянутых композиционных материалов в большей степени зависят от схемы армирования ($\sigma_в$ может меняться от *100* до *1000 МПа*). Наиболее предпочтительным является многоосное армирование, при котором армирующие волокна расположены в трех и более направлениях (рисунок 10.5).



а – хаотическая; *б* – слоистая; *в* – розеточная; *г–з* – ортогональная;
и – аксиально-радиально-окружная; *к* – аксиально-спиральная;
л – радиально-спиральная; *м* – аксиально-радиально-спиральная
Рисунок 10.5 – Схемы армирования

Углерод-углеродные композиционные материалы обладают малой плотностью (*1,3–2 т/м*^{3}), низкой теплоемкостью, сопротивлением тепловому удару, эрозии и облучению; низкими коэффициентами трения и линейного расширения; высокой коррозионной стойкостью; широким диапазоном электрических свойств; высокой прочностью и жесткостью. Это, несомненно, является достоинствами этих материалов. В углерод-углеродных композиционных материалах при повышении температуры увеличивается прочность в *1,5–2* раза и модуль упругости.

К недостаткам относят склонность к окислению при нагреве до температуры выше *500 ºС* в окислительной среде.

Исходным материалом для матриц служат синтетические органические смолы с высоким коксовым остатком (фенолоформальдегидные, фурановые, эпоксидные и др.). Термореактивные смолы обладают хорошей пропитывающей способностью. Большинство из них отверждается при относительно

низких температурах (до *200–250 ºС*) и содержит *50–56%* кокса. При пиролизе они образуют стекловидный углерод, который не подвержен графитизации до *3000 ºС*.

К недостаткам пеков относят неоднородный химический состав, способствующий образованию пористости; термопластичность, вызывающую миграцию связующих и деформацию изделия; наличие канцерогенных соединений, требующих дополнительных мер безопасности. Наполнителями углерод-углеродных композиционных материалов служат углеграфитовые волокна, жгуты, нити, тканые материалы. Структура и свойства композиционных материалов в большей степени зависят от способа их получения. Наибольшее распространение получили следующие два.

Первый способ состоит из пропитки графитовых волокон смолой или пеками, намотки заготовки, ее отверждения и механической обработки на заданный размер, карбонизации при *800–1500 ºС* в среде инертного газа или нейтральной среде, уплотнения пирометрическим углеродом, графитизации при *2500–3000 ºС* и нанесения противоокислительных покрытий из карбидов кремния и циркония. Для получения материала высокой плотности цикл «пропитка – отверждение – карбонизация» многократно повторяют. Всего процесс продолжается около *75 ч*. Плотность композиционных материалов, полученных этим методом, составляет *1,3–2 т/м*^{3}.

Второй способ получения углерод-углеродного композиционного материала состоит в осаждении углерода из газовой среды, образующейся при термическом разложении углеводородов (например, метана), на волокнах каркаса заготовки (изделия) и заполнения пор между ними. Метод осаждения из газовой среды более дорог, но обеспечивает более прочное сцепление волокон с матрицей, более высокое содержание углерода в матрице и большую плотность всего композиционного материала. Этот метод позволяет получить композиционные материалы с различными свойствами, в том числе и с заданными.

Существуют также технологии, сочетающие эти два способа.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о достоинствах и недостатках композиционных материалов с неметаллической матрицей.
2. Какими свойствами и структурами обладают углеволокниты и бороволокниты?
3. Для чего вводят в матрицу ионы металлов?
4. Каковы свойства стекловолокнитов?
5. Какими свойствами обладают органоволокниты?
6. Назовите достоинства и недостатки керамических КМ.
7. Каковы достоинства и недостатки эпоксидных матриц?
8. Что такое керметы?

11. ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ

11.1. Классификация, строение и свойства пластмасс

Синтетические материалы получают синтезом органических веществ. К таким материалам относятся пластмассы, пленки и волокна, резины, клеи, герметики, краски, лаки. Свойства синтетических материалов определяются физико-механическими показателями тех полимеров, из которых они получены. Все полимеры отличаются исключительно большими размерами молекул. Форма молекул полимеров может быть линейной (нитевидной) или сетчатой. Каждая молекула полимера (макромолекула) представляет собой совокупность звеньев какой-то одной определенной структуры, соединенных химическими связями. Часто макромолекулы представляют собой сочетание звеньев двух или трех различных типов структур. Такие полимеры называют совмещенными полимерами или сополимерами. Свойства сополимеров по их значениям бывают средними по сравнению со свойствами отдельных полимеров, составляющих данный сополимер. Сильнее выражены свойства того полимера, звеньев которого больше в макромолекулах сополимера.

Среди новых конструкционных материалов видное место принадлежит пластическим массам (пластмассам) и синтетическим смолам. Пластическими массами называют неметаллические материалы, получаемые на основе природных и синтетических полимеров.

Пластмассы являются как заменителями дефицитных цветных металлов, так и материалами с особыми свойствами, для которых не всегда может быть найдена замена. Этим объясняется широкое использование пластмасс для изготовления значительной номенклатуры деталей машин. Применение пластмасс повышает качество машин и оборудования за счет снижения их массы, улучшает внешний вид, позволяет экономить цветные и черные металлы. Особенно эффективна замена пластмассами цветных металлов (свинца, меди, цинка, латуни, бронзы) и легированных сталей. Применение, например, *1* тонны эпоксидной смолы в электротехнике дает экономию более *4* тонн меди.

Исходными материалами для получения пластмасс служат дешевые природные вещества: продукты переработки каменного угля, нефти, природного газа и т. д. На производство пластмасс требуется гораздо меньше капитальных вложений, чем на получение цветных металлов.

Основой пластических масс являются смолы – высокомолекулярные соединения органического происхождения. Смолы в чистом виде используются реже.

Классификация пластмасс

Пластмассы в зависимости от их поведения при нагреве делятся на термореактивные (реактопласты) и термопластические (термопласты).

Реактопласты под действием теплоты и давления (или инициаторов – ускорителей отверждения) переходят в твердое, неплавкое и нерастворимое состояние. Реактопласты не могут быть вторично переработаны.

Термопласты под действием теплоты плавятся и затвердевают при охлаждении. Изделия из термопластов могут неоднократно перерабатываться. Однако повторный нагрев несколько ухудшает физико-механические свойства материала (за счет разложения и загрязнения его).

В зависимости от применяемого наполнителя пластические массы разделяют на композиционные и слоистые. Композиционные, в свою очередь, делятся на порошкообразные и волокнистые.

В настоящее время решается задача наиболее полного использования во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства достижений современной химии и, в частности, замены традиционных материалов новыми более экономичными и практичными синтетическими материалами. Предусмотрены увеличение использования нефтяного и газового сырья для производства полимерных материалов, создание требуемых мощностей по переработке пластмасс в изделия для нужд народного хозяйства.

Наиболее крупными потребителями пластмасс являются электротехническая промышленность, радиоэлектроника, общее машиностроение.

Основные свойства пластмасс

Изделия из пластмасс при обычных условиях, как правило, представляют собой твердые и упругие тела.

Ассортимент применяемых в промышленности пластмасс весьма разнообразен. Для подавляющего большинства пластмасс характерны следующие положительные качества:

1) малая плотность полимерных материалов (*1,1–1,8 г/см^3*), что позволяет значительно уменьшить массу машин, конструкцию которых составляют детали из пластмасс;

2) химическая стойкость – пластмассы не подвержены коррозии, даже в агрессивных средах;

3) хорошие электроизоляционные свойства, что позволяет применять пластмассы в качестве диэлектриков, незаменимых в высокочастотных устройствах радиосвязи, телевидения и т. д.;

4) высокая удельная и абсолютная механическая прочность и возможность создания анизотропных материалов;

5) высокая технологичность – трудоемкость изготовления самых сложных деталей из пластмасс незначительна по сравнению с трудоемкостью изготовления деталей из других материалов;

6) наличие неограниченных ресурсов дешевого сырья;

7) низкий коэффициент трения некоторых видов пластмасс, например текстолита, ДСП (древесно-слоистые пластики), капрона, капролона, что позволяет в ряде случаев успешно заменять ими бронзу и баббит в подшипниковых узлах машин;

8) высокий коэффициент трения в сочетании с износостойкостью фенопластов с асбестовым наполнителем, пресс-композиций на основе каучуков и других видов специальных пластмасс, что позволяет с успехом заменять ими чугун и дорогие сорта дерева в конструкциях транспортных и прочих машин;

9) прозрачность некоторых ненаполненных пластических масс, таких как полиметилметакрилат (органическое стекло), полистирол и др., которые способны пропускать лучи света в широком диапазоне волн, в том числе ультрафиолетовую часть спектра, значительно превосходя в этом отношении силикатные стекла; эти пластмассы широко применяют в оптической промышленности и машиностроении для изготовления прозрачных деталей – водомерных стекол, арматуры масляных и охлаждающих систем, линз смотровых отверстий и т. д.

Одновременно с указанными достоинствами пластмассы обладают следующими недостатками:

1) низкая теплостойкость – основные виды пластмасс могут удовлетворительно работать лишь в сравнительно небольшом интервале температур (от *–60* до *+200 ºС*); однако для пластмасс на основе кремнийорганических полимеров, фурфурольных композиций и фторопластов верхний предел температур доходит до *300–400 ºС*;

2) низкая теплопроводность, которая в *500–600* раз ниже теплопроводности металлов, что ограничивает применение пластмасс в узлах и деталях машин, где необходим быстрый отвод больших количеств теплоты;

3) низкая твердость (*НВ 6–60*);

4) ярко выраженная ползучесть, особенно у термопластов;

5) малая жесткость, так как модуль упругости самых жестких пластмасс (стеклопластиков) на один-два порядка ниже, чем у металлов;

6) старение, обуславливающее ухудшение свойств пластмасс со временем под действием температуры, влажности, света и воды.

Все это необходимо учитывать при конструировании деталей из пластмасс.

Компоненты, входящие в состав пластмасс

В большинстве своем пластмассы состоят из смолы, наполнителя, пластификатора, стабилизатора, красителя и других добавок, улучшающих их технологические и эксплуатационные свойства. В зависимости от требований, предъявляемых различными отраслями техники, свойства полимеров могут быть в значительной степени улучшены и изменены с помощью соответствующих составляющих пластмассы.

Наполнители служат для улучшения физико-механических, диэлектрических, фрикционных или антифрикционных свойств, повышения теплостойкости, уменьшения усадки, а также для снижения стоимости пластмасс. Наполнители бывают органические и неорганические. Органическими наполнителями являются древесная мука, хлопковые очесы, целлюлоза, бумага, хлопчатобумажная ткань, древесный шпон. В качестве неорганических

наполнителей используют асбест, графит, стекловолокно, стеклоткань, слюду, кварц.

Применяя в качестве наполнителя древесную муку, получают порошкообразные полимерные материалы – пресс-порошки, употребляемые для изготовления несильно нагруженных деталей. Для получения материала с более высокой механической прочностью употребляют волокнистые наполнители (волокна хлопка, асбеста). Еще большую прочность пластмассам придают листовые наполнители, используемые для производства слоистых пластмасс. При применении хлопчатобумажной ткани получают текстолит, стеклоткани – стеклотекстолит, бумаги – гетинакс, асбестовой ткани – асботекстолит. Используя древесный шпон, вырабатывают древесные слоистые пластики. Для изготовления деталей, по прочности не уступающих сталям, в качестве наполнителей применяют стекловолокно, стеклошнуры, стекломаты.

По массе содержание наполнителей в пластмассах составляет от *40* до *70%*. Исключение здесь составляют теплоизоляционные материалы, где в качестве наполнителя используют газы, получая газонаполненные полимерные материалы – пенопласты и поропласты.

Пластификаторы увеличивают пластичность и текучесть пластмасс, улучшают их морозостойкость. В качестве пластификаторов применяют дибутилфталат, трикрезилфосфат и др.

В состав пластмасс часто вводят *стабилизаторы* – вещества, предотвращающие разложение полимерных материалов во время их переработки и эксплуатации под воздействием света, влажности, повышенных температур и других факторов. Для стабилизации используют ароматические амины, фенолы, сернистые соединения, газовую сажу.

Красители добавляют для окрашивания пластических масс. Применяют как минеральные красители (мумия, охра, умбра, литопон, крон и т. д.), так и органические (нигрозин, родамин).

Смазочные вещества, в качестве которых используют стеарин, олеиновую кислоту, трансформаторное масло, снижают вязкость композиции и предотвращают прилипание материала к стенкам пресс-формы.

Получение пластмасс

Большое влияние на свойства пластмасс оказывает их основа, т. е. связующее вещество – смола. По характеру получения связующего вещества пластмассы разделяют на конденсационные и полимеризационные.

Конденсационные пластмассы. Основой этих пластмасс являются синтетические смолы, получаемые в результате химической реакции поликонденсации, при которой образование высокомолекулярного вещества (полимера) происходит с выделением побочных продуктов: воды, аммиака, спирта и др. Реакция поликонденсации в зависимости от исходных продуктов может происходить при нагреве или без него, при пониженном, нормальном или повышенном давлении, в присутствии катализатора или без него.

Наиболее распространенными в машиностроении и приборостроении термореактивными конденсационными пластмассами являются фенопласты и аминопласты.

Фенопласты получают из фенолоальдегидных смол, образующихся в результате взаимодействия фенола, крезола, фенолена или резорцина с альдегидами (формалином, фурфуролом, бензольдегидом) в присутствии кислых или щелочных катализаторов. В зависимости от способа производства смолы этой группы подразделяют на резольные и новолачные.

Резольные смолы – это термореактивные смолы. Их получают, используя щелочные катализаторы. Смолы могут производиться в виде водных эмульсий (до *20%* воды), в сухом виде (в кусках желто-коричневой окраски) и в виде спиртовых растворов – лаков. Основной особенностью резольных смол является их способность переходить при нагреве в неплавкое и нерастворимое состояние. В этом состоянии смолы химически инертны, обладают достаточной механической прочностью и высокими диэлектрическими свойствами. Переход смол в неплавкое и нерастворимое состояние, осуществляемый без добавления ускорителей (катализаторов) под действием нагрева и давления, называется бакелизацией.

Новолачные смолы получают с кислыми катализаторами, и даже при длительном нагреве они остаются постоянно плавкими и растворимыми, т. е. являются термопластичными смолами. Если же нагрев новолаков производится с добавлением уротропина (кристаллическое соединение аммиака и формальдегида), то новолаки отвердевают очень быстро. Поэтому они в большом количестве идут на производство быстро отвердевающих прессматериалов. Кроме того, новолаки применяются в виде спиртовых растворов (например, лак «Идитол»).

Аминопласты, или мочевиноформальдегидные пластмассы, относятся к группе реактопластов. Благодаря красивому внешнему виду и ярким окраскам (смолы бесцветны и светостойки, поэтому их можно окрашивать в различные цвета) из этих смол вырабатывают изделия широкого потребления. Как материал для изготовления деталей машин и приборов аминопласты находят ограниченное применение по сравнению с фенопластами из-за более низкой водо- и теплостойкости. Мочевиноформальдегидные смолы применяют также для пропитки древесины, которая после этого становится более прочной и водоустойчивой. Сырьем для производства мочевиноформальдегидных смол являются мочевина, тиомочевина, меламин и альдегиды, среди которых наибольшее значение имеют формальдегид и уротропин. В промышленности находят также применение кремнийорганические (полисилоксановые), эпоксидные смолы и др.

Полимеризационные пластмассы. Пластмассы на основе полимеризационных смол получаются в процессе реакции полимеризации. Реакцией полимеризации называют соединения большого числа однородных молекул низкомолекулярного вещества с образованием макромолекул нового вещества без выделения каких-либо побочных продуктов реакции. К числу наиболее

важных полимеризационных пластмасс относятся термопластические материалы – полистирол, поливинилхлорид, поливинилацетат, полиэтилен, политетрафторэтилен (фторопласт), полиметилметакрилат и др.

Полистирол получают полимеризацией стирола при температуре *80 ℃* блочным или эмульсионным методом. В качестве пластификатора применяется дибутилфталат или трикрезил фосфат.

К виниловым пластикам относят полимеры винилхлорида, винилового спирта и другие производные винила.

Хлорвинил – бесцветный газ $CH_3{=}CHCl$ – в технике получают из дихлорэтана, опыляемого спиртовым раствором щелочи. Полимеризацией хлорвинила в водоэмульсионной среде получают поливинилхлорид. В качестве эмульгатора применяют желатин или некаль, а в качестве катализатора – перекись бензоила и др.

Поливинилацетат получают полимеризацией винилацетата. Основным сырьем для получения винилацетата служат ацетилен и безводная уксусная кислота. В качестве катализаторов применяют ртутные соли серной, фосфорной и других кислот. Полиэтилен получают полимеризацией этилена.

Среди акриловых полимеризационных пластмасс наибольшее применение имеет полиметилметакрилат (органическое стекло). Для получения органического стекла производят полимеризацию метилметакрилата. В качестве катализатора применяют перекись бензоила. В целях улучшения эластичности вводят пластификаторы (дибутилфталат, трикрезилфосфат и др.), а также добавляют красители. В промышленности метилметакрилат (метиловый эфир метакриловой кислоты) получают сложным органическим синтезом из ацетона или изобутилового спирта.

Фторопласты – высокомолекулярные соединения на основе фтора и хлорпроизводных этилена, которые получают эмульсионной полимеризацией в виде мелкодисперсного порошка белого цвета.

Пластмассы на основе эфиров целлюлозы весьма широко распространены в народном хозяйстве. Основными представителями этой группы пластмасс являются целлулоид и ацетилцеллюлоза. Целлулоид – наиболее известная пластмасса – представляет собой твердый раствор нитроклетчатки в камфоре.

Порошковые и волокнистые пластмассы. Пластмассы, перерабатываемые в изделия методом прессования, принято называть прессовочными термореактивными материалами (пресс-материалами). Номенклатура прессовочных материалов очень обширна. Эти материалы особенно широко применяют для изготовления разнообразных, часто сложных по конфигурации деталей электротехнического назначения, которые в процессе эксплуатации не испытывают значительных механических нагрузок, а также для производства конструкционных деталей. Прессовочные материалы по виду используемых наполнителей делят на две группы: порошковые и волокнистые.

В порошковых пластмассах в качестве наполнителя для изделий общетехнического назначения используют древесную муку (пресс-порошки *К18-2*, *К-21-22*).

Изделия из пресс-порошков на основе фенолоформальдегидных смол стойки к атмосферным воздействиям, выдерживают действие кислот и солей. Фенолоформальдегидные пресс-порошки применяют в общем приборостроении для изготовления деталей радиотехнического назначения и электронной аппаратуры, сложноармированных деталей. Из пресс-порошков делают также корпуса и крышки приборов, детали, работающие при повышенной температуре или в условиях высокой влажности, но сравнительно малонагруженные. Для изготовления деталей с повышенными требованиями по теплостойкости и механической прочности употребляют асбестовую муку (пресс-порошок *К-6-Б*); для пресс-порошков с повышенной влагостойкостью и повышенными диэлектрическими свойствами – кварцевую муку и молотую слюду (пресс-порошок *К-211-3*). Графит в качестве наполнителя делает пластмассу электропроводной (графитопласты). Меламиноформальдегидные смолы бесцветны, и пресс-порошкам на их основе можно придать любой цвет. Физико-механические свойства их аналогичны фенолоформальдегидным пресс-порошкам.

Пресс-порошки на основе мочевиноформальдегидных смол и целлюлозы (аминопласты) употребляются для изделий бытового назначения (посуда, тара) и некоторых деталей общего приборостроения (рукоятки, ручки, кнопки, клавиши, крышки).

Пресс-порошок *КМК-9* на полисилоксановой смоле отличается сочетанием высокой теплостойкости с хорошими диэлектрическими свойствами.

Волокнистые пластмассы имеют более высокие показатели физико-механических свойств. От сочетания разных связующих с различными волокнами получают пресс-материалы с заданными свойствами.

Волокниты – фенолоформальдегидная смола в сочетании с хлопчатобумажными очесами. Волокниты употребляют для изготовления несложных деталей общего технического назначения с повышенными требованиями к ударным нагрузкам. Ударопрочность волокнитов выше ударопрочности изделий из пресс-порошков.

Асбоволокниты марок *К-65, КФ-3*, фаолит получают на основе асбестового волокна и фенолоформальдегидной смолы. Такие пресс-материалы идут на изготовление электроизоляционных деталей повышенной прочности, работающих при повышенных температурах. Фаолит применяют в качестве теплозащитного и кислотоупорного материала. Он вибро- и ударопрочен, более стоек к резким сменам температур и более вязок, чем керамические покрытия.

Фаолит выпускают в виде листов различной толщины. При нагреве листы становятся пластичными и легко приобретают форму будущего изделия.

Асбоволокниты *КМК-218, К-41-5* на основе кремнийорганических (полисилоксановых) смол отличаются высокой теплостойкостью (*200–300 ºС*) и

повышенной дугостойкостью. Идут на изготовление электроизоляционных деталей, работающих при высоких температурах. Механическая прочность полисилоксановых асбоволокнитов ниже, чем фенолоформальдегидных, и они менее технологичны.

Асбовинил-асбоволокнит на связующем лаке употребляется как футеровочный материал в химической, целлюлозно-бумажной и коксохимической промышленности. Из асбовинила изготовляют трубы и детали аппаратов, работающих в кислотах.

Стекловолокниты АГ-4С, АГ-4В, ТВФЭ-2, ВТФН, КМС-9 и другие составляют большую группу материалов, в которых стекловолокно сочетается со смолами. В качестве связующего употребляют модифицированные фенолоформальдегидные, меламиноформальдегидные, эпоксидные, полиэфирные, полисилоксановые смолы. Стекловолокниты применяют для изготовления конструкционных изделий и элементов радиотехнических устройств с повышенными требованиями к прочности и теплостойкости (*200–350 ºС*).

Стекловолокниты по характеру распределения стекловолокна в пластике делят на стекловолокниты неориентированные и ориентированные, рубленого и непрерывного волокна. Ориентированный непрерывный стекловолокнит, например марки СВАМ, используют для изготовления плит, листов, труб и изделий, имеющих форму тел вращения. Крупногабаритные изделия сравнительно простых форм – корпуса лодок, катеров, вагонов, двери, кровлю, ванны, умывальники, корпуса приборов и аппаратов – изготовляют из неориентированного рубленого стекловолокнита без избыточного давления при формовании. Стекловолокниты применяют для изготовления конструкционных изделий, выдерживающих тепловые удары при температуре *5000–7000 ºС* в течение нескольких десятков секунд. Под действием такой высокой температуры поверхностные слои изделия выгорают. Внутренние слои за этот промежуток времени нагреваются лишь до *200–350 ºС*, сохраняя свою структуру и механическую прочность. В этих условиях стекловолокниты имеют преимущества перед жаропрочными сплавами.

Фурфурол-ацетоновые пластмассы на основе фурфурол-ацетоновой смолы и различных наполнителей – асбеста (*ФАА*), графита (*ФАГ*) и стеклянного волокна (*ФАС*) – обладают высокой теплостойкостью и хорошими диэлектрическими свойствами; *ФАА* – предназначается для изготовления тормозных колодок, *ФАГ* – для химического машиностроения, *ФАС* – для работы при высоких температурах.

Фенопласты и аминопласты. Фенопласты обладают высокими твердостью, прочностью, химической стойкостью и теплостойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами. Фенопласты употребляют для изготовления деталей, не несущих нагрузки: колпачков, пробок, рукояток, кнопок, деталей осветительной арматуры в вагоностроении, станкостроении, автомобильной промышленности.

Кислотостойкий фаолит в сочетании с асбестом и графитом в химической промышленности заменяет свинец, бронзу и другие металлы. Фенолиты

и другие подобные материалы применяют для малогабаритных несиловых деталей, корпусов, крышек. Из пресс-материалов *ФКП* изготовляют детали, к которым предъявляют требования повышенной ударопрочности – картеры автомобильных двигателей, щитки приборов, текстильные веретена, малонагруженные шестерни, работающие в агрессивных средах, детали поршневых и центробежных насосов, абразивные круги повышенной прочности и др. Пресс-материалы *ФАК-4* на основе фенолоформальдегидных смол, модифицированных полиамидами и каучуками, с наполнителем из молотого кварца и других неорганических веществ нашли применение для изготовления деталей автомобильных двигателей, приборов зажигания, различных тонкостенных армированных деталей, работающих при наличии вибрационных и ударных нагрузок, а также в условиях тропического климата.

Детали из аминопластов устойчивы к воздействию слабых кислот, щелочей, керосина, смазочных масел, спирта, ацетона, но разрушаются концентрированными щелочами и кислотами. Аминопласты бесцветны и светостойки, поддаются окрашиванию в любые цвета. Аминопласты применяются для изготовления ненагруженных армированных и неармированных деталей общего технического и декоративного назначения (кнопки, рукоятки управления, корпуса некоторых приборов). Пресс-материал *К-77-51* применяют для деталей приборов зажигания; пресс-материал *К-78-51* – для деталей шахтного оборудования, деталей приборов зажигания, выключателей двигателей, деталей электрооборудования; пресс-материал *ВЭИ-12* – для изделий, которые не отвечают высоким механическим свойствам.

К числу пластмасс данной разновидности можно отнести и такие материалы, как меламин, получаемый на основе меламиноформальдегидной смолы и древесной муки и применяемый при изготовлении деталей машин, соприкасающихся с пищевыми продуктами. Пресс-материал *МФК-20* на основе меламиноформальдегидной смолы, модифицированной кремнийорганической смолой, предназначен для изготовления изоляционных дугостойких деталей электроаппаратуры.

Термопластические полимерные материалы. Обладая комплексом очень ценных свойств, термопласты находят широкое применение в технике при изготовлении электро- и радиодеталей, деталей, работающих в химических средах, антифрикционных деталей, уплотнений. Большинство этих материалов непригодно для изготовления изделий, работающих при высоких длительно действующих нагрузках. Такие нагрузки вызывают явления ползучести (хладотекучести). Термопласты выпускают или в виде гранул, порошков, и в этом случае их используют для изготовления деталей методами литья под давлением, экструзии и др., или в виде полуфабрикатов – пленок, листов и профилей различных сечений, используемых для изготовления деталей механической обработкой, штамповкой и сваркой.

Полиэтилен обладает высокой химической стойкостью, в том числе к концентрированным кислотам и щелочам. При обычной температуре не растворяется ни в одном из известных растворителей. При температуре *80 ºС*

растворяется в ароматических углеводородах (толуоле, ксилоле и др.). Плотность полиэтилена $\rho=0,93–0,97$ *г/см*^{3}. Полиэтилен стареет (изменяет свои механические свойства) под действием ультрафиолетовых лучей. Для предотвращения старения в него вводят *2–3%* газовой сажи в качестве стабилизатора. Полиэтилен отличается малой гигроскопичностью, повышенной морозостойкостью и высокими диэлектрическими свойствами. Для кабельной промышленности выпускают специальный кабельный полиэтилен, пластифицированный полиизобутиленом. Полиэтилен хорошо перерабатывается всеми известными способами: литьем под давлением, экструзией, вакуумформованием, механической обработкой, сваркой. На металлическую поверхность полиэтилен можно наносить методом огневого или вихревого напыления.

Полиэтилен выпускают двух видов – высокого давления (*ВД*) и низкого давления (*НД*), различающихся методом изготовления и физико-механическими свойствами. Полиэтилен *ВД* имеет температуру плавления *115 ºС*, а полиэтилен *НД – 120–135 ºС*. Полиэтилен *НД* обладает большей механической прочностью и жесткостью и используется для изготовления труб, шлангов, листов, пленки, деталей высокочастотной радиоаппаратуры, различных емкостей. Литьем изготовляют вентили, краны, золотники, бесшумные зубчатые колеса, работающие при малой нагрузке. Полиэтилен ВД применяют как упаковочный материал в виде пленки или для изготовления небьющейся химической посуды.

Полипропилен относится к той же группе термопластов. Он обладает многими положительными качествами, присущими полиэтилену, и в меньшей степени – его недостатками. Полипропилен имеет меньшую плотность ($\rho=0,91$ *г/см*^{3}) и большие жесткость и поверхностную твердость. Из пропилена изготовляют трубы, листы различной толщины, которые легко подвергаются штамповке, сопровождаемой глубокой вытяжкой. Такие изделия используют в качестве корпусов приборов и аппаратов, облицовочного материала, заменителя фарфора и фаянса.

Полистирол представляет собой бесцветный прозрачный материал, обладающий абсолютной влагостойкостью, высокими электроизоляционными свойствами, светостойкостью и твердостью. Полистирол устойчив к плесени, к щелочным и кислым средам, растворяется в бензоле, толуоле, хлороформе, тетрахлориде углерода, эфирах и кетонах. Его диэлектрические свойства мало изменяются при изменении температуры от *–80* до *+110 ºС*.

К недостаткам полистирола относятся его малая теплостойкость, хрупкость и подверженность старению и растрескиванию. Для предотвращения растрескивания в полистирольные материалы вводят пластификаторы или минеральные наполнители. Перерабатывают полистирол литьем под давлением, экструзией и выдуванием. Изделия из полистирола можно подвергать любым видам механической обработки.

Из полистирола изготовляют детали радиотехнических устройств, лабораторную химическую посуду. Из блочного полистирола экструзией можно

получить трубки, стержни и другие профильные изделия, пленки, ленты и нити различной толщины. Полистирольные трубки применяют для изоляции высокочастотных проводов, изготовления деталей радиолокационной аппаратуры, изоляторов, прозрачных деталей и т. д. Этот полимер широко применяют для изготовления бытовых изделий; в технических целях используют сополимеры стирола. Сополимеризация улучшает свойства чистого полимера (механическую прочность, теплостойкость). Применяют сополимеры стирола с метилметакрилатом (марки *МСН*, *МС-2* и *МС-3*). При сополимеризации стирола с нитрильным каучуком получают материал *ПКНД*, обладающий большой гибкостью. Из него методами литья под давлением или глубокой вытяжки изготовляют ударостойкие корпуса для машин. Более прочный материал *СПН* (сополимер стирола с акрилонитрилом, модифицированный нитрильным каучуком) в виде листов и крошки перерабатывают в изделия методом литья под давлением и штамповкой.

Фторопласты выпускают нескольких видов, но наибольшее применение в промышленности получили политетрафторэтилен (фторопласт-4) и политрифтормонохлорэтилен (фторопласт-3). Фторопласт-4 химически абсолютно стоек. На него оказывают действие только расплавы солей щелочных металлов и фтор при высоких температурах. Плотность фторопласта-4 $\rho=2{,}2$ *г/см*^{3} (самый тяжелый из всех полимеров); коэффициент трения в семь раз ниже коэффициента трения хорошо полированной стали, что определяет его использование в машиностроении для трущихся деталей без применения смазочных веществ, однако при незначительных нагрузках, так как фторопласт-4 обладает хладотекучестью, увеличивающейся с повышением температуры. Фторопласт-4 работает в интервале температур от *–250* до *+260 ºС*. Фторопласт-4 не переходит в вязкотекучее состояние, поэтому изделия из него получают спеканием порошка, спрессованного по форме детали при температуре *350–370 ºС*.

Фторопласт-3 при нагреве до температуры *210 ºС* размягчается и плавится, что дает возможность перерабатывать его литьем под давлением. Фторопласт-3 может работать в интервале температур от *–80* до *+150 ºС*; он химически стоек, но набухает в органических растворителях; более тверд и механически прочен, чем фторопласт-4, не обладает холодной текучестью.

Фторопласты широко применяют для изготовления диэлектриков, уплотнительных деталей (прокладок, набивок), работающих в агрессивных средах, деталей клапанов кислородных приборов, вкладышей подшипников и т. д. Фторопласты также нашли применение для защиты металла от воздействия агрессивных сред. Покрытие производится из суспензий или эмульсий с последующим спеканием.

Полиамиды – твердые термопластические смолы – нашли широкое применение в машино- и приборостроении. В зависимости от химического состава исходного сырья вырабатывают несколько типов полиамидов. Для изготовления пластмассовых деталей обычно применяют полиамид-68, полиамид-66 и капрон. Полиамиды обладают высокими поверхностной твердо-

стью, прочностью на разрыв, прочностью на статический и ударный изгиб. Они устойчивы к действию углеводородов, жиров, масел, разбавленных и концентрированных щелочей, растворимы в фенолах, муравьиной, уксусной и минеральных кислотах, низших спиртах; имеют вполне удовлетворительные диэлектрические свойства, хорошо сопротивляются изнашиванию, в том числе и абразивному, и обладают низким коэффициентом трения. Негорючи, плавятся в узком интервале температур, что обусловлено кристаллической структурой этих веществ.

Полиамиды перерабатывают в изделия литьем под давлением и экструзией. Отдельные элементы изделий можно соединять сваркой или склеиванием. Применяют полиамиды для изготовления волокон, пленок, покрытий, клеев, деталей машин. Полиамидное волокно используется для высокопрочного шинного корда, трансмиссионных лент, канатов, щетины, рыболовецких сетей. Полиамиды хорошо наносятся в виде пленок на различные сорта стали, алюминий и другие металлы. Из полиамидов изготовляют шестерни, подшипники скольжения, рабочие органы центробежных насосов и турбин, уплотнения гидросистем, самостопорящиеся гайки, шкивы ременных передач, гребные винты теплоходов и т. д. Для маслопроводов, бензопроводов и гидравлических систем применяют трубы из полиамидов. Полиамиды применяют в чистом виде и в смеси с различными наполнителями – графитом, сажей, каолином, стекловолокнистыми материалами. Введение стекловолокнистого наполнителя повышает физико-механические свойства полиамидов. Детали и изделия из стеклонаполненных полиамидов могут эксплуатироваться в более жестких условиях (при больших нагрузках и скоростях и в более широком температурном интервале), чем чистые полиамиды.

Поливинилхлорид представляет собой белый мелкодисперсный порошок. При добавлении в поливинилхлорид до *10%* пластификаторов получают один из наиболее распространенных в промышленности материалов – винипласт. При содержании пластификатора до *40%* получается эластичный и морозостойкий материал – пластикат. Пластикат выпускают в виде листов, пленок, трубок, лент. Он широко применяется в электротехнической промышленности для изоляции кабелей и проводов, для производства линолеума, масло-, водо- и бензостойких прокладок и уплотнителей. Пластикат подвержен старению, становится хрупким от воздействия солнечных лучей. Светотермостойкий пластикат получается при введении специальных стабилизаторов.

Саран – сополимер винилхлорида с винилиденхлоридом – в виде пленок имеет высокую прочность, низкую паро- и газопроницаемость, лучшую по сравнению с поливинилхлоридом нагревостойкость, устойчивость к действию агрессивных сред и растворителей. Этот материал идет на изготовление методами прессования и литья под давлением различной арматуры: патрубков, тройников, крестовин, фланцев, а также корпусов электрических батарей, аккумуляторов.

Поликарбонаты – новые термопластические материалы, обладающие ценными свойствами: высокой поверхностной твердостью, ударной прочно-

стью и нагревостойкостью. Они влагостойки и стойки в окислительных средах при повышенных температурах. Поликарбонаты совершенно прозрачны и могут быть использованы вместо силикатного стекла. Поликарбонаты применяют для изготовления зубчатых колес, втулок, клапанов, кулачков и др.

Полиформальдегид – полимер, обладающий высокими жесткостью, твердостью, динамической прочностью, стойкостью к воде, минеральным маслам и бензину, атмосферным воздействиям, действию окислительных сред; постепенно разрушается в растворах кислот и щелочей. Применяется для изготовления антифрикционных деталей, рабочих частей насосов, турбобуров и других гидравлических машин, шестерен, подшипников, деталей, работающих в воде, бензине и масле, деталей текстильных машин и металлорежущих станков, корпусов электроинструментов. Изделия из полиформальдегида формуют литьем под давлением в интервале температур *182–220 ºС*.

Пентопласт — полимер на основе формальдегида, отличающийся химической стойкостью и атмосферостойкостью. По водостойкости пентопласт аналогичен фторопластам, полиэтилену и полистиролу. Из пентопласта изготовляют химически стойкие трубы, клапаны, вентили, сепаратные кольца, подшипники, детали часовых механизмов.

Слоистые пластмассы. Материалы, получаемые соединением наложенных друг на друга нескольких слоев волокнистых наполнителей (ткани, бумаги, древесины и т. п.), пропитанных синтетическими смолами, называются слоистыми. Слоистые пластмассы выпускают либо в виде полуфабриката, представляющего собой листы наполнителя, пропитанные смолой, либо в виде отпрессованных заготовок: листы, плиты различной толщины, трубы различных диаметров, стержни, диски, либо в виде фасонных изделий. Плиты изготовляют, пропитывая наполнитель смолой и раскраивая его на листы, которые складывают друг с другом в пакеты заранее установленной толщины. Пакет прессуют при давлении *8–10 МПа* и температуре *140–160 ºС*.

Необходимость предварительно раскраивать листы наполнителя, пропитанного смолой, и собирать пакеты приводит к тому, что из слоистых пластмасс формуют преимущественно заготовки. Поэтому для слоистых пластмасс механическая обработка является одним из основных методов их переработки в изделия. Слоистые пластмассы отличаются анизотропией свойств, особенно это касается механической прочности. Наиболее прочен материал вдоль нитей основы ткани или волокон шпона.

Промышленность выпускает следующие виды слоистых пластмасс: гетинакс, текстолит, асботекстолит, *ДСП*, стеклотекстолит и др.

Гетинакс – слоистая пластмасса на основе фенолоформальдегидной смолы и листов бумаги. Гетинакс выпускают в виде листов толщиной *0,5–50 мм*, стержней диаметром до *25 мм* и трубок различных диаметров. Гетинакс применяют главным образом как электроизоляционный материал. Выпускают также декоративный гетинакс для отделочных работ.

Текстолит – слоистая пластмасса, где в качестве наполнителя используется хлопчатобумажная ткань, в качестве связующего – фенолоформальдегидная смола.

Текстолит обладает относительно высокой механической прочностью, малой плотностью и высокими антифрикционными свойствами, стойкостью к вибрационным нагрузкам и хорошими диэлектрическими свойствами. Теплостойкость текстолита *120–125 ºС*. Текстолит нашел широкое применение как заменитель цветных металлов для вкладышей подшипников прокатных станов, как конструкционный и поделочный материал в машиностроении для изготовления направляющих роликов в самолетах, шестерен в автомобилях и др. Текстолитовые шестерни в отличие от металлических работают бесшумно.

Электротехнический текстолит применяют для изготовления электроизоляционных изделий повышенной прочности для работы на воздухе и в трансформаторном масле.

Асботекстолит представляет собой слоистую пластмассу с наполнителем из асбестовой ткани и связующим – фенолоформальдегидной смолой. Он имеет высокую теплостойкость – до *250 ºС*. Асботекстолит применяют преимущественно в качестве теплоизоляционных облицовок для тормозных колодок и дисков сцепления, так как он обладает большим коэффициентом трения.

Древеснослоистый пластик (ДСП) – пропитанный небольшим количеством фенолоформальдегидной смолы, спрессованный древесный шпон. *ДСП* имеет высокую механическую прочность, пониженную влагостойкость и невысокие диэлектрические показатели.

Дельта-древесина, как и другие виды *ДСП*, применяется как конструкционный, обшивочный и поделочный материал в машиностроении, как заменитель цветных металлов для изготовления шкивов, вкладышей подшипников, втулок, шестерен, опорных рам.

Стеклотекстолит изготовляют прессованием пакета стеклоткани, пропитанной смолой. Выбор связующего определяется назначением стеклотекстолита и способом изготовления изделия. Диаметр стекловолокна в стеклоткани составляет *3,5–5 мкм*. Связующее в стеклотекстолите выполняет роль клея, и его содержание не превышает *25–30%,* иначе прочность изделия снижается.

Из пакета пропитанной стеклоткани прессуют листы, плиты, трубы. Стеклотекстолит применяют для изготовления сильно нагруженных конструкционных изделий, работающих в сухих и влажных средах, при температурах до *350 ºС*, стойких к растворам электролитов, маслам и жидким топливам, а также изделий, которые должны обладать высокими диэлектрическими свойствами и радиопрозрачностью. Он нашел также применение для изготовления разнообразных высоконагруженных крупногабаритных изделий (кузовов легковых автомобилей, автобусов, кабин грузовых автомашин, ло-

док, катеров, авто- и железнодорожных цистерн, емкостей и аппаратуры химической промышленности).

Листовые пластмассы. Винипласт – листовой материал, представляющий собой пластифицированную на горячих вальцах при температуре *160–165 ºС* смесь поливинилхлорида, полученного методом эмульсионной полимеризации, и стабилизатора (углекислые соли свинца). В зависимости от назначения винипласт выпускают трех марок: *ВН* – непрозрачный, натурального цвета или окрашенный; *ВП* – прозрачный бесцветный или окрашенный; *ВНТ* – нетоксичный, используемый в пищевой промышленности.

Винипласт химически устойчив к воздействию почти всех кислот, щелочей и растворов солей любых концентраций, за исключением концентрированной азотной кислоты и олеума. Он имеет хорошие электроизоляционные свойства. Однако рабочая температура винипласта невелика: от *0* до *+40 ºС*. Винипласт подвержен хладотекучести; при резких изменениях температуры коробится. Он не горит, но при температуре *120–140 ºС* начинает размягчаться, что позволяет сваривать отдельные листы между собой. В пламени обугливается; температура разложения *160–200 ºС*. Склонен к старению под влиянием атмосферных воздействий и химических реагентов, при этом приобретает повышенную хрупкость и пониженную прочность на разрыв.

Изделия из винипласта изготовляют выдавливанием, штамповкой, гибкой, механической обработкой, сваркой, склеиванием первинилхлоридным клеем. Гибку, штамповку, вытяжку можно проводить при нагреве до *130 ºС*.

Из винипласта изготовляют емкости в химическом машиностроении, баки и сепараторы для кислотных и щелочных аккумуляторов, барабаны, держатели анодов, полиграфические клише, плитки для футеровки электролизных и травильных ванн.

Полиметилметакрилат (*органическое стекло*) – прозрачный термопластический материал, обладающий высокой твердостью, стойкостью к атмосферным воздействиям, водостойкостью, стойкостью ко многим минеральным и органическим растворителям, хорошими электроизоляционными и антикоррозионными свойствами. Его выпускают в виде прозрачных листов и блоков.

Органическое стекло растворяется в дихлорэтане. Раствор органического стекла в дихлорэтане используют в качестве клея для органического стекла. Листы из органического стекла надежно сваривают методом контактной сварки при температуре *140–150 ºС* и давлении *0,5–1 МПа*.

Органическое стекло применяют для остекления приборов, изготовления линз, прозрачных моделей для наглядного изучения режимов работы различных агрегатов. Особенно широкое применение органическое стекло нашло для остекления самолетов. Для этих целей употребляют ориентированное (вытянутое) органическое стекло и триплекс – два слоя стекла, между которыми находится слой вязкого прозрачного материала (бутварной пленки); детали остекления из этих материалов при пробитии локально разрушаются.

Целлопласты представляют собой термопластические материалы на основе эфиров целлюлозы. В настоящее время промышленность выпускает нитроцеллюлозный, этилцеллюлозный и ацетилцеллюлозный этролы и листовые материалы – целлон и целлулоид.

Целлопласты химически нестойки и растворяются в большинстве органических растворителей. Материалы на основе нитроцеллюлозы (этрол, целлулоид) очень горючи. Целлопласты применяют в машиностроении, главным образом для изготовления декоративных деталей отделки машин и приборов.

Пенопласты. Пенопласты – общее название газонаполненных пластмасс, они отличаются от монолитных полимерных материалов ячеистой структурой. По структуре они делятся на собственно пенопласты, в которых газообразные включения изолированы друг от друга тонкими стенками полимерного материала, и на поропласты (например, поролон) с сообщающимися ячейками. По свойствам они различаются: пенопласты водо- и нагревостойки, поропласты обладают высоким звукопоглощением и легко впитывают влагу.

По механическим характеристикам пенопласты можно разделить на три группы.

Пенополистиролы, относящиеся к жестким пенопластам, применяют преимущественно в производстве изделий, к которым предъявляются особенно высокие требования в отношении электроизоляционных качеств и радиопрозрачности (например, для изготовления антенных обтекателей).

Пенополивинилхлориды относятся к полужестким пенопластам. Их применяют в качестве материала, придающего жесткость конструкции, но снижающего его массу, в качестве заменителя пробки в производстве спасательных кругов и поясов, поплавков спасательных шлюпок, в качестве теплоизоляционного материала в строительстве самолетов. В производстве эластичных электроизоляционных материалов применяют полиэтиленовый пенопласт.

Эластичные пенополиэфироуретаны, относящиеся к эластичным пенопластам, обладают высокими прочностью, сопротивлением истиранию, нагревостойкостью. По упругим свойствам пенополиэфироуретан уступает пенорезинам, но превосходит их по масло- и бензостойкости, стойкости к действию озона и имеет больший диапазон рабочей температуры (от *–190* до *+120 ºС*) и значительно большую прочность на разрыв. Эластичный пенополиэфироуретан нашел широкое применение в амортизирующих средствах как заменитель металлических пружин, а также в качестве хладостойкого теплоизолятора в производстве теплой одежды.

Пенопласты хорошо обрабатываются как ручным, так и механическим способом на деревообрабатывающем оборудовании. Они соединяются между собой и с другими материалами преимущественно склеиванием. Листовые пенопласты на основе термопластических полимеров могут подвергаться при нагреве штамповке и гибке.

11.2. Покрытия из пластмасс

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 ºС*).

Газопламенным напылением получают покрытия из полиэтилена, полиамидов (капролактама, нейлона), поливинилбутираля, битумов, шеллака и др. Для получения окрашенных покрытий порошок смолы смешивают с пигментами. Для этой цели употребляют пигменты, сохраняющие цвет в процессе напыления: синий монстраль, сажу, желтый и красный кадмий, хромовую зелень, ультрамарин.

Полиэтиленовые покрытия, полученные газопламенным напылением, используют для защиты металлов от коррозии и воздействия агрессивных сред. Полиамидные покрытия обладают хорошей адгезией к металлу и отличаются высокими упругостью, бензо- и маслостойкостью.

Покрытия, получаемые газопламенным напылением из порошка поливинилбутираля, имеют хорошую адгезию к металлу, достаточно водостойки, не разрушаются от действия органических кислот, алифатических углеводородных растворителей и масел. Поливинилбутиралевые покрытия хорошо шлифуются и полируются.

Покрытия 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 в порошок полимера добавляют пигменты: двуокись титана, двуокись хрома, желтый или красный кадмий, двуокись марганца. Перед приготовлением смеси для напыления порошки полимера и пигмента высушивают. Затем порошок просеивают (до зернистости менее *200 мкм*). Взятые в необходимой пропорции порошки полимера и пигмента 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* ра-

за. Воздух для взвихрения порошка предварительно пропускается через влагомаслоотделитель и сухой чистый калорифер, нагретый до *50–60 ºС*.

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 равно мерным 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 кисти. Для удаления разбавителя нанесенный слой сушат. Затем деталь нагревают до температуры *260–275 ºС* 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. Отвердение покрытий производят при комнатной температуре. Напыление производят пистолетообразным аппаратом с помощью сжатого воздуха. Покрытия из стеклопластиков обладают хорошими прочностными свойствами и износостойкостью.

11.3. Изготовление деталей из пластмасс

Наиболее распространенный метод изготовления деталей из термореактивных пластических масс – прессование. Изготовление изделий из термореактивных пресс-материалов производится в стальных пресс-формах на прессах. В большинстве случаев применяют гидравлические прессы, так как они

обеспечивают постоянное давление на заготовку в течение всего процесса и, кроме того, они проще и надежнее в эксплуатации. Технологический процесс прессования деталей из пресс-материалов связан с физическими и химическими изменениями материала. Основными параметрами режима прессования являются давление, температура и время выдержки при нагревании под давлением.

Давление прессования определяет полное и своевременное заполнение пресс-форм, и, следовательно, нужно устанавливать такое оптимальное давление, которого достаточно для формирования детали, обеспечения нужной скорости замыкания пресс-формы. Слишком высокое давление прессования ухудшает качество деталей и ведет к более интенсивному изнашиванию пресс-формы. При недостаточном давлении изделие может получиться пористым, с толстым облоем. В зависимости от состава пресс-материала и конфигурации прессуемого изделия давление прессования обычно составляет *20–70 МПа*.

Температура прессования играет большую роль в технологическом процессе изготовления деталей. В первый момент прессования (при замыкании пресс-формы) материал, нагреваясь от стенок пресс-формы, становится пластичным (благодаря расплавлению связующего – смолы) и приобретает способность заполнять оформляющую полость пресс-формы под действием давления. В дальнейшем под действием нагрева в период технологической выдержки материал затвердевает благодаря переходу смолы в неплавкое и нерастворимое состояние. Температура нагрева зависит от вида пресс-материала. При прессовании фенопластов *t=150–180 ºС*, при прессовании аминопластов *t=130–145 ºС*.

Выдержкой при прессовании считается отрезок времени, начиная от момента замыкания пресс-формы до момента снятия давления при подъеме пресса для извлечения готового изделия. Выдержка при прессовании необходима для перевода материала в неплавкое и нерастворимое состояние. Выдержка зависит от толщины стенок изделия и для различных пресс-материалов находится в пределах *0,5–2,5 мин* на *1 мм* толщины стенок изделия. Суммарную выдержку определяют по наибольшей толщине стенок.

Прессовочный материал подвергают таблетированию, чтобы придать ему определенную конфигурацию и компактность.

Для ускорения технологического процесса прессования деталей и улучшения их качества рекомендуется применять предварительный подогрев материала непосредственно перед загрузкой его в пресс-форму.

Различают прямое прессование и литьевое прессование. Пресс-форма является инструментом, в котором происходит формообразование изделия. Поверхности формующих деталей пресс-форм (матрицы, пуансона, вкладышей, знаков и т. п.) хромируют (толщина покрытия *5–20 мкм*) и полируют до зеркального блеска. Это гарантирует прилипание пресс-материала к стенкам пресс-форм и получение деталей с хорошим внешним видом и удовлетворительными электроизоляционными свойствами.

Важным фактором улучшения качества и снижения брака деталей является автоматическое регулирование температуры пресс-форм.

Для изготовления изделий из листовых термопластов (органического стекла, винипласта, целлулоида и др.) применяется штамповка. Этот метод основан на способности термопластов переходить в высокоэластичное состояние при нагреве и затвердевать при охлаждении. Нагретый лист формуют в штампе или специальном приспособлении. Не снимая внешнего усилия изделие охлаждают, фиксируя приданную ранее форму.

Изделия открытого типа – тарелки, кюветы, корпуса приборов и машин и т.д. – изготавливают с помощью разнообразных формовочных машин и прессов.

Распространенным методом получения деталей из пластмасс является литье под давлением. Его осуществляют в специальных литьевых машинах в стадии вязкотекучего состояния пластмассы. Литье под давлением преимущественно применяют для изготовления изделий из термопластов. Так, при сравнительно низких температурах переходят в вязкотекучее состояние полистирол и его сополимеры, полиэтилен, капрон и другие полиамиды, пластифицированный поливинилхлорид и т. п. Литье под давлением, хотя и ограниченно, применяют также при переработке реактопластов. Некоторые технологические параметры изготовления деталей из пластмасс методом литья под давлением приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Технологические параметры изготовления деталей из пластмасс методом литья под давлением

Пластмассы	Температура нагрева материала, *°С*	Выдержка при охлаждении, *мин.*	Усадка при литье, *%*
Полиамиды:			
68	240–260	10–15	1,2–1,4
54	180–200	1–1,5	1–1,2
548	170–180	–	–
АК-7	255–265	20–30	–
Капрон	180–200	1–1,5	1–1,5
Полиуретан ПЧ-1	180–185	1,5	1–1,2
Полистирол	185–230	3–8	–
Полиакрилат	170–190	0,5–2	–
Полиэтилен	150–180	3–8	–
Полиформальдегид	200–225	–	1–3,5
Поликарбонат	280–302	–	0,6–0,7

Методом экструзионного формования – непрерывным выдавливанием термопластических материалов – изготовляют пленки, листы, трубы и раз-

личные профили. Процесс осуществляется на специальных прессах – экструдерах.

Области преимущественного применения различных видов конструкционных пластмасс указаны в таблице 11.2.

В таблице 11.3 приведены характеристики высокопрочных стеклопластиков.

Таблица 11.2 – Области применения конструкционных пластмасс

Вид пластмасс	Область применения
Порошкообразные, волокнистые и слоистые фенопласты	Корпуса, крышки, шкивы, зубчатые колеса, подшипники, вкладыши, фланцы
Поливинилхлорид, полиофелин	Втулки, тройники, фланцы, трубопроводы, футеровка
Полиамидные смолы	Узлы и детали антифрикционного назначения, подшипники, вкладыши, шестерни
Стеклопластики	Кабины, корпуса, бункера, панели и др.
Полиформальдегид, поликарбонат, пентапласт	Детали с высокой механической прочностью, химической стойкостью, низким коэффициентом трения, со стабильными размерами

Таблица 11.3 – Характеристики высокопрочных стеклопластиков

Материал	Прочность, $Н/мм^2$	Удельная вязкость, $кДж/м^2$	Плотность, $г/см^3$
Анизотропный стеклопласт *СВАМ*	900–950	290–310	1,9
Стеклотекстолит	250–300	100–150	1,65
Текстолит	85–100	36	1,35
Полиэтилен	10–24	16	0,9
Полистирол	35–40	14	1,1
Сталь *Ст3*	380–470	800	7,85

Контрольные вопросы

1. Какие материалы называют пластмассами?
2. Какие компоненты входят в их состав?
3. Как классифицируются пластмассы?
4. Какие пластмассы нашли наибольшее применение в конструкции автомобилей?
5. Что такое реактопласты?
6. Каковы их свойства?
7. Чем отличаются между собой термопластичные и термореактивные пластмассы?

12. РЕЗИНА И РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ

12.1. Состав резиновой смеси. Общие сведения о производстве РТИ

Каучук, соединяясь в процессе вулканизации с вулканизирующим веществом, образует *резину*. В качестве вулканизирующего вещества обычно применяют серу.

Для повышения механической прочности и износостойкости в состав резиновой смеси обычно вводят упрочняющий *наполнитель*. К числу таких наполнителей принадлежат вещества с предельно малыми размерами частиц и высокоразвитой поверхностью. Наиболее распространенным упрочняющим наполнителем является сажа.

В производстве светлоокрашенных резин и резин, предназначенных для работы при повышенных температурах, в качестве упрочняющего наполнителя применяют окись кремния, окись титана, которые находятся в мелкодисперсном состоянии.

В резиновую смесь вводят *ускорители* вулканизации, применяя для этого дифенилгуанидин и др. Иногда для повышения пластичности резиновой смеси и морозостойкости готовых изделий в резиновую смесь добавляют *пластификаторы* (стеариновая и олеиновая кислоты, парафины и др.).

Против старения – окисления резины кислородом воздуха – в резиновую смесь вводят противоокислители (противостарители), а для придания цвета добавляют красители (охра, ультрамарин).

Технология изготовления резины. Вулканизация

Процесс изготовления резины и резиновых деталей состоит из приготовления сырой резиновой смеси, получения из нее полуфабрикатов или деталей и их вулканизации. Этот процесс включает в себя следующие операции: вальцевание, каландрирование, получение заготовок, формование и вулканизацию, обработку готовых деталей.

Для приготовления сырой резины каучук разрезают на куски и пропускают через вальцы для придания пластичности. Затем в специальных смесителях каучук смешивают с порошкообразными компонентами, входящими в состав резины (вулканизирующие вещества, наполнители, ускорители вулканизации и т. д.), вводя их в резиновую смесь дозированно. Перемешивание можно производить и на вальцах. Таким образом получают однородную, пластичную и малоупругую массу – сырую резину. Она легко формуется, растворяется в органических растворителях и при нагревании становится клейкой.

Провальцованная сырая резина поступает на каландр, где получают листы заданной толщины. Из каландрованных листов заготовки деталей получают вырезкой по шаблонам, вырубкой штанцевыми ножами, формованием на шприц-машине.

Для изготовления резиновых деталей формовым способом используют гидравлические вулканизационные прессы с электрообогревом. Прессование

производят в пресс-формах. Литье под давлением применяют для изготовления деталей сложной конфигурации.

Для получения высокоэластичных прочных изделий (покрышек, трансмиссионных лент, ремней, рукавов) резиновую смесь наносят на высокопрочные ткани (корд) из хлопчатобумажного, полиамидного или полиэфирного волокна. Для сцепления резины с тканью применяют способы напрессовки или пропитывания. В первом случае тонкие листы каландрованной резины напрессовывают на ткань. Во втором случае ткань пропитывают раствором резиновой смеси (резиновым клеем) и сушат для удаления растворителя. Прорезиненную ткань раскраивают, собирают в пакеты и прессуют в изделия.

Многие резиновые изделия армируют металлическими деталями. Металлические детали (за исключением латунных) не обладают адгезией к резине, поэтому легко вырываются из изделия. Чтобы увеличить адгезию металлической арматуры к резине, на металл наносят клеевую пленку или осуществляют латунирование. Наиболее высокая прочность сцепления металла с резиной достигается нанесением на металлическую поверхность пленки клея «лейконат».

Любой процесс формования заканчивается процессом вулканизации. Каучук состоит из линейных молекул. При нагреве с серой (вулканизации) происходят укрупнение молекул и образование сетчатой структуры молекул, при этом каучук превращается в резину. В резине кроме линейных есть двух- и трехмерные молекулы. Усложнение и укрупнение молекул приводят к тому, что вещество приобретает упругость без снижения эластичности, а кроме того, и стойкость к термическим и химическим воздействиям. При этом добавление сажи в резину делает строение вещества кристаллическим, увеличивает его прочность.

Длительность и температура вулканизации определяются рецептурой резиновой смеси (типом каучука и эффективностью введенного ускорителя). Обычно вулканизацию проводят при температуре *120–150 °С*. При формовании деталей их вулканизация производится в пресс-формах на вулканизационных гидравлических прессах с паровым или электрическим обогревом. Формовой метод вулканизации дает более плотную однородную структуру, более точные размеры и более гладкую поверхность резинового изделия.

Почти все синтетические каучуки получают методом эмульсионной полимеризации в водных средах. Размеры образующихся в этих условиях частиц полимера получают близкими к размерам коллоидных частиц. В присутствии специально вводимых веществ (эмульгаторов) частицы полимеров образуют устойчивую эмульсию полимера в воде, которая называется *латексом*.

В настоящее время выпускается большое количество латексов, из которых можно непосредственно изготовлять резиновые изделия. Латексы применяют для получения фрикционных изделий, пропитки корда, изготовления шлифовальных кругов, резиновых нитей, волосяных эластичных подушек,

толстостенных изделий, замены клеев латексными пастами, получения резиновых пеноматериалов. Для получения резиновых изделий толщиной не более *0,2 мм* форму (обычно стеклянную) несколько раз погружают в латекс. После каждого погружения на форме остается слой латекса, из которого высушиванием удаляют воду.

Процесс изготовления изделий из латексов состоит из следующих операций:

1) смешивания латекса с вулканизирующими реагентами и другими компонентами резиновой смеси;
2) высаживания резины на форму в виде пленки по мере испарения воды;
3) вулканизации.

Вулканизированные резиновые детали в зависимости от предъявляемых к ним требований подвергают дополнительной обработке. В большинстве случаев достаточно удаления облоя (заусенцев), что можно выполнять небольшими ножницами с загнутыми концами. При наличии в деталях сквозных отверстий применяют вырубные ножи. Для окончательного удаления следов облоя проводят шлифование. В некоторых случаях для получения точных размеров требуются обтачиваниеъ и шлифование всей поверхности детали. Эти операции проводят в токарном патроне с помощью абразивных или фетровых кругов.

12.2 Свойства. Классификация. Характеристики. Особенности использования РТИ

Современная техника не может обходиться без резины. Из резины делают покрышки и шины колес, изоляцию проводов, водолазные костюмы, баллоны аэростатов, обувь, шланги и многое другое.

Применение резины в машиностроении обусловливается её ценными свойствами. Резина обладает высокой упругостью и способностью поглощать вибрации, хорошим сопротивлением истиранию и многократному изгибу, газо- и водонепроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами.

Резина в готовом изделии находится в термостабильном состоянии, она нерастворима (хотя обладает способностью набухать) в растворителях и непластична. Невулканизированная резиновая смесь обладает хорошей пластичностью, обеспечивающей формообразование всевозможных изделий.

Свойства вулканизированных резин в значительной степени определяются характеристикой каучуков.

В резине не все линейные молекулы скреплены в трехмерные, поэтому она не теряет полностью эластичности, присущей каучуку. Если содержание серы в резине довести до *30–35%*, то атомы серы скрепят все нитевидные молекулы каучука в трехмерные. При этом молекулы каучука становятся крупнее, эластичность уменьшается, твердость увеличивается, образуется материал – *эбонит*. Эбонит легко подвергается механической обработке. Он инертен, водостоек и широко используется в автотракторной, химической, электро- и радиотехнической промышленностях как диэлектрик.

Если соединение молекул каучука производить не через атомы серы, а непосредственно – углерод с углеродом (такая реакция соединения молекул каучука происходит при температуре выше *300 ºС*), получается твердое вещество – эскапон, обладающее исключительными электроизоляционными свойствами. *Эскапон* – прозрачная, стеклообразная масса, хорошо обрабатывается и полируется. Он обладает высокой химической стойкостью, выдерживает нагрев до *400–500 ºС*, востребован как высокочастотный диэлектрик в радиолокации и радиотехнике.

На способности каучука адсорбировать газы и его газопроницаемости основано производство пористых резин (губок). В качестве порообразователя в резиновые смеси вводят карбонат натрия в количестве *10–15%*. Пористая резина применяется для амортизаторов в качестве теплоизоляции, звукоизоляции и как материал для фильтров в автомобильной и химической промышленностях, в производстве изделий санитарии и гигиены, медицинских приборов, спортивных товаров. В промышленности используют многие виды стандартизованных и нормализованных резиновых изделий. Техническая листовая резина предназначена для изготовления прокладок, клапанов, уплотнителей, амортизаторов и др.

Резиновый шнур круглого, квадратного и прямоугольного сечений используют для работы в качестве уплотнительных деталей.

Резинотканевые ленты применяют для ленточных конвейеров. Ленты состоят из тканевого сердечника послойной конструкции и резиновой обкладки рабочей и нерабочей поверхностей. Для прокладок применяют прорезиненные ткани: бельтинг и уточную шнуровую ткань.

Плоские и клиновые *ремни* в зависимости от назначения и конструкции подразделяются на три типа: нарезные – для малых шкивов и больших скоростей; послойно завернутые – для тяжелых работ с прерывной нагрузкой и средних скоростей; спирально завернутые – для работ с небольшими нагрузками и при малой скорости (до *15 м/с*). Ремни всех типов изготовляют как с резиновыми обкладками (одной или двумя), так и без них. Приводные клиновые ремни состоят из кордткани или кордшнура, оберточной ткани, вулканизированных в одно изделие.

Рукава резинотканевые с металлическими спиралями и без них подразделяют на две группы: всасывающие – для работы под разрежением и напорно-всасывающие – для работы под давлением и разрежением. В каждой группе в зависимости от перекачиваемого вещества рукава подразделяют на следующие типы: бензомаслостойкие, для воды, воздуха, кислорода и нейтральных газов, слабых растворов неорганических кислот и щелочей, жидких пищевых продуктов.

Резинотканевые напорные рукава применяют в качестве гибких трубопроводов для перемещения под давлением газов, жидкостей и сыпучих материалов; они состоят из внутреннего и наружного резиновых слоев и одной или нескольких прокладок из прорезиненной ткани.

Технические резиновые трубки:

- кислотощелочестойкие предназначены для перемещения растворов кислот и щелочей;
- теплостойкие – для работы на воздухе с температурой до *+90 ºС*, в среде водяного пара с температурой до *+140 ºС*;
- морозостойкие – для работы при температуре до *–45 ºС*;
- маслобензостойкие;
- пищевые.

Резинотканевые шевронные многорядные уплотнения служат для обеспечения герметичности в гидравлических устройствах при возвратно-поступательном движении плунжеров, поршней и штоков, работающих в среде воды и нефтяных масел. Резиновые уплотнения применяют для валов, для работы в среде нефтяных масел и воде при избыточном давлении. Сальниковые набивки предназначены для заполнения сальниковых уплотнителей в целях герметизации места выхода движущейся детали механизма; пропитанные набивки обеспечивают смазку.

12.3. Технология хранения и транспортировки РТИ

РТИ транспортируют любым видом транспорта с соблюдением правил перевозки, установленных для данного вида транспорта.

Хранят в помещении при температуре в интервале от *0* до *25 ºС* и размещают в условиях, исключающих деформацию и повреждения.

При хранении *РТИ* должны быть защищены от воздействия прямых солнечных и тепловых лучей и находиться на расстоянии не менее *1 м* от отопительных приборов.

РТИ должны быть предохранены от попадания на них масла, бензина, керосина и других веществ, разрушающих резину, ткань и металл арматуры.

Допускается хранение *РТИ* под навесом и в неотапливаемых складах при температуре от минус *50* до *50 ºС*, в том числе хранение при температуре от *26* до *50 ºС* в течение не более *60* суток, в пределах гарантийного срока хранения. При этом запрещается подвергать их какой-либо деформации.

После хранения при минусовой температуре *РТИ* перед монтажом должны быть выдержаны при температуре *(20±5) ºС* не менее *24* часа или при температуре (*50±2) ºС* не менее *2* часов.

Предприятие-изготовитель рекомендует для установки *РТИ* в узлы и агрегаты обращаться в специализированные сервисные центры к квалифицированному техническому персоналу.

Контрольные вопросы

1. Перечислите состав резиновой смеси.
2. Что из себя представляют каучуки?
3. Назовите основные свойства *РТИ*.
4. Как классифицируются *РТИ*? Охарактеризуйте каждую группу.
5. Каким образом хранят и транспортируют *РТИ*?

13. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

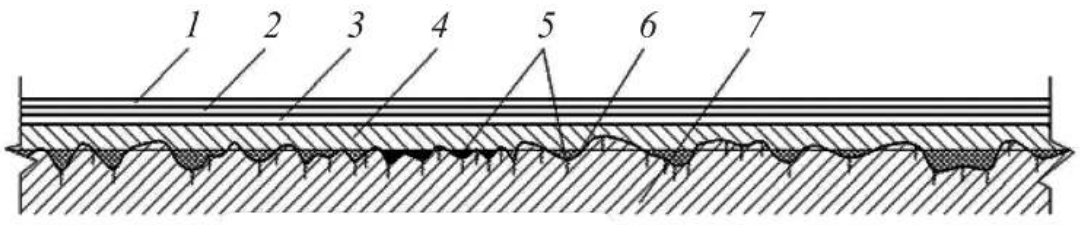
Лакокрасочные материалы (*ЛКМ*) представляют собой многокомпонентные составы, в жидком состоянии наносимые на поверхность изделий и высыхающие с образованием плёнок, удерживаемых силами адгезии. Высохшие плёнки называют лакокрасочными покрытиями.

13.1. Основные виды лакокрасочных материалов

Совокупность компонентов жидкой фазы таких материалов называют *лакокрасочной средой*; пленку, полученную в результате нанесения одного или нескольких слоев, – *лакокрасочным покрытием*, а окрашиваемую поверхность – *подложкой*. Толщина пленки при этом составляет, как правило, от нескольких десятков до сотен микрон.

Назначение такого лакокрасочного покрытия – придать обрабатываемой поверхности защитные (от влаги, паров, газов, коррозии, загнивания, возгорания), декоративные (вид, цвет, фактуру) или специальные технические (изоляционные, бактерицидные, фунгицидные, противообрастающие и др.) свойства.

По структуре и составу лакокрасочное покрытие представляет собой достаточно сложную и многослойную систему (рисунок 13.1).



1 – внешний слой (лак); *2* – промежуточный слой (краска); *3* – первичный слой; *4* – шпатлевка; *5* – подмазка; *6* – грунтовка; *7* – основание (подложка)

Рисунок 13.1 – Структура лакокрасочного покрытия

Оно состоит, как правило, из слоя грунтовки, выравнивающих слоев, одного или нескольких слоев шпатлевки с промежуточными слоями грунтовки, верхнего слоя грунтовки и одного-трех слоев окрасочного состава (первичного, промежуточного и внешнего). Каждый слой имеет соответствующее название и выполняет определенные функции:

- *грунтовочный слой* (грунт) считается фундаментом лакокрасочного покрытия. Он обеспечивает необходимую адгезию лакокрасочного покрытия к подложке, защищает её от воздействия разрушающих факторов и последующие слои покрытия – от воздействия подложки. Например, от щелочей, выделяющихся из бетона, или пластификаторов из пластмасс;
- *промежуточный* (*функциональный*) *слой* усиливает защитные функции грунтовочного слоя, выравнивает неровности грунта и подложки, улучшает

функциональные свойства покрытия (светоотражение, торможение диффузии и др.), повышает стойкость покрытия к механическим воздействиям;

- *покрывной* (*внешний*) *слой* принимает на себя все виды внешних воздействий и обеспечивает:
- основную защиту от действия атмосферы (ультрафиолетового излучения, осадков, влажности воздуха), химических агентов (кислоты, щелочи, агрессивных газов) и растворителей (жидкое моторное топливо);
- решение функциональных задач (декоративные, оптические, электрические и другие свойства).

Общая толщина всех слоев может достигать *1000 мкм* (*1 мм*) и более.

В зависимости от состава и назначения лакокрасочные материалы, применяемые в машиностроении, подразделяют на лаки, грунтовки, шпатлевки, краски (в том числе эмали).

Лаки – растворы пленкообразователей в органических растворителях. Они служат для получения прозрачных покрытий или нанесения поверхностного слоя по слою эмали для увеличения блеска покрытия.

Грунтовки, шпатлевки и краски представляют собой пигментированные лаки или олифы (высыхающие масла с добавкой катализатора процесса высыхания – сиккатива). Краски, изготовленные на лаках, называют *эмалевыми красками* или *эмалями,* а изготовленные на олифе – *масляными красками.*

Грунтовки применяют для нанесения нижних слоев покрытия, которые обеспечивают прочную адгезию с окрашиваемой поверхностью и обладают хорошими антикоррозионными свойствами.

Существует несколько типов грунтовок для металла. *Грунтовки,* содержащие в качестве пигментов железный сурик и цинковые белила, защищают металл от проникновения влаги. К числу таких грунтовок относятся *ГФ-020, ГФ-032ГС, ФЛ-ОЗ-К, ЭП-09Т* красная.

Пассивирующие грунтовки содержат в качестве пигментов цинковый, стронциевый кролы и другие хроматы. При проникновении влаги в слой грунтовки она частично растворяет пигмент и, обогащаясь ионами $CгO_4^{6-}$, пассивирует металл. К числу пассивирующих грунтовок относятся ГФ-031, ФЛ-ОЗ-Ж, *ФЛ-086*, *АК-069*, *АК-070* и др.

Фосфатирующие грунтовки, помимо пассивирующего действия, обеспечиваемого хроматными пигментами, фосфатируют металл вследствие присутствия фосфорной кислоты. По сравнению с остальными они обеспечивают значительно лучшую адгезию к черным и цветным металлам. Во многих случаях, применяя их, можно исключить предварительное фосфатирование поверхности. К числу фосфатирующих грунтовок относятся *ВЛ-02, ВЛ-08, ВЛ-023* и др.

Проекторные грунтовки содержат большое количество цинковой пыли, что обеспечивает катодную защиту металлов, особенно эффективную в морской воде.

Шпатлевки применяют для выравнивания поверхности; они имеют вязкость, значительно более высокую, чем остальные лакокрасочные материалы.

Это достигается введением в состав шпатлевки большого количества пигментов и наполнителей.

Адгезия шпатлевок к металлу обычно значительно хуже, чем грунтовок, и поэтому их наносят по слою грунтовки. Исключение составляют эпоксидные шпатлевки, которые можно наносить непосредственно на металл.

Эмали применяют для получения верхних слоев покрытий по слою грунтовки или шпатлевки. Они должны придавать покрытию требуемый цвет, укрывистость и стойкость в условиях эксплуатации.

Масляные краски служат для получения грунтовочных и верхних слоев покрытий.

13.2. Классификация лакокрасочных материалов

Все лакокрасочные материалы разделены на группы в зависимости от входящих в их состав основных пленкообразователей. Для условных обозначений каждой группы использована система, принятая в ГОСТ 9825–73 (таблица 13.1).

Таблица 13.1 – Условные обозначения групп лакокрасочных материалов

Группа	Условное обозначение	Группа	Условное обозначение
Глифталевые	ГФ	Алкидно- и масляностирольные	МС
Пентафталевые	ПФ	Полиэфирные ненасыщенные	ПЭ
Меламинные	МЛ	Полиуретановые	УР
Мочевинные	МЧ	Полиакриловые	АК
Фенольные	ФЛ	Сополимерно-акриловые	АС
Фенолоалкидные	ФА	Нитроцеллюлозные	НЦ
Эпоксидные	ЭП	Этилцеллюлозные	ЭЦ
Эпоксиэфирные	ЭФ	Перхлорвиниловые	ХВ
Сополимерно-винилхлоридные	ХС	Фторопластовые	ФП
Кремнийорганические	КО	Поливинилацетатные	ВЛ
Дивинилацетиленовые	ВН	Битумные	БТ
Каучуковые	КЧ	Канифольные	КФ
Полиамидные	АД	Масляные	МА

Внутри групп лакокрасочные материалы расположены по признаку преимущественного назначения материала в соответствии с ГОСТ 9825–73 (таблица 13.2).

Таблица 13.2 – Условные обозначения групп лакокрасочных материалов по назначению

Группа	Условное обозначение
Атмосферостойкие	1
Ограниченно атмосферостойкие (под навесом и внутри помещения)	2
Водостойкие	4
Специальные (покрытия, обладающие специфическими свойствами)	5
Маслобензостойкие	6
Химически стойкие	7
Термостойкие	8
Электроизоляционные	9
Грунтовки	0
Шпатлевки	00

Образованные лакокрасочные покрытия принято разделять по внешнему виду на:

– высокоглянцевые (*ВГ*);

– глянцевые (*Г*);

– полуглянцевые (*ПГ*);

– полуматовые (*ПМ*);

– матовые (*М*);

– глубокоматовые (*ГМ*).

Кроме вышеописанных классификаций лакокрасочные материалы классифицируются еще по некоторым признакам:

– по способу нанесения *ЛКМ* (валиком или кистью, электрофорезом, пульверизацией и т.д.);

– по условиям сушки (холодная, горячая);

– по декоративным свойствам *ЛКМ* (имитационные, шагреневые, рефлексные, молотковые, флуоресцентные, цировочные);

– по назначению *ЛКМ* (для покраски автомобилей, мебели, кожи, материи, электроизоляционного назначения);

– по эксплуатации при определенных условиях (для тропического климата, холодного, загазованного);

– по блеску (высокоглянцевые, глянцевые, полуглянцевые, полуматовые, матовые, глубокоматовые);

– по последовательности нанесения *ЛКМ* (пропиточные, грунтовочные, промежуточные, покрывные).

13.3. Эмали

Эмали, применяемые для окраски современных легковых автомобилей, отличаются разнообразием красивых цветов и оттенков, повышенным блеском и способностью длительно сохранять красивый внешний вид при длительной эксплуатации покрытий в различных климатических условиях. При окраске кузовов легковых автомобилей для внешних слоев покрытия на предприятиях-изготовителях применяют эмали различных цветов и оттенков, главным образом, меламиноалкидные, акриловые, водно-дисперсионные и очень редко нитроцеллюлозные.

Меламиноалкидные эмали изготовляют на основе смесей меламиноформальдегидной и алкидной смол. Высыхание эмалей происходит за счет испарения растворителей и поликонденсации смол. Для полного высыхания эмалей требуется повышенная температура до *+120–140 ºС* (горячая сушка), при которой образуется необратимая пленка.

После горячей сушки покрытие из меламиноалкидных эмалей приобретает глянец, который можно усилить полированием, высокую атмосферостойкость, эластичность и твердость, стойкость к изменению температуры в пределах от *–40 до +60 ºС*, высокую стойкость к воздействию воды, топлив и масел. Эмали наносят пневматическим распылением, а также распылением в электростатическом поле.

Меламиноалкидные эмали марок *МЛ-12, МЛ-197, МЛ-1110, МЛ-1121* и *МЛ-1198* применяют для окраски практически всех отечественных автомобилей.

Акриловые эмали изготавливают на основе акриловых и метакриловых смол, а также сополимеров, в которых основную часть составляют акриловые компоненты.

Характерные свойства всех акриловых лакокрасочных материалов – быстрое высыхание и высокая свето- и атмосферостойкость покрытия.

Для наружной окраски кузовов пневмораспылением эмали разбавляют до вязкости *18-22* с (по *В3-4*) смесью сольвента с бутилацетатом в соотношении *1:1*. Покрытие высыхает при температуре *150 ºС* в течение *0,5 ч*.

В автомобильный комплект ремонтной отечественной акриловой эмали Vika-акрил входят двухкомпонентные материалы на акриловой основе низкотемпературной сушки: эмаль *АК-1301* и лак *АК-1112,* отвердитель *1301*. Эмаль *АК-1301* и лак *АК-1112* смешиваются с отвердителем и разбавителем (по объему или по массе) в следующих соотношениях: эмаль *АК-1301* (*4 ча-*

сти) + отвердитель *1301* (*1 часть*) + разбавитель *1301* (*1,5–1,6 части*); лак *АК–1112* (*4 части*) + отвердитель *1301* (*1 часть*) + разбавитель *1301* (*1,8–1,9 части*).

Режимы отверждения эмали *АК-1301* и лака *АК-1112* составляют при температуре *20 ºС – 24 ч*, при температуре *80 ºС – 0,5 ч*. Для последующей полировки покрытия время сушки необходимо увеличить в *2* раза.

Водорастворимые эмали получают на основе водорастворимых специально синтезированных алкидных, феноло- и меламиноформальдегидных акриловых и других смол.

Эмали на водной основе представляют собой суспензии пигментов, полученные в результате перетира пигментов на водных эмульсиях различных пленкообразующих. Эмульсии состоят из мельчайших частичек пленкообразующих, находящихся в воде во взвешенном состоянии. В процессе нанесения эмали по мере удаления воды из нее происходит разрушение эмульсии, частицы пигмента и смолы начинают сближаться и соприкасаться. По мере слияния частиц смолы происходит образование сплошного покрытия.

Перед применением краски разбавляют дистиллированной водой или конденсатом до вязкости *20–30 с* (по *ВЗ-4*) при нанесении пневмораспылением и до *40–80 с* – валиком или кистью. После нанесения покрытие сушат при повышенной температуре.

Водорастворимые краски позволяют заменить значительную часть органических растворителей на воду, что удешевляет стоимость материалов, улучшает условия труда и экологию.

Нитроцеллюлозные эмали являются суспензиями пигментов в нитролаках с добавлением пластификаторов и смол. Высыхание нитроэмалей происходит вследствие испарения летучих растворителей при комнатной температуре *18–20 ºС*. При высыхании образуется обратимая пленка, способная вновь растворяться в растворителях. Из-за низкой адгезии по отношению к металлам нитроэмали наносят на хорошие грунты.

Покрытия из нитроэмалей относительно стойки к воздействию минеральных масел, бензина, а также слабых щелочных растворов. Длительное воздействие воды приводит к отслаиванию покрытия. Покрытия стойки к действию температур в пределах от *–40 до +60 ºС*, а при температурах выше *90 ºС* разрушаются и могут самовоспламениться.

При высыхании нитроэмалей образуется полуглянцевая поверхность, которую можно довести до зеркального блеска полированием. Для повышения способности нитропленок к полированию последний слой эмали покрытия сушат при температуре *+50–60 ºС*.

Нитроэмали наносят на окрашиваемую поверхность кузова с помощью краскораспылителей, реже – кистью. Быстрота высыхания нитроэмалей обусловливает их широкое применение для окраски кузовов при отсутствии устройств для горячей сушки покрытий.

При ремонтной окраске кузовов применяют эмали *МЛ-152, МЛ-1195* и *НЦ-11*. Покрытия из эмали *МЛ-1198* обладают металлическим эффектом.

*Эмаль МЛ-152 р*екомендуется использовать для ремонтной окраски небольших участков поверхности кузова. Покрытия из нее стойки к перепаду температур от *–50* до *+50 ºС*, а также к действию минеральных масел и бензина.

Эмаль наносят краскораспылителем или кистью на поверхность, предварительно покрытую грунтовкой *ГФ-021*. При первичной окраске эмаль наносят в два слоя, по старой краске – один слой. Первый слой эмали наносят на предварительно высушенный слой грунтовки, второй слой – на недосушенный первый слой после *5–7* мин выдержки при температуре *18–22 ºС*. Для сушки покрытия может быть использован рефлектор с лампой.

Эмаль МЛ-1195 – ремонтная, её применяют для составления эмалей различных расцветок при ремонтной окраске легковых автомобилей, используемых в умеренном и холодном климате. Промышленность выпускает эмали одиннадцати основных цветов: белую, синюю, зеленую, красную, вишневую, оранжевую, лимонную, желтую, красно-коричневую, горчичную, черную. Смешивая компоненты составляющих цветов в заданной массовой пропорции, добиваются необходимого цвета эмали.

Перед нанесением эмали поверхность покрывают грунтовкой *ГФ-021*, а дефекты выправляют шпатлевкой *МС-006*.

Эмаль НЦ-11 разных цветов предназначена для ремонтной окраски небольших дефектов покрытий автомобилей. Покрытие из цветных эмалей устойчиво в условиях окружающей среды умеренного и холодного климата в течение двух лет, из черной эмали – трех лет.

Наносить эмаль следует пневмораспылителем. Однако для устранения мелких дефектов можно наносить эмаль и кистью. На поверхность с грунтовкой *ГФ-021* или *ГФ-031*, или *ФЛ-03К* наносят пять-шесть слоев эмали. Для придания блеска покрытие шлифуют шкуркой с зернистостью *М63*, *М50* или *М40* и полируют пастой *№ 291* и полировочной водой *№ 1*.

Эмаль МЛ-1198, с помощью которой можно получить высококачественные покрытия с металлическим эффектом, поставляется в комплекте с лаком *МЛ-198*.

Эмаль выпускают серебристого, золотистого, сине-зеленого цветов и цвета «страдивари». Покрытия толщиной *75–85 мкм* обладают высокими физико-механическими и защитными свойствами.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой эмаль?
2. Состав и структура эмали.
3. Лак и его структура.
4. Аэрозольные эмали и лаки.
5. Роль керамики в составе лаков.
6. Технология нанесения лаков на поверхность изделия.
7. Какова роль лакокрасочных материалов в автомобилестроении?

14. ГРУНТОВКИ, РАЗБАВИТЕЛИ, ОТВЕРДИТЕЛИ

14.1. Грунтовки

Хорошо загрунтованная металлическая поверхность – гарантия надежности и долговечности лакокрасочного покрытия. Функция праймера (грунтовки) состоит не только в обеспечении высокой связи металла с покрытием. Хороший праймер образует прочную, стабильную перманентную связь изоляции с поверхностью, уменьшая межповерхностное натяжение.

Праймер должен иметь значительную прочность на растяжение и адгезию, чтобы сопротивляться напряжениям, большим чем когезионная прочность покрытия. Он должен быть полностью совместим с изоляционным материалом и не поддаваться разрушающему действию повышенных температур при наличии битумных мастик.

Поскольку основная функция грунтовки – межповерхностный слой между металлом и покрытием, он должен изготавливаться из материала, родственного покрытию. В противном случае появляется текучесть и скольжение одного материала по поверхности другого.

Для повышения адгезии грунтовки к металлической поверхности в нее вводятся различные присадки. Рекомендуются присадки различного назначения, в том числе поверхностно-активные вещества (*ПАВ*), пластификаторы. Среди них: зеленое масло, нафтенат меди, канифоль, низкомолекулярные каучуки – полиизобутилен с молекулярной массой *8–20 тыс*., кумароновая смола, присадка *Акор-1*, полидиен, трансформаторное масло.

Водно-дисперсионные грунтовки последнего поколения совмещают хорошее качество защиты металлических изделий от коррозии и экологическую полноценность материала.

Фирма «*ВАПА*» разработала и выпускает антикоррозионные латексные водоразбавляемые грунтовки серии *ВАК* (*ТУ 2316-003-231-82386-97*): *ВАК-02-ПК* (три вида) и *ВАК-02-ПР* (с преобразователями ржавчины).

Грунтовки на водной основе не содержат легковоспламеняющихся органических растворителей. Поэтому они имеют ряд преимуществ перед материалами на органической основе:

- полная пожаровзрывобезопасность при производстве, хранении, транспортировке и проведении окрасочных работ;
- не требует устройства в помещениях приточно-вытяжной вентиляции;
- комфортные условия труда;
- разбавление грунтовок для получения необходимой рабочей вязкости производится водой;
- обезжиривание поверхности перед нанесением грунтовки можно проводить водными растворами щелочей или моющих средств, при этом окрашивать можно влажную поверхность.

К недостаткам водоразбавляемых грунтовок следует отнести невозможность проведения работ при отрицательной температуре и недостаточную смачиваемость плохо обезжиренных («замасленных») поверхностей.

Грунт ВАК-02-ПК на основе акрилатных латексов предназначен для защиты чистых металлических поверхностей от коррозии. В состав грунтовки входят активные противокоррозионные пигменты, обеспечивающие длительную защиту от коррозии. Грунтовка применяется как самостоятельное двухслойное покрытие и сохраняет защитно-декоративные свойства в условиях умеренного климата не менее трех лет. В системе из одного слоя грунта и двух слоев краски (например, *ВАК-25, ВАК-35, ВАК-50*) или другого лакокрасочного материала на алкидной, эпоксидной или хлорвиниловой основе покрытие сохраняет защитно-декоративные свойства в условиях умеренного климата не менее *4-х* лет.

Нанесение материала производится на обезжиренные металлические поверхности кистью, валиком, краскораспылителем, наливом или окунанием изделий в раствор. Обезжиривать поверхность можно растворителем (уайт-спирит, ацетон и т.п.) или горячим раствором соды, мыла, технических моющих средств.

Расход грунтовки на один слой – *100–140 г/м²*.

Хранится и транспортируется грунтовка в плотно закрытой таре при температуре выше *0 ºС*. Состав может выпускаться в морозостойком варианте, в этом случае допускается хранение и транспортировка при температуре до *–20 ºС* не более *30* суток.

Грунтовка выпускается красно-коричневого (два вида, отличающихся по защитным свойствам и стоимости) и светло-серого цвета.

Грунтовки *ГФ-021* и *ГФ-0119* применяются для грунтования металлических и деревянных поверхностей под покрытие различными эмалями (*ГФ-021*), для тех же целей и временной защиты от коррозии крупногабаритных металлических конструкций на период монтажа и хранения (*ГФ-0119*). Перекрываются материалами типа *ПФ, ГФ, ЭФ, ФЛ* и др. Пленки грунтовок устойчивы к изменению температуры от минус *45 ºС* до *60 ºС*. Обеспечивают долговечность и противокоррозионную стойкость системы лакокрасочного покрытия. Грунтовка *ГФ-0119* в однослойном покрытии может применяться самостоятельно в качестве временной противокоррозионной защиты. Грунтовки могут применяться для окраски изделий в электрополе. Стойки к действию нитроэмалей, минерального масла, к растворам солей.

Температура нанесения – от *5 ºС* до *30 ºС*. Время высыхания грунтовки *ГФ-021* при *(20±2) ºС* не более *24* часов, при (*100±5) ºС* не более *35* минут; грунтовки *ГФ-0119* при (*20±2) ºС* не более *12* часов, при *(100±5) ºС* не более *35* минут. Расход грунтовки на один слой – *60–100 г/м²* в зависимости от способа нанесения. Рекомендуемое количество слоев – *1–2*. Гарантийнный срок хранения грунтовок – *6* месяцев со дня изготовления. Поверхность металла перед нанесением грунтовки должна быть зачищена до блеска от ржавчины и

окалины. Очищенная поверхность обеспыливается и обезжиривается, для чего протирается ветошью, смоченной в уайт-спирите, и сухой ветошью.

Перед окрашиванием необходимо убедиться, что грунтовка хорошо перемешана и однородна по всему объему тарного места. При необходимости грунтовки перед нанесением можно разбавить, причем процент разбавления не более *20* от массы грунтовки (для *ГФ-0119 – 25%).*

Для разбавления грунтовок и промывки инструмента можно использовать растворители в соотношении *1:1*. Хранить грунтовки следует в помещении, исключив попадание на них прямых солнечных лучей и влаги.

Материал огнеопасен. Нельзя работать вблизи открытых источников огня. Работы следует производить при хорошей вентиляции, в резиновых перчатках, с использованием индивидуальных средств защиты. Не допускать попадания в органы дыхания и пищеварения. При попадании материала на кожу промыть ее теплой водой с мылом.

Грунт-краска УНИКОРК акриловая вододисперсионная. Применяется для противокоррозионной защиты чистых металлических поверхностей, в том числе со следами коррозии (толщина коррозионного слоя не более *10 мкм*). Используется с последующим перекрытием различными типами красок, а также как самостоятельное атмосферостойкое покрытие.

Применяется в промышленности, автомобилестроении, при осуществлении ремонтных работ по металлу, в быту и других сферах деятельности.

Расход: *90–120 г/м²* на один слой; рекомендуется *1–2* слоя. Цвет: серый, черный.

Время высыхания: *1* час при температуре *+20 ºС*.

Грунт ЭФ-065 эпоксиэфирный. Применяется для противокоррозионной защиты металлической поверхности. Перекрывается эпоксидными, эпоксивиниловыми, акриловыми материалами. Используется для долговременной защиты различных металлоконструкций, подводного борта и надстроек судов от коррозии, для защиты днищ и крыльев автомобилей, гаражей, крыш домов и др.

Грунт ФЛ-03К фенолоалкидный. Применяется для грунтования поверхностей из черных металлов, а также деревянных поверхностей. Используется для защиты стальных металлоконструкций. Обеспечивает высокую адгезию, противокоррозионную стойкость покрытия.

Расход: *70–100 г/м²* на один слой; рекомендуется *2–3* слоя. Цвет: коричневый.

Время высыхания: *24* часа при температуре *+20 ºС*. В случае применения сиккатива – *8* часов при *+20 ºС*.

Грунт ВЛ-023 – двухупаковочный материал, который используется для грунтования металлических поверхностей, для защиты металла при межоперационном хранении, а также вместо фосфатирования и оксидирования перед нанесением лакокрасочных материалов.

Грунт ВЛ-023 представляет собой смесь двух компонентов, основы и кислотного разбавителя (спиртовой раствор ортофосфорной кислоты). Ме-

таллическая поверхность перед нанесением грунтовки должна быть сухой, предварительно очищена от пыли, жировых и других загрязнений, ржавчины, окалины и обезжирена.

Грунт наносится в один слой, он может перекрываться лакокрасочными материалами типа *ПФ, ГФ, ЭФ, ЭП, ФЛ, ХВ, ХС, АС, АК, НЦ, КО*.

Непосредственно перед применением основа грунтовки смешивается с кислотным разбавителем в соотношении (по массе) *5:1*, тщательно перемешивается, выдерживается в течение *30 мин* и при необходимости разбавляется растворителями *РФГ*, *648* или *Р-6* до рабочей вязкости в количестве не более *30%* от массы грунтовки. Жизнеспособность готовой грунтовки при температуре от *–10 ºС* до *10 ºС – 24 ч*, от *11 ºС* до *20 ºС – 8* часов; от *20 ºС* до *40 ºС – 4–6* часов.

Грунтовка наносится кистью, пневматическим и безвоздушным распылением в один слой, при температуре от *–10 ºС* до *+30 ºС*. Она может перекрываться любыми лакокрасочными материалами. Срок выдержки грунтовочного покрытия перед последующим нанесением *ЛКМ* не более *6* месяцев. Время высыхания при температуре *20 ºС* – не более *15* мин. Расход грунтовки на один слой – 110–130 г/м^2. Толщина одного слоя – *15–18 мкм*. Рекомендуемое количество слоев – *1–2*. Массовая доля нелетучих веществ – *25–27%.*

Материал огнеопасен. Нельзя работать вблизи открытых источников огня. Работы следует производить при хорошей вентиляции, в резиновых перчатках, с использованием индивидуальных средств защиты. Нельзя допускать попадания в органы дыхания и пищеварения. При попадании материала на кожу следует промыть ее теплой водой с мылом. Хранить эмаль в помещении, исключив попадание на нее прямых солнечных лучей и влаги.

14.2. Разбавители и растворители

Растворители – летучие жидкости, образующие со связующими (полимерными, масляными) истинные растворы, стабильные во времени.

Разбавители – хорошо совмещающиеся с красочным составом жидкости, образующие с ним устойчивые смеси (суспензии или эмульсии).

Основные свойства растворителей

1. Растворяющая способность (способность растворителя растворять связующее) зависит от его молекулярного строения. Здесь действует закономерность «подобное растворяется в подобном».

2. Скорость испарения (это свойство учитывают при выборе растворителей помимо их растворяющей способности). Если скорость испарения велика, то возможно формирование твердой пленки на поверхности незатвердевшего покрытия с образованием поверхностных дефектов, в частности, типа «шагрень» (усыхающая кожа). Если скорость испарения мала, то замедляется формирование твердого лакокрасочного покрытия, возрастает вероятность дефектов.

3. Как правило, от растворителей и разбавителей требуется химическая инертность к связующему и другим компонентам лакокрасочного материала.

Недостатки органических растворителей

1. Органические растворители токсичны, поэтому при работе с ними необходимо соблюдать меры безопасности: проветривать помещение, где ведутся работы, и применять защитные приспособления: перчатки, респираторы и даже противогазы.

2. Горючесть. Пары органических растворителей при определенных концентрациях с воздухом образуют взрывоопасные смеси. В помещениях, где хранятся материалы с растворителями или работают с ними, необходимо строго соблюдать противопожарные правила.

В зависимости от химического состава органические растворители делятся на:

- углеводородные (алифатические, ароматические, нефтяные и терпеновые, например, скипидар);
- кислородсодержащие (кетоны, спирты, эфиры);
- галогеносодержащие углеводороды.

Лучший растворитель с точки зрения минимальной токсичности и пожаробезопасности – вода. Но и у нее есть недостатки: с ней нельзя работать при температуре ниже *0 °С* и она не способна растворять большинство масляных красок и эмалей. Последний недостаток преодолим путем замены растворов полимеров на их водные дисперсии, в которых вода является не растворителем, а разбавителем.

Современные тенденции развития лакокрасочной промышленности связаны именно с разработкой материалов, не содержащих органических растворителей, например, водоразбавляемых или порошковых.

14.3. Сиккативы, отвердители, ускорители

Кроме основных компонентов пленкообразующего пигмента растворителя (разбавителя) в лакокрасочных композициях часто применяются различные целевые добавки: сиккативы, отвердители, ускорители.

Сиккативами называют соединения металлов (в основном свинца, марганца, кобальта, кальция, железа) с органическими кислотами. Соли нафтеновых органических кислот называют нафтенатами, кислот льняного масла – линолеатами, смоляных кислот канифоли – резинатами и т. д. Эти соли растворимы в органических растворителях.

Сиккативы применяют для ускорения высыхания лакокрасочных материалов, т. е. для сокращения продолжительности пленкообразования.

В зависимости от типа сиккатива процесс пленкообразования начинается либо с формирования поверхностной пленки (кобальтовые сиккативы), либо у подложки, а затем распространяется по всей толщине пленки (марганцевые и свинцовые сиккативы). Скорость высыхания пленок масляных лакокрасочных материалов пропорциональна количеству вводимого сиккатива

лишь до определенного предела. Если сиккатив вводится в количестве, превышающем оптимальное, скорость высыхания снова снижается. Следует учитывать, что действие сиккативов не прекращается и после высыхания пленки. Введение сиккатива в избытке может привести к преждевременному старению покрытий.

Отвердитель – химическое вещество, добавляемое к некоторым полимерным материалам (а также лакокрасочным материалам на их основе) для получения неплавкого нерастворимого продукта. Отвердители, как правило, вводят в материал непосредственно перед его употреблением.

Ускоритель – химическое соединение, вводимое для повышения скорости отверждения некоторых материалов.

При использовании добавок следует обратить внимание на необходимость обязательного выполнения требований по их применению, указанных на этикетке товарного продукта или в специально прилагаемой инструкции.

Игнорирование рекомендаций, неправильное дозирование отвердителей и ускорителей по принципу «чем больше, тем лучше», произвольное применение растворителей и разбавителей может привести к порче материала и неисправимому браку в работе.

Все виды лакокрасочных материалов должны выпускаться согласно *ГОСТ 9825-73*. Настоящий стандарт распространяется на основные лакокрасочные материалы и устанавливает порядок их обозначения по важнейшим признакам:

1) вид материала;

2) химический состав материала (род пленкообразующего вещества);

3) преимущественное назначение (применительно к условиям эксплуатации лакокрасочных покрытий).

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой растворители и отвердители?
2. Какие требования предъявляются к растворителям и отвердителям?
3. В каких целях используют отвердители?
4. Каков состав отвердителей?
5. Какими свойствами обладают растворители?
6. Каков состав растворителей?
7. Что такое сиккативы?
8. Для чего вводят в ЛКМ ускоритель?

15. ШПАТЛЕВКИ И КЛЕИ

15.1. Виды шпатлевок

Шпатлевки и наполнители используют для устранения вмятин, рисок и царапин на окрашиваемой поверхности кузова. Они представляют собой пастообразный состав из лака (олифы), пигментов и наполнителя (мела).

По составу шпатлевки делятся на однокомпонентные и двухкомпонентные.

Двухкомпонентные шпатлевки имеют высокую популярность. В их состав входят эпоксидные и полиэфирные смолы. Для применения таких шпатлевок необходим отвердитель. Имеют небольшую усадку.

Однокомпонентные шпатлевки обладают свойством высыхать без вспомогательных веществ. Шпатлевки из нитроцеллюлозы сохнут значительно дольше и имеют большую усадку. Зачастую их применяют при наличии небольших рисок.

По функциональным признакам можно выделить несколько основных видов шпатлевки.

Шпатлевка жидкая

С помощью жидкой шпатлевки можно достичь идеально ровной поверхности. Легко справляется с возникающими после шлифовки шероховатостями и неровностями. Можно наносить на иные шпатлевки и на металлические поверхности. Ориентирована на оперативный ремонт. Для применения данной шпатлевки необходим специализированный пистолет.

Шпатлевка мягкая

Данная шпатлевка отличается повышенной мягкостью и эластичностью. Легко принимает необходимую форму. Если наносить мягкую шпатлевку толстым слоем, то можно использовать её в качестве базы. Непринужденно шлифуется. Подходит для покрытия металлических поверхностей и стеклопластика.

Шпатлевка с алюминиевой пылью

Как правило, в состав такой шпатлевки входят наполнители из металлической стружки (пыли). Шпатлевка с алюминиевой пылью обладает высоким качеством, эластичностью и отличной адгезией к различным поверхностям. Ориентирована на ремонт обширных повреждений, отлично поддается шлифовке. Справляется с высокими механическими нагрузками в процессе эксплуатации. Достаточно часто используется в качестве основы. Совместима с алюминиевыми, стальными поверхностями, акриловыми грунтами и полиэфирными ламинатами.

Шпатлевка со стекловолокном

Благодаря наличию стекловолокна в составе формирует жесткий и надежный материал. Из-за данного наполнителя, похожего на волос, эту шпатлевку иногда называют «волосянкой». Закрывает сквозные дыры, крупные вмятины. Шпатлевка со стекловолокном устойчива к воде, отлично

справляется с дефектами, вызванными коррозией. Из всех видов шпатлевок наиболее прочная и грубая. Подходит для применения только в качестве базового слоя. Требует последующей обработки другими видами шпатлевок. Высокая адгезия к железу, стали, алюминию, стекловолокну и полиэфиру.

Шпатлевка по пластику

Данный вид шпатлевки создан специально для ремонта пластиковых поверхностей. Ориентирована на коррекцию таких элементов, как бампер, зеркальный корпус, декоративные составляющие. Благодаря мелкозернистой консистенции она с легкостью заполняет неровности. Шпатлевка по пластику выделяется повышенной эластичностью и простотой в использовании. Важно отметить, что реактивные грунты, материалы из тефлона и полиэтилена не подходят для использования данной шпатлевки.

Шпатлевка универсальная

Универсальная шпатлевка – это альтернатива шпатлевкам с крупными и маленькими порами. Подходит как для базовой коррекции, так и для финальной. Обладает отличными заполняющими свойствами. Имеет малый уровень эластичности, но это компенсируется сильной адгезией к металлу и грунту. Проста в нанесении и обработке. Выдерживает очень высокие и низкие температуры. Рекомендовано применять при коррекции небольших дефектов.

Шпатлевка финишная

Финишную шпатлевку также называют «доводочной», поскольку она выступает в качестве завершающего слоя. Имеет мелкозернистую консистенцию. Предназначена для заполнения пор, которые возникают после крупнозернистых шпатлевок. Используется на финальном этапе шпатлевания перед окрашиванием. Тонкий слой финишной шпатлевки отлично ложится на базовые шпатлевки, металлические поверхности и краски, подверженные предварительной обработке.

Выделим наиболее важные отличительные особенности среди всех разновидностей шпатлевок:

- Для оперативной коррекции шероховатостей и неровностей идеально подходит жидкая шпатлевка. Применяется только с помощью пистолета для окраски.
- Мягкая шпатлевка предназначена для ситуаций, когда необходим максимально эластичный материал, который с легкостью примет нужную форму.
- Шпатлевка с алюминиевой пылью отлично выдерживает большие вибрации и температуры, наиболее пригодна для ремонта двигателя.
- При крупных дефектах, сквозных дырах и коррозии лучшим решением будет шпатлевка со стекловолокном.
- Шпатлевка по пластику ориентирована исключительно на пластиковые поверхности.
- Универсальная шпатлевка выручает при любых повреждениях.
- Для финальной обработки шероховатостей и пор создана финишная шпатлевка.

Основные технологические показатели отечественных шпатлевок, применяемых при ремонтной окраске кузовов, приведены в таблице 15.1.

Шпатлевки *НЦ-007*, *НЦ-008*, *НЦ-009* предназначены для выравнивания загрунтованных металлических поверхностей, а также для исправления кузовов по выявительному слою эмали.

Таблица 15.1 – Отечественные шпатлевки, используемые при восстановлении кузовов

Параметр	Марка шпатлевки					
	НЦ-007	НЦ-008	НЦ-009	МС-006	ЭП-0010	ПФ-002
Цвет	Красно-коричневый	Защитный	Желтый	Розовый	Красно-коричневый	
Содержание сухого остатка, %	65	70	56	80	85	75
Растворитель или разбавитель	№ 646			Ксилол или № 646 (для распыления)	Ацетон, толуол, Р	Сольвент, Уайт-спирит
Рабочая вязкость по вискозиметру *ВЗ-4* при *20 ºС, с*	Не определяют			Не менее 18	20-30	–
Продолжительность сушки, ч, при влажности не более *65%* и температуре, *ºС* *18–22* *65–70*	 2 –	 2,5-3 –	 3-3,5 –	 0,25-0,3 –	 24 7	 24 –
Мокрое шлифование	Водостойкой шкуркой № 8–№ 4					Пемзой

Шпатлевку *ПФ-002* используют для общего и местного шпатлевания поверхностей кузова при отсутствии горячей сушки последующих слоев покрытия.

Шпатлевка *МС-006* служит для исправления мелких дефектов на загрунтованной поверхности, а также на поверхностях, покрытых эмалью.

Шпатлевки *ЭП-0010, ЭП-0020* являются грунт-шпатлевками и предназначены для выравнивания как загрунтованных, так и незагрунтованных поверхностей с глубиной дефектов до *15 мм*. Для нанесения распылителем

шпатлевку *ЭП-0010* разводят разбавителем. Перед употреблением на *100* массовых частей шпатлевки добавляют *8,5* частей отвердителя *№ 1* (*50%*-ный раствор гексаметилендиамина в этиловом спирте).

Для увеличения консистенции в эпоксидную шпатлевку добавляют асбестовый или железный порошок, тщательно перемешивают и только после этого вводят отвердитель. Технологическая способность подготовленной эпоксидной шпатлевочной пасты сохраняется *1–2 ч*, а разведенной разбавителем – до *24 ч*. Полиэфирная двухкомпонентная быстротвердеющая универсальная автомобильная шпатлевка предназначена для выравнивния металлических окрашенных и неокрашенных поверхностей кузова, заделки стыков, швов, трещин, раковин с возможным последующим воздействием температуры до *100 ºС* в течение не более *2 ч* и при горячей сушке окрашенного кузова. Шпатлевку можно использовать также для исправления дефектов неметаллических поверхностей – дерева, керамики, отдельных видов пластмасс, а также для склеивания их как между собой, так и в сочетании друг с другом.

Шпатлевочную пасту готовят порциями перед непосредственным употреблением, что обусловлено быстрым временем желатинизации (*10–15 мин*) и отвердения (*30–40 мин*). Массовое соотношение полуфабриката шпатлевки и отвердителя при приготовлении шпатлевочной пасты должно быть *100:3,2*. Недостаточная дозировка или передозировка отвердителя приводит к увеличению времени отвердения шпатлевки. Оставшееся количество приготовленной шпатлевочной пасты ни в коем случае нельзя возвращать в банку, в которой находятся остатки полуфабриката. Температура воздуха в помещении, где производят ремонтные работы с применением этой шпатлевки, должна быть не ниже *18 ºС*. Отвердевшую шпатлевку через *30–40 мин* с момента нанесения можно механически обрабатывать как сухим, так и мокрым способом с применением шлифовальных шкурок сначала крупной зернистости, а затем мелкой. Срок годности шпатлевки – один год.

Шпатлевки и наполнители фирмы «*SpiesHecker*» предназначены для восстановления лицевых поверхностей кузова легкового автомобиля любого класса.

Волокнистая шпатлевка *2507 (Raderal*) представляет собой двухкомпонентный материал, относящийся к 2К-полиэфирной системе. Она обладает хорошей пластичностью и высокой прочностью. Благодаря содержанию в шпатлевке стекловолокна, она пригодна для ремонта проржавевших частей кузова с ослабленной несущей способностью.

Состав самой шпатлевки и её отвердителя вреден для здоровья человека.

Шпатлевка пригодна для нанесения на поверхности деталей кузова, изготовленных из стали, алюминия, оцинкованной стали, стеклопластика. Её нельзя наносить на поливинилбутиленовые (кислотоотверждаемые) реактивные грунты или 1К-грунты (например, искусственная смола), на термопластичные или вязкоэластичные лаковые покрытия. В особых случаях можно наносить шпатлевку на указанные покрытия, но при этом обрабатываемая поверхность должна быть обязательно зачищена до голого металла.

Полиэфирная шпатлевка *2030 (Raderal Vario*) – материал универсального применения, относится к 2К-полиэфирной системе, которая пригодна также и для оцинкованных поверхностей. Шпатлевка пластична, легко шлифуется и обладает высокой прочностью и особенно хорошо подходит для коротковолновой и средневолновой инфракрасной сушки. Может применяться как в качестве наполняющей, так и тонкой шпатлевки. Шпатлевочное покрытие устойчиво к температуре до *+80 ºС*.

Состав самой шпатлевки вреден для здоровья человека, а отвердитель оказывает раздражающее действие на нервную систему человека.

Шпатлевка пригодна для нанесения на поверхности деталей кузова, изготовленных из стали, алюминия, оцинкованной стали, стеклопластика, имеющих старое лакокрасочное покрытие, отвердевший *2К*-наполнитель или *2К*-грунт. Её нельзя наносить на поливинилбутиленовые (кислотоотверждаемые) реактивные грунты или *1К*-грунты (например, искусственную смолу), на термопластичные или вязкоэластичные лаковые покрытия. В особых случаях можно наносить шпатлевку и на указанные покрытия, но при этом обрабатываемая поверхность должна быть обязательно зачищена до металла.

Полиэфирная шпатлевка *2511 (Raderal Vario*) – материал универсального применения, относится к *2К*-полиэфирной системе, особенно пригодна для оцинкованных поверхностей кузовов. Шпатлевка пластична, легко шлифуется, обладает высокой прочностью и устойчива к температуре до *+80 ºС*. Хорошо подходит для коротковолновой и средневолновой инфракрасной сушки. Может применяться как в качестве наполняющей, так и тонкой шпатлевки.

Состав самой шпатлевки вреден для здоровья человека, а отвердитель оказывает раздражающее действие на нервную систему человека.

Шпатлевка применяется для нанесения на поверхности деталей кузова, изготовленных из стали, алюминия, оцинкованной стали, стеклопластика, имеющих старое лакокрасочное покрытие, отвердевший *2К*-наполнитель или *2К*-грунт. Её нельзя наносить на поливинилбутиленовые (кислотоотверждаемые) реактивные грунты или *1К*-грунты (например, искусственную смолу), на термопластичные или вязкоэластичные лаковые покрытия. В особых случаях можно наносить шпатлевку и на указанные покрытия, но при этом обрабатываемая поверхность должна быть обязательно зачищена до голого металла.

Шпатлевка *0911 (Raderal*) является тиксотропной, полиэфирной, относящейся к 2К-полиэфирной системе. Она пригодна для нанесения на уже подготовленную поверхность для исправления небольших повреждений и заполнения пор. Шпатлевка пластична при нанесении, покрытие хорошо шлифуется и устойчиво к температуре до *+80 °С*.

Состав шпатлевки вреден для здоровья человека, а отвердитель оказывает раздражающее действие на нервную систему человека. Шпатлевка поставляется в виде пастообразной массы, имеющей температуру воспламенения выше *+23 ºС*.

Шпатлевка пригодна для нанесения на поверхности деталей кузова, изготовленных из стали, алюминия, стеклопластика, имеющие старое лаковое покрытие и отвердевший *2К*-наполнитель. Возможно шпатлевание пластмассовых деталей, загрунтованных с применением эластичного наполнителя *3300* (*Permacron 1:1*) или эластичного грунта *3304* (*Priomat*), а также поверхностей, предварительно обработанных с применением *2К*-полиэфирных шпатлевок (*Ra-deral*).

Шпатлевку нельзя наносить на поливинилбутиленовые реактивные грунты или *1К*-грунты (например, искусственную смолу), на термопластичные или вязкоэластичные лаковые покрытия. В особых случаях можно наносить шпатлевку и на указанные покрытия, но при этом обрабатываемая поверхность должна быть обязательно зачищена до голого металла.

Шпатлевка жидкая *3508 (Raderal*) серо-бежевая является двухкомпонентным материалом на основе ненасыщенных полиэфирных смол, относящихся к *2К*-полиэфирной системе. Обладает сильными наполняющими свойствами, наносится распылением, особенно пригодна для заполнения пор и неровностей грубо обработанных поверхностей деталей кузова. Покрытие быстро высыхает и легко шлифуется.

Шпатлевка пригодна для нанесения: на зачищенные до голого металла сталь и алюминий; на оцинкованную сталь, загрунтованную с применением реактивного грунта *8583* (*Permacron 4:1*); на отвердевшее, плохо поддающееся растворению старое лакокрасочное покрытие; на поверхности, шпатлеванные *2К*-полиэфирными шпатлевками (*Raderal*); на стеклопластики, тщательно обезжиренные и отшлифованные.

Шпатлевку нельзя наносить на поливинилбутиленовые реактивные грунты или *1К*-грунты, а также на термопластичные лакокрасочные покрытия.

Шпатлевка *2521* (*Raderal*) – материал на основе полиэфирных смол, относящийся к 2К-полиэфирной системе, может наноситься кистью. Материал пригоден для заполнения небольших неровностей, царапин и пор, в частности, на выступах, ребрах, в пазах и изгибах деталей. Отличается быстрым высыханием, хорошей шлифуемостью и длительной жизнеспособностью. Устойчив к температуре до *+80 ºС*.

Материал пригоден для нанесения: на сталь и алюминий; на отвердевшее, плохо поддающееся растворению старое лакокрасочное покрытие; на грубо зашпатлеванные поверхности; на поверхности, загрунтованные с помощью красно-коричневого реактивного грунта *8583* (*Permacron 4:1*).

Материал нельзя наносить на поливинилбутиленовые (кислотоотверждаемые) реактивные грунты или *1К*-грунты (например, искусственную смолу), на термопластичные или вязкоэластичные лаковые покрытия, на оцинкованные поверхности.

Шпатлевка *7715* (*Permacron*) – однокомпонентная шпатлевка, на основе специальной комбинации акриловых смол, не требующая дополнительных компонентов для высыхания. Шпатлевка имеет нейтральный светло-бежевый

цвет и пригодна для последующей обработки подготовленной поверхности, а также для шпатлевания небольших повреждений, в том числе на зачищенном голом металле. Она пластична при нанесении, не имеет пор и очень хорошо шлифуется по истечении короткого времени высыхания.

Шпатлевка пригодна для нанесения: на зашлифованную до голого металла сталь; на хорошо отшлифованное старое лакокрасочное покрытие, шпатлевку *Raderal*, высохшие грунты или наполнители.

Ее нельзя наносить непосредственно на голый алюминий или голую оцинкованную сталь, а также на термопластичные лакокрасочные покрытия.

Порозаполнитель *3311* (*Priomat*) представляет собой специальную однокомпонентную наполняющую шпатлевку для устранения небольших пор на поверхностях деталей автомобиля, изготовленных из полиуретановых материалов. Она надежно закрывает поры и обеспечивает требуемое качество лакокрасочного покрытия.

Шпатлевка пригодна для нанесения на детали из пенопластика на основе полиуретана, имеющие поры на наружной поверхности.

15.2. Клеи

Клеями называют жидкие или пастообразные многокомпонентные системы, основой (связующим) которых являются высокомолекулярные вещества, обладающие высокой адгезией к твердым поверхностям.

Склеивание уже давно применяется для соединения деревянных и резиновых деталей. В последние годы созданы клеи, обеспечивающие надежное соединение тканевых материалов, пластмассовых деталей и, наконец, металлических деталей, а также металлических с неметаллическими.

Клеевые и клеесварные соединения деталей, как известно, уже стали важной составной частью технологии изготовления автомобильной техники, а также ее ремонта. В частности, их используют для приклеивания ветровых стекол, некоторых панелей и т. п.

Клеевые соединения не только весьма технологичны, но и обеспечивают высокие потребительские качества автомобильной техники.

При склеивании конструкция деталей или механизмов не ослабляется за счет отверстий для болтов и заклепок и не утяжеляется из-за дополнительного веса крепежного материала и накладок. В то же время прочность клеевого шва зачастую не уступает прочности механических соединений.

Клеевые соединения не лишены и недостатков. Многие из них имеют низкую теплостойкость, а некоторые со временем ухудшают свойства вследствие старения клеевой прослойки.

Процесс склеивания сводится в общем виде к следующим операциям: подготовке склеиваемых поверхностей, нанесению на них клея, опрессовыванию и отверждению клеевого слоя.

Основным показателем качества клея является механическая прочность клеевого шва. Клеевой шов испытывают на разрыв и скалывание и опреде-

ляют удельную нагрузку, при которой шов разрушается. Прочность клеевого соединения зависит от сил адгезии и когезии. Кроме того, клей в жидком состоянии должен хорошо растекаться и смачивать склеиваемые поверхности, а при отверждении давать минимальную усадку. Прочность отвержденного клея должна быть по возможности не менее прочности материала склеиваемых поверхностей и не уменьшаться с течением времени и при изменении температуры. Клеевой слой не должен оказывать коррозионного воздействия на склеиваемые поверхности, взаимодействовать с продуктами, с которыми склеиваемое изделие соприкасается при эксплуатации, и разрушаться под их действием.

По назначению клеи подразделяют на универсальные и специальные. Универсальные клеи предназначены для склеивания разнородных твердых и эластичных материалов в различных сочетаниях: металл – металл, металл – дерево, металл – резина, пластмасса – стекло и т. п. Специальные клеи служат для склеивания определенных материалов.

Классификационным признаком клеев является вид связующего, в соответствие, с чем различают клеи карбинольные, фенольные, эпоксидные, полиамидные. Кроме того, каждый тип клея в свою очередь подразделяется на ряд марок. В связи с этим современный ассортимент синтетических клеев чрезвычайно обширен.

Основным видом универсальных клеев являются синтетические клеи, используемые во всех отраслях техники. При помощи синтетических клеев можно создать высокопрочные, эластичные, водо-, масло- и топливостойкие соединения, выдерживающие вибрацию и динамические нагрузки. Синтетический клей в наиболее общем виде представляет собой композицию, в которую входят: связующее (или их сочетание), растворитель, наполнитель, отвердитель и ускоритель отверждения.

В качестве связующего используются термопластичные и термореактивные полимеры (смолы). Из термопластичных наибольшее распространение получили производные акриловой и метакриловой кислот, поливинилацетата, полиизобутилена, каучука и резины, а из термореактивных – фенолоформальдегидные, эпоксидные и кремнийорганические соединения. Клеи на базе термопластичных полимеров образуют обратимую пленку, размягчающуюся при нагревании.

Для придания определенной вязкости в клей вводят ацетон, спирт, смеси бензина с этилацетатом, бутилацетат с ацетоном или бензином, а также другие растворители в зависимости от марки клея.

Для уменьшения усадки клея при отверждении и предотвращения появления трещин и разрушения клеевой пленки в клей добавляют порошкообразные наполнители (металлы, стекло, фарфор, цемент, камень и др.).

Отвердитель и ускоритель отверждения добавляют к клеям, содержащим термореактивные полимеры, для протекания процессов, связанных с образованием клеевой пленки.

Широкое применение получили клеи на основе эпоксидных смол. Эти клеи отверждаются как при обычных, так и при повышенных температурах, обладают хорошими физико-механическими характеристиками и высокой адгезией к металлам и многим неметаллическим материалам. Для них характерна хорошая водо- и маслобензостойкость. При ремонте используют клеи *ЭПО* (*ТУ 38-10972-82), ЭДП (ТУ 6-15-1070-82*), эпоксидную шпатлевку (*ТУ 6-15-662-85*) и др.

При производстве автомобилей применяют эпоксидный клей горячего отверждения *УП-5-207 (ТУ 6-05-241-221-83*). Клей обладает очень хорошим свойством склеивать замасленные поверхности. Он применяется для соединения внутренней и наружной панелей двери и проклейки зафланцовок капота и багажника. Неотвержденный клей не вымывается моющими растворами при подготовке кузова под окраску. Отверждение клея происходит в окрасочных камерах. Кроме того, широко применяют клеи бутираль-фенольный (*БФ*) и карбонильный.

Широкое применение нашли клеи *БФ-2, БФ-4* и *БФ-6* – спиртовые растворы термореактивной фенолформальдегидной смолы, модифицированной (для повышения эластичности швов) бутваром. Первые два служат для соединения твердых материалов, а третий (*БФ-6*) – для склеивания тканей между собой и для прикрепления их к металлам, пластмассам и т. д. Все клеи серии *БФ* поставляются потребителям в готовом виде. Клеевое соединение из них сушат при температуре *90–100 ºС* в течение *1–3 ч*.

При ремонте автомобилей клей нашел применение для соединения фрикционных накладок с тормозными колодками и непригоден для склеивания эластичных и гибких материалов, таких как резины, ткани и т. д.

Клей применяется также при ремонте пластмассовых деталей. Детали из термореактивных пластмасс склеиваются смоляными клеями (*ВИАМ-Б-3, БФ-2, БФ-4, К-17* и др.) на основе фенолоформальдегидных эпоксидных и других смол. Для склеивания органического стекла применяется дихлорэтан или клей, представляющий собой раствор опилок органического стекла в муравьиной кислоте или в дихлорэтане.

Необходимо отметить, что, несмотря на хорошо известные достоинства клеевых соединений, широкого применения в автомобилестроении они не получили, особенно при изготовлении кузовов автомобилей. Основная причина – длительность процесса отверждения клеевых швов, который не укладывается в ритм конвейерной сборки. Автомобили с конвейера сходят через минуты, а большинство самых совершенных клеев твердеют в течение нескольких часов, а некоторые – в течение суток.

Однако положение уже начало меняться: появились клеи нового поколения, способные полимеризоваться за *3–30 с*. Дело в том, что в их состав вводят специальные добавки – фотоинициаторы, которые при обычных условиях в химическую реакцию не вступают, а при облучении светом с определенной длиной волны, наоборот, становятся мощными катализаторами. Та-

ким образом, все операции по нанесению клея и сборке узлов и агрегатов могут выполняться в том же, что и при бесклеевой сборке, режиме.

До начала облучения клей остается в неотвержденном состоянии. После этого швы, образующиеся при сборке, в течение нескольких секунд подвергаются ультрафиолетовому облучению. За это время фотоинициаторы расщепляются, переходят в свободные радикалы, которые инициируют практически мгновенную цепную реакцию – полимеризацию облученной части клея. Но, к сожалению, весь шов полимеризуется только в случае соединений поверхностей типа «прозрачная на прозрачную». В случае же «прозрачная на непрозрачную» – лишь открытая облучению его часть. Поэтому в настоящее время клеи ультрафиолетового отверждения применяют чаще всего для крепления автомобильного остекления (силикатное стекло прозрачно в диапазоне *365–420 нм*) и прозрачных в диапазоне *420 нм* пластмассовых изделий. Используемые при этом клеи – акриловые.

Кроме акриловых клеев и герметиков со вспомогательными системами полимеризации все шире применяются такие же анаэробные материалы (твердеющие при отсутствии контакта с кислородом воздуха).

Их применяют для фиксации, стопорения в герметизации резьбовых и нерезьбовых соединений.

Для автомобилестроения, как уже отмечалось, очень важным является освоение клеевой технологии. Не случайно ею, в частности, клеями (и вообще адгезивами) с ультрафиолетовым отверждением, занимаются очень многие фирмы.

Наиболее известная из них – австрийская «*Локтайт*». Она выпускает более сотни марок клеев и герметиков различной химической природы, назначения (сборка двигателя, трансмиссии, подвески, рулевого управления, тормозов и кузовов легковых автомобилей) и систем полимеризации.

Клеи «*Локтайт*» обладают рядом уникальных свойств. В частности, они обеспечивают клеевому шву *99%*-ую оптическую прозрачность и регулируемое (*1,4–1,55*) значение показателя преломления, что позволяет использовать их для склеивания прозрачных материалов и получать невидимый клеевой шов. Некоторые (например, анаэробный «*Локтайт 661*») могут работать в интервале рабочих температур от *–55 до 230 °С*, с пределом прочности при сдвиге *35 МПа (350 кгс/см²*), при отрыве – *37–42 МПа* (*370–420 кгс/см²),* временем схватывания *3 с*. Поэтому данный клей применяют при установке подшипников в корпуса и на валы, для фиксации роторов, шестерен, звездочек и шкивов на валах, для крепления втулок, гильз, стаканов в корпуса, герметизации заглушек на блоках двигателей и корпусах редукторов. Применение такого клея позволяет упростить конструкцию (за счет ликвидации шпоночных канавок и штифтов) и благодаря мгновенному его частичному отверждению во много раз ускорить процесс сборки узлов и агрегатов. Кроме того, при монтаже подшипников, например, слой адгезива компенсирует неточности центрирования деталей узла. Валы же и подшипники,

смонтированные без нарушения центрирования, но с натягом, служат дольше, их можно многократно использовать после демонтажа и очистки.

Для полимеризации клеев фирмы «*Локтайт*» (для их полимеризации) можно использовать лампы ультрафиолетового излучения типа *ДРТ-400* и специально разработанную установку, которая обеспечивает не только регулирование интенсивности излучения ламп, но и защиту оператора от ультрафиолета.

Клеи для резины. Клеи для приклеивания резины подразделяют на клеи для приклеивания с вулканизацией и для приклеивания «на ходу». Промышленность производит клеи резиновые (для соединения резиновых деталей друг с другом) и для приклеивания резины к металлам, стеклу, пластмассам и другим твердым материалам.

Контрольные вопросы

1. Что называют шпатлевками?
2. Какими свойствами обладают шпатлевки?
3. Из каких компонентов состоят шпатлевки?
4. Какую систему называют клеями?
5. Как подразделяют клеи?
6. Какие клеи получили наибольшее применение в автомобилестроении?
7. Что представляет собой клей из резины?

16. ТЕХНОЛОГИЯ ОКРАСКИ И ОТДЕЛКИ

Технологический процесс окраски состоит из следующих основных операций: подготовки поверхностей под окраску; грунтования; шпатлевания; шлифования; нанесения промежуточных и внешних слоев покрытия, сушки, полирования.

16.1. Подготовка поверхностей под окраску

При плохой подготовке покрытие будет отслаиваться и иметь плохой вид; кроме того, возрастет трудоемкость отделочных операций. В отдельных случаях пористые материалы предварительно пропитывают специальными составами для заполнения пор, антисептирования, защиты от воспламенения и т. п.

Антикоррозионная защита и достаточная сцепляемость покрытия с металлом могут быть обеспечены лишь при тщательной очистке обрабатываемого изделия от посторонних загрязнений. Детали и изделия, поступающие под окраску, часто имеют механические дефекты: заусенцы, вмятины, забоины, царапины, раковины, острые кромки и т. д. Особенно важно полное удаление окалины, ржавчины, формовочной земли, остатков сварочных флюсов и других загрязнений.

Перед нанесением защитных или декоративных покрытий детали и изделия подвергают механической, термической, химической или электрохимической обработке. Механическая обработка применяется для удаления окалины, ржавчины, шлаковых включений, старой краски, устранения царапин, неровностей и других дефектов. Термической обработкой удаляют окалину, ржавчину, а также старую краску. Химическую и электрохимическую обработку проводят для удаления окалины и продуктов коррозии, жировых загрязнений.

Механическая обработка может выполняться в виде пескоструйной, дробеструйной или дробеметной очистки, крацевания, шлифования и очистки ручным инструментом.

Пескоструйная очистка является одним из эффективных методов подготовки поверхности. Сущность процесса состоит в том, что струя просеянного и просушенного кварцевого песка направляется сжатым воздухом через специальное сопло на поверхность изделий. Песок, ударяясь о поверхность изделия, очищает ее; поверхность становится серой, матовой, с равномерной шероховатостью.

Крацевание – процесс обработки изделий с помощью быстро вращающихся проволочных щеток.

Шлифование придает изделиям ровную и гладкую поверхность и удаляет окисные пленки; оно осуществляется на станках или ручным способом с помощью абразивных дисков или кругов, шлифовочными шкурками, порошкообразными абразивными материалами.

Термическая обработка поверхности производится с помощью кислородно-ацетиленовой или керосиново-кислородной горелки. Окалина, имея небольшой коэффициент теплового расширения, при термической обработке растрескивается и отслаивается. Ржавчина разрыхляется и легко удаляется проволочной щеткой или наждачной шкуркой. Термический способ очистки отличается экономичностью и высокой производительностью; он применяется для изделий, имеющих толщину не менее *5 мм* (для предотвращения коробления и деформации металла). Окрашивание производят сразу же после очистки, пока металл еще теплый, – это сокращает срок сушки лакокрасочных покрытий.

Травление – химическая и электрохимическая обработка поверхностей, т. е. обработка металлических изделий в растворах кислот, кислых солей или щелочей в целях удаления окислов с поверхностей деталей. При травлении детали погружают в соответствующие растворы, реагирующие с окислами данного металла. Перед травлением изделия очищают от жировых загрязнений. Электрохимическое травление дает возможность значительно быстрее провести травление и сократить расход кислоты.

Непосредственно перед нанесением защитных покрытий детали подвергают *декапированию* – быстрому удалению легкого налета окислов, образующихся на поверхности очищенных изделий.

Удаление с поверхности изделий жировых и масляных загрязнений проводят с помощью веществ, растворяющих жиры и масла или их эмульгирующих (собирающих в эмульсию).

Обезжиривание осуществляют органическими и щелочными растворителями, электрохимической обработкой. При обезжиривании органическими растворителями обычно применяют бензин, лаковый керосин, скипидар, дихлорэтан и другие жидкости.

Хлорсодержащие растворители хорошо растворяют жиры и масла; они не взрывоопасны, не воспламеняются (обезжиривание можно проводить при повышенной температуре). Недостатком органических растворителей, особенно хлорсодержащих, является токсичность их паров.

Для обезжиривания железа, стали, чугуна, никеля, меди и других металлов, трудно растворяющихся в щелочах, используют растворы едких щелочей. Для изделий из олова, свинца, цинка, алюминия употребляют растворы щелочных солей, например углекислый натрий, фосфорнокислый натрий, углекислый калий, жидкое стекло, мыло. Обычно пользуются смесью солей, а для ускорения обезжиривания добавляют небольшое количество едкого натра. При электрохимическом обезжиривании употребляют растворы того же состава, что и при химическом обезжиривании.

Для ускорения процессов обезжиривания и травления металлических поверхностей широко используют метод ультразвуковых колебаний. Для проведения очистки детали помещают в соответствующие среды, которые подвергают «озвучиванию». Эффективно применение ультразвуковых колебаний для очистки мелких деталей и деталей сложной конфигурации, когда

обычные способы очистки связаны со значительной продолжительностью процесса и низким качеством очистки труднодоступных участков. Использование ультразвука обеспечивает высокое качество очистки, значительное ускорение процесса и сокращение производственных площадей.

Грунтование. Основной целью грунтования – нанесения первого слоя лакокрасочного покрытия непосредственно на окрашиваемую поверхность – является создание хорошей сцепляемости между металлом и последующими слоями лакокрасочных покрытий. При нанесении на металлы грунтовочный слой должен быть стойким к действию веществ, вызывающих коррозию. Цвет грунтовочного слоя в непрозрачном покрытии не имеет решающего значения. Материал, применяемый для нанесения грунтовочного слоя, называется грунтом. Образование лакокрасочной пленки происходит в процессе сушки лакокрасочного материала, нанесенного на поверхность.

Шпатлевание. Между грунтом и верхними покровными слоями наносят промежуточные слои. Окрашиваемая поверхность различных объектов и изделий обычно имеет вмятины, раковины, царапины и прочие дефекты, которые заполняются и выравниваются с помощью шпатлевания. Крупные дефекты окрашиваемых поверхностей лучше устранять предварительной механической обработкой (обрубкой, шлифованием, пескоструйной обработкой, галтовкой), так как толстый и недостаточно эластичный слой шпатлевки подвержен растрескиванию, вследствие чего нарушается прочность покрытия.

Шпатлевка, или подмазочная масса, представляет собой густую пасту, состоящую из пигментов и наполнителей (железный сурик, охра, мел и др.), затертых на пленкообразующих основах. Различают клеевые, масляные, лаковые, нитроцеллюлозные, первинилхлоридные, эпоксидные и другие шпатлевки.

Шлифование (прошкуривание). Применяют для устранения шероховатостей и неровностей высохшей зашпатлеванной поверхности перед последующей окраской, а также и для улучшения сцепления между слоями покрытия. Для шлифования используют абразивные шкурки различной зернистости.

Нанесение промежуточных и внешних слоев покрытия производят после грунтовки и шпатлевки (если таковая предусмотрена). Первый слой краски наносят более тонким, чем последующие. Он является «выявительным» – выявляющим все дефекты после шлифования по шпатлевке. Выявленные дефекты исправляют быстросохнущими шпатлевками, после чего наносят последующие слои покрытия. Покровные, или лицевые, слои покрытия придают поверхности изделия нужный цвет, оттенок, блеск или матовость, укрывистость, а иногда и рисунок. После нанесения последнего лицевого слоя для придания покрытию желаемого вида производят флейцевание – сглаживание свежеокрашенной поверхности мягкими сухими кистями, торцевание – обработку поверхности с помощью щетки (торцовки) для придания ей шагренеобразного вида, лакирование – нанесение лака или полирование лицевого покрытия полировочной пастой и водой.

16.2. Способы нанесения лакокрасочных материалов

При нанесении лакокрасочных материалов применяют следующие основные способы окраски: кистевая окраска, окраска распылением, окраска погружением и обливанием.

Кистевая окраска – нанесение краски кистью. При этом краска должна иметь малярную консистенцию, т. е. должна легко сходить с кисти при небольшом нажиме на окрашиваемую поверхность и допускать легкую растушевку. Преимущество этого способа состоит в том, что растушевывание дает хорошее прилипание краски к поверхности.

Окраска распылением в несколько раз производительнее кистевой окраски и применима для самых разнообразных лакокрасочных материалов. Распылением можно окрашивать любые изделия (за исключением очень мелких). Совершенным методом является окраска в электростатическом поле. При этом покрытие получается равномерным, сплошным и без подтеков. При этом способе по сравнению с кистевой окраской расходуется на *30–50%* меньше материалов. Процесс может быть полностью автоматизирован.

Окраска погружением и *обливанием* производительна и проста по технике выполнения. Для окраски погружением используют преимущественно глифталевые и другие маслосодержащие эмали. Окраску в барабанах применяют для мелких изделий. Этот вид окраски отличается высокой производительностью и малым расходом материала.

Накатка краски вальцами применяется для окраски и лакировки плоских изделий, например досок, стен листового материала и др.

Сушка лакокрасочных покрытий. Нанесенные на поверхность лакокрасочные покрытия подвергают холодной или горячей сушке. Холодную сушку проводят на воздухе при температуре не ниже *12 ºС* и относительной влажности не более *65%*. Горячую сушку осуществляют горячим воздухом (конвекционная сушка), инфракрасными лучами (радиационная), токами промышленной или повышенной частоты (индукционная). Температура сушки зависит от употребляемого лакокрасочного и окрашиваемого материала.

Чрезмерно высокая температура может вызвать ухудшение прочностных свойств окрашиваемого материала и дефекты в покрытии (вздутие, растрескивание, изменение цвета, обугливание).

Сушку горячим воздухом производят в сушильных шкафах или камерах; в зависимости от вида лакокрасочного материала и температуры ее продолжительность составляет *0,5–6 ч*.

Сушка инфракрасными лучами длится *10–20 мин*. Инфракрасные лучи проникают через лакокрасочное покрытие и практически мгновенно разогревают окрашенный металл; сушка происходит из глубины к поверхности. Это исключает образование пузырей. Излучатели инфракрасных лучей подразделяются на светлые и темные. Светлыми излучателями служат обычные электрические лампы с рефлекторами мощностью *250–500 Вт*. Они хрупки и недолговечны, отфильтровывают стеклянной колбой лампы длинноволновую

область излучения, расходуют много электроэнергии. Темные излучатели не имеют этих недостатков. Это металлические или керамические листы, которые нагревают горячими газами или электронагревателями. Передвижные установки с инфракрасными излучателями применяют для быстрой сушки надписей и рисунков на окрашенной поверхности.

Сушку переменным током промышленной и повышенной частоты используют при окраске изделий из стали и других материалов, обладающих высокой магнитной проницаемостью. Вблизи окрашенной поверхности помещают обмотку электромагнита. Образующееся магнитное поле нагревает металл за счет перемагничивания (в случае большой петли гистерезиса) и токов Фуко. Особенно быстро (в течение *3–5 мин*) осуществляется сушка при токе повышенной частоты (*650–750 Гц*). Этот метод сушки пригоден для деталей несложной формы, потому что при сложной конфигурации деталей трудно обеспечить равномерность нагрева.

Полирование. Полирование лакокрасочных покрытий производят для придания им устойчивого блеска и декоративной отделки поверхностей. Этот вид обработки гладких поверхностей лакокрасочных покрытий осуществляется специальными эластичными кругами и доводочными пастами в сочетании с абразивными или алмазными микропорошками зернистостью *М7–М1*. Материалами для изготовления эластичных кругов служат: фетр, войлок, текстиль. Круги могут быть прессованными или прошитыми для сообщения им необходимой прочности. Иногда используют деревянные круги, обтянутые кожей.

На эластичные круги с более жесткой основой микропорошки наносят шаржированием, на мягкие круги наносят абразивную или алмазную пасту. Первый способ используют для удаления дефектных слоев сравнительно большой толщины. Поверхность после обработки получается осветленной, но с плохими отражательными свойствами. Во втором способе, удаляя минимальные припуски, получают полированную поверхность с хорошими декоративными и отражательными свойствами.

Эластичные круги используют также для подготовки поверхностей перед нанесением износостойких, декоративных и других покрытий.

Контрольные вопросы

1. Из каких технологических операций состоит процесс окраски деталей?
2. В чем состоит суть подготовки поверхностей под окраску?
3. Суть механической обработки.
4. Для чего делают химическую и электрохимическую обработку?
5. Назовите основные способы нанесения лакокрасочных материалов. Кратко охарактеризуйте каждый из них.

17. ИНТЕРЬЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И БЕЗОПАСНЫЕ СТЕКЛА

17.1. Обивочные материалы

Значительное количество материалов для производства автомобиля представляют производители технического текстиля. Если внимательно рассмотреть современный автомобиль, то мы увидим, что текстильные материалы присутствуют везде – в отделке салона, багажника, системы безопасности (подушки и ремни), узлов и агрегатов общетехнического назначения. Материалы для отделки салонов – это обивка дверей, внутренней поверхности крыши, пола, перчаточного ящика, внутренней поверхности багажника, крышки багажника в кузовах типа «хэтчбэк», обивка сидений.

Все элементы отделки салона имеют как функциональный, так и декоративный характер. Так, обивка предназначена для тепло- и звукоизоляции салона, причем последнему назначению сейчас уделяется все большее внимание, и это приносит свои плоды – малошумность есть результат не только бесшумной работы двигателя и трансмиссии, но и тщательного подбора и направленной разработки специальных отделочных материалов.

Шумность автомобиля обусловлена действием целого ряда факторов в силу большого числа источников разнообразных по частоте шумов, поэтому двери, внутреннюю часть крыши и пол салона автомобиля обивают объемными композитными материалами, поглощающими звук.

Такие материалы состоят из звукогасящего слоя, дублированного текстильным декоративным полотном. Звукогасящий слой такого композита представляет собой нетканое полотно аэродинамического или механического способа холстообразования с поверхностной плотностью *800–2500 г/м*^{2}, при этом такой материал должен обладать значительной механической прочностью. Для изготовления такого полотна применяются волокнистые смеси сложных составов, при этом в состав смесок входят полипропиленовые, полиэфирные волокна, волокна, восстановленные из старых обивок автомобилей, обработанное хлопковое волокно, а также стеклянные волокна.

В последние годы к названым достаточно тривиальным компонентам добавляются лиоцел линейной плотностью *0,9 дтекс*, холсты при этом скрепляются либо способом термоскрепления, либо иглопрокалыванием. Кроме того, для изоляции салонов автотранспорта стал актуален композит следующего состава: волокнистый холст, скрепленный из смеси райс-хлопка, бикомпонентных и восстановленных полиэфирных волокон, дублируемый с армирующим опоем, зачастую одновременно являющимся декоративным элементом.

Особую нагрузку при гашении шума принимает на себя изоляция днища автомобиля, которая должна выполнять не только изолирующую, но и амортизирующую функцию. Кроме того, при высокой эластичности покрытия снижается износ последнего, по этой причине его, как правило, изготавливают в виде композитов. В подобных материалах большую часть занимают

вспененные материалы или волокнистые маты с различными наполнителями, этот слой дублируется с упрочняющим слоем и закрывается ковровым напольным покрытием.

Текстильная обивка представляет собой «ловушку», в которую попадают звуковые волны, исходящие от воздушного потока, вибрации корпуса. Звуковые волны из-за трения молекул воздуха о волокнистую составляющую теряют энергию, и, таким образом, снижается уровень шума в салоне, а следовательно, обеспечивается пассивная защита пассажира.

При проектировании обивочных материалов следует учитывать, что при повышении поверхностной плотности объемного нетканого материала повышается шумогашение. При этом эффективное гашение звука начинается с поверхностной плотности изолирующего материала *350 г/м*^{2}. В настоящее время при разработке эффективных шумопоглощающих материалов стоит задача повышать их эффективность не за счет повышения поверхностной плотности, а благодаря созданию высокопористых структур.

Как пример можно рассмотреть создание тафтинговых ковровых покрытий со вспененной подложкой. В современном автомобилестроении уже достигнут значительный эффект шумогашения: приблизительно *40%* поверхности салона автомобиля покрыто текстилем.

Для обивки сидений применяют различные текстильные материалы. Самые большие проблемы при их проектировании связаны с образованием складок в процессе деформации, при постоянных механических нагрузках на сидения. Предрасположенность к образованию складок отмечается на тонких плоских (безворсовых) текстильных полотнах с повышенной плотностью переплетения нитей, кроме того, на зрительное восприятие складок влияет цвет обивки – при светлых тонах складки более заметны.

Кроме функционального назначения (звукоизоляция, теплоизоляция, демпфирование), текстильная обивка салона должна удовлетворять эстетическим требованиям, по этой причине для отделки применяются различные технические текстильные материалы: ламинаты, тафтинговые материалы, тканые и трикотажные полотна, флокированные изделия, нетканые материалы (иглопробивные и малифлис).

Таким образом, сфера автомобилестроения, где полимеры утвердились безраздельно, – внутренняя отделка салона. Здесь еще продолжаются усовершенствования как в технологии, так и выборе материалов, тем не менее традиционные материалы, за исключением разве что кожи и натуральной древесины, практически полностью вытеснены. Доминирующее место занимает технический текстиль.

Фактором, обусловливающим применение технического текстиля на автомобильном рынке, является, прежде всего, возрастающий спрос на подушки безопасности, особенно на боковые подушки и надувные экраны. Это благотворно отражается на потреблении используемых для их производства полиамидных (*ПА*) волокон. Отметим также рост потребления автомобильных ковров и обивочных тканей.

Имеет значение также забота об окружающей среде: растет спрос на волокна наиболее экологически безопасные, причем либо изготовленные в результате рециклинга отходов, либо пригодные для рециклинга по истечении срока эксплуатации автомобиля. Наконец, производители волокон вкладывают значительные средства в развитие сферы производства и потребления новых типов волокон, где технический текстиль для автомобильного рынка занимает одно из ведущих мест.

К основным требованиям, которым должны удовлетворять обивочные материалы, относятся: прочность на разрыв и сопротивление истиранию, красивая декоративная отделка, тепло- и звуконепроницаемость, долговечность, доступность и невысокая стоимость.

Механическая прочность, эластичность и износостойкость – важнейшее требование, предъявляемое к обивочным материалам. Это относится в первую очередь к материалам для обивки подушек и спинок сидений, так как они подвергаются механической нагрузке и многократным изгибам. От прочности, эластичности и износостойкости обивки зависит срок ее службы. Кроме того, обивочные материалы должны легко очищаться от пыли и других загрязнений, а обивка подушек и спинок сидений легковых таксомоторов и автобусов должна позволять обработку дезинфицирующими растворами. В то же время обивочные материалы должны хорошо мыться, не изменяя при этом внешнего вида обивки.

Обивочные материалы, используемые для изготовления и ремонта кабин, могут подвергаться воздействию нефтепродуктов или их паров. Поэтому степень стойкости обивочных материалов к воздействию нефтепродуктов также характеризует их качество. Также важно, чтобы обивочные материалы допускали возможность их ремонта, в том числе методом склеивания.

В качестве обивки используют различные текстильные материалы, заменители кожи, резину и другие материалы. Основное место в обивке кузовов занимают текстильные ткани. К ним относят ткани, войлок, шнуры, тесьму, бахрому и т. п. Свойства текстильных материалов зависят от природы волокнистого сырья и его переработки, а также от структуры и метода отделки готовых материалов. В качестве обивочных материалов применяют разнообразные ткани, в том числе и с нанесенными на их поверхности полимерами, а также синтетические пленки.

Все большее применение получили разнообразные комплексные материалы в качестве обивочного материала салона автомобиля. Для лицевого слоя используют различные материалы: ткани, трикотажные полотна, искусственный мех, искусственную кожу.

Комплексные материалы могут быть двухслойные и трехслойные. Двухслойные комплексные материалы выполняют из лицевого (основного) слоя и пенополиуретана. У трехслойных комплексных материалов в качестве лицевого слоя используют ткань, трикотажное полотно; остальные слои – из поролона и подкладочного слоя.

Комплексные материалы различают по способу дублирования, методу нанесения клеевого состава и виду клея. Дублированные материалы состоят из разных по свойствам текстильных материалов в различных сочетаниях (рисунок 17.1). Эти материалы делят на ламинированные и бондированные.

Ламинат состоит из соединенных между собой полотна и пенополиуретана (рисунок 17.1, гр. *1 а, в*) или полотна с пенополиуретаном и полотном (рисунок 17.1, гр. *1 б, г, д*).

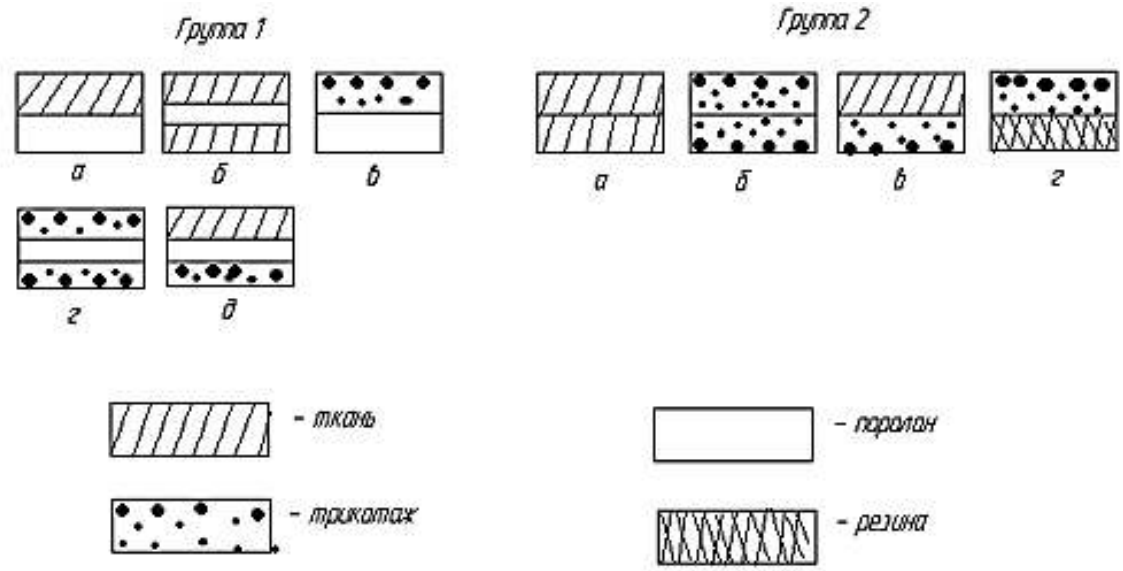


Рисунок 17.1 – Конструкция дублированных материалов

Бондированные материалы – это материалы, состоящие из двух полотен, соединенных между собой изнанкой друг с другом без поролона. В качестве обивочного материала автомобилей чаще всего используют комплексные обивочные материалы, обработанные клеевым или термическим (огневым) методами.

При клеевом методе дублирования на изнанку основного (лицевого) слоя материала наносят тонкий слой клея (полиизобутиленового или полипропиленового) и только после этого соединяют с подкладочным материалом или поролоном.

Огневой метод (метод термического оплавления поролона) заключается в том, что поверхность поролона расплавляется в пламени газовой горелки и сразу же дублируется с материалом с одной или с двух сторон.

Очень долго на АвтоВАЗе в качестве обивочного материала использовалась искусственная кожа.

В настоящее время разработана большая гамма обивочных текстильных материалов с улучшенными гигиеническими характеристиками, многообразной гаммой стилей – ворсовых, объемных, не только однотонных, но чаще рисунчатых.

Широко применяют капровелюр – текстильный дублированный материал, состоящий из трех слоев; лицевой – ворсованный основовязаный трикотаж (получаемый из полиамидной нити), второй слой – пенополиуретан, под-

кладочный слой – основовязаное трикотажное полотно из полиамидной нити. Дублирование слоев производится огневым методом. Поверхностная плотность материала – *420–480 г/м²*. Обивка такого типа создает комфорт в салоне автомобиля, так как такой материал обладает хорошей воздухопроницаемостью, объемностью, мягким грифом. К недостаткам капровелюра относятся быстрое старение, низкая устойчивость окраски, разрушение пенополиуретана и др.

В качестве обивочного материала в последнее время используется комплексный текстильный материал типа «твид». В этом случае в качестве лицевого слоя применяется тканое полотно мелкоузорчатого переплетения из поли-эфирных текстурированных нитей; в качестве промежуточного слоя – трикотажное основовязаное полотно из полиамидных нитей. Метод дублирования – огневой. Поверхностная плотность материала *430–530 г/м²*. Этот материал имеет удовлетворительные гигиенические и эксплуатационные свойства. Недостатком твида является выделение вредных для человека веществ при огневом методе дублирования; возможна деструкция пенополиуретана под воздействием условий окружающей среды и др.

На АО «АнтВАЗ» в качестве обивочного материала применяется текстильный синтетический материал – бархат. Бархат имеет красивый внешний вид, объемность, мягкий гриф, хорошие гигиенические свойства. Основными недостатками бархата, как обивочного материала, являются: пониженная устойчивость ворса к истиранию; замятие ворса при эксплуатации; направленность ворса, что затрудняет раскрой материала; воздействие на человека вредных веществ, выделяющихся при огневом методе дублирования; повышенная способность пенополиуретана к разрушению; дороговизна материала.

Основные задачи, которые стоят перед дизайнерами, технологами и конструкторами по повышению качества обивочных материалов, это:

– получение экологически чистого материала;

– улучшение технологических свойств при переработке текстильного материала для обивки сидений;

– снижение стоимости материала.

Все эти задачи будут решаться путем создания новых типов текстильных материалов, обладающих улучшенными эксплуатационными, экологическими и технологическими свойствами.

17.2. Безопасные стекла

Основное требование, предъявляемое к остеклению автомобилей – травмобезопасность, т. е. в случае разрушения стекол они не должны наносить своими осколками ранений водителю и пассажирам. Кроме того, современные автомобильные стекла должны защищать не только от ветра и дождя, но и от ультрафиолетового и инфракрасного воздействия солнечного света.

Ветровые стекла должны также предотвращать попадание в пассажирский салон посторонних предметов (камней и т. п.), не создавать оптических искажений, обеспечивать четкую различимость сигналов светофора.

Типы автомобильных стекол

В зависимости от количества слоев автомобильные стекла бывают однослойными и многослойными. Кроме этого, автомобильные стекла могут быть выполнены тонированными, а задние стекла могут иметь подогрев.

Однослойные стекла (сталинит) проходят специальную термическую обработку – закалку, заключающуюся в постепенном нагреве и быстром охлаждении. Из-за такой термической обработки их называют «закаленными». Резкий перепад температур в процессе закалки вызывает образование в поверхностных слоях остаточных напряжений сжатия, обеспечивающих повышенную механическую прочность (в *5–6* раз больше, чем у обычного стекла) и термостойкость стекла, однако при этом в стекле появляются зоны концентрации механических напряжений. Даже небольшой удар по этим зонам, если они расположены по торцам, приводит к полному разрушению стекла. В зонах концентрации напряжений в процессе эксплуатации автомобиля, под действием высоких нагрузок или резких ударов, могут появиться микротрещины, которые со временем могут привести к неожиданному разрушению («взрыву») стекла.

Закаленные стекла нельзя резать, сверлить и подвергать другим видам механической обработки.

Термообработка стекла обеспечивает его разрушение в случае аварии на небольшие осколки с неострыми (тупыми) краями, что исключает травмирование людей.

На современных автомобилях такие стекла используют только в дверях, заднем проеме, люках и совсем не устанавливают в качестве ветровых.

Многослойные стекла состоят из нескольких слоев стекла и склеивающих их прозрачных полимеров. На автомобилях применяют трехслойные изделия (триплекс – от латинского *triplex* – тройной) – два слоя стекла и слой полимера.

При разрушении осколки стекла удерживаются связующей пленкой полимера, предотвращая ранения людей. Кроме того, стекло из триплекса, вклеенное в раму кузова автомобиля, в случае аварии может предотвратить выпадение пассажиров, не пристегнутых ремнями безопасности, из салона.

Разбитое многослойное стекло может сохранить обзорность, достаточную для движения к месту стоянки или ремонта. Оно устойчиво к образованию сквозных отверстий и предохраняет людей, находящихся в салоне, от предметов, летящих из-под колес автомобиля, движущегося впереди.

Все ветровые стекла современных автомобилей – трехслойные. Для повышения безопасности и снижения уровня шума на дорогих новых моделях автомобилей триплекс устанавливают также в дверях, заднем проеме кузова и др. местах. Остекление «бронированных» автомобилей представляет собой

«сэндвич» из нескольких стекол, некоторые из которых могут быть закаленными, и полимерных пленок между ними.

Стекла с обогревом устанавливают в заднем проеме кузовов типа «седан», задней двери универсалов, хэтчбэков и других конструкциях кузовов.

Обогреватель в таких стеклах представляет собой несколько нитей «накаливания» из металлосодержащей пасты, которая наносится на поверхность стекла в процессе его изготовления. Механическая прочность такого обогревателя невысока и поэтому протирку заднего стекла следует производить аккуратно.

На автомобилях иностранного производства обогрев осуществляется через пиролитическое покрытие, образованное из металлосодержащей полосовой пасты, которое нанесено на внутреннюю поверхность стекла по верхнему и нижнему краям.

Китайские ученые изобрели незапотевающее автомобильное стекло со специальным покрытием с использованием нанотехнологий. Изобретение находится на стадии внедрения.

Тонированные стекла благодаря фильтрующим свойствам, которые зависят от толщины стекла, значительно сокращают напряжение глаз и позволяют:

– улучшить внешний вид автомобиля;

– снизить прохождение видимой части солнечного спектра, делая трудноразличимыми людей, находящихся в салоне, и его содержимое (например, вещей);

– задерживать на *3–4%* больше ультрафиолетовое излучение солнца, в то время как нетонированные стекла ослабляют действие ультрафиолетовых лучей только на *90–95%.* Уменьшение ультрафиолетового излучения снижает его негативное воздействие на водителя и пассажиров, а также выгорание обивки салона, окрашенной натуральными красителями;

– ослабить, в зависимости от химического состава красителей, инфракрасное излучение солнца, предотвращая нагревание салона и выгорание его элементов, окрашенных синтетическими красителями;

– снизить запотевание и замерзание стекол в зимний период из-за их большего нагревания в солнечный день.

Однако следует помнить, что затемненные стекла ухудшают видимость и контрастность окружающей обстановки. Этот эффект наиболее отрицательно проявляется в сумерках, когда водитель еще не осознает, что хуже различает дорогу, предметы и не принимает соответствующих мер для обеспечения безопасности движения (не снижает скорость и т. п.).

Маркировка стекол

Каждое стекло должно иметь заводскую маркировку, которая должна легко читаться и не стираться твердыми предметами или органическими растворителями.

Маркировка многослойных стекол триплекс включает следующие обозначения:

WL – стекло ветровое ламинированное;

Z 26.1 – соответствие американскому стандарту ANSI;

R43 ЕЭК – свидетельство о прохождении испытаний на безопасность во Франции и соответствии всем требованиям международного стандарта (Правила *№ R43 ЕЭК ООН* и директива *№ 92/22/СЕЕ ЕЭС*);

последние цифры – месяц и год изготовления.

Маркировка стекол сталинит включает следующие обозначения:

T – стекло закаленное;

R43 ЕЭК – свидетельство о прохождении испытаний на безопасность во Франции и соответствии всем требованиям международного стандарта (Правила *№ R43 ЕЭК ООН* и директива *№ 92/22/СЕЕ ЕЭС*);

последние цифры – месяц и год изготовления.

В зависимости от типа стекла обозначаются следующими индексами:

I – упрочненное ветровое стекло (*I/P* – то же с покрытием);

II – ветровое обычное многослойное стекло (*II/P* – то же с покрытием);

III – ветровое обработанное многослойное стекло;

IV – ветровое стекло из стеклопластика;

V – прочие (не ветровые) стекла с коэффициентом пропускания света ниже 70%;

VI – двойное стекло с коэффициентом пропускания света ниже *70%*;

VII – ветровое упрочненное стекло для транспортных средств, развивающих скорость не более *40 км/ч*.

Отсутствие индекса на стекле указывает на то, что оно не является ветровым и имеет коэффициент пропускания света не ниже *70%*.

Контрольные вопросы

1. Свойства обивочных материалов.
2. Требования, предъявляемые к обивочным материалам.
3. Структура обивочных материалов.
4. Какие существуют стекла?
5. Требования, предъявляемые к стеклам.
6. Тонированные стекла.
7. Безопасность стекол.

18. ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИЕ, СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩИЕ, ШУМО- И ВИБРОЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

18.1. Энергопоглощающие и световозвращающие материалы

В настоящее время главные усилия в вопросах создания средств противоударной защиты направлены на разработку средств защиты водителей и пассажиров (ремни и подушки безопасности, складывающиеся или изгибающиеся конструкции рулевых колонок автомобилей, конструктивные исполнения автомобилей, позволяющих обезопасить водителей и пассажиров при ДТП), кроме того, создание первичного контура противоударной защиты автомобиля может значительно снизить материальный ущерб, причиненный пассажиру.

Наибольшее распространение в технике получили энергопоглощающие пружинно-гидравлические и пневмогидравлические амортизаторы. Основным их недостатком являются сравнительно высокая сложность конструкции и изготовления, что определяет их высокую стоимость, а также регулярного технического обслуживания. Такие амортизаторы рассчитаны на восприятие небольших нагрузок, им необходимы большие хода.

Наиболее полно требованиям отвечают системы защиты за счет процессов пластического течения материала. Например, торсионных упругопластических демпфирующих элементов, обладающих высокой удельной энергоемкостью; относительной простотой и технологичностью конструкции и способностью сохранять полную работоспособность в течение практически неограниченного срока эксплуатации (срок ожидания воздействия).

При этом кузов автомобиля обеспечивает повышенную безопасность пассажиров благодаря высокой жесткости окружающего салон каркаса и энергопоглощающим деформируемым элементам в передней и задней частях.

Более половины деталей остова кузова автомобилей (около *60%*) изготовлены из сталей высокой и особо высокой прочности. Это стали с пределом прочности от *500* до *600 МПа*, служащие преимущественно для изготовления энергопоглощающих деталей. В частности, из них изготавливают лонжероны и поперечины в передней части кузова. Для верхних профилей боковин кузова используется сталь с пределом прочности *500 МПа*. Обрамление крыши и усилители вторых стоек изготавливают из особо прочной стали, легированной марганцем и бором. Штамповка деталей из этой стали производится в горячем состоянии. В результате их быстрого охлаждения предел прочности повышается до *1500 МПа*.

Алюминиевое основание переднего бампера способно перераспределять усилия, передаваемые при несимметричном фронтальном ударе на два коробчатых наконечника лонжеронов, изготавливаемых из высокопрочной стали. При скоростях наезда до *15 км/ч* деформация распространяется на

остальные части лонжеронов. Если удар несимметричный, в действие вступают детали остова кузова, расположенные выше колесных шин.

В современных автомобилях широко используются энергопоглощающие вставки. Например, производят вспененный полипропилен для изготовления энергопоглощающих деталей для рулевой колонки, а также конструкции двери с энергопоглощающими вставками.

Различные технические решения противоударной защиты, обладающей высокой энергопоглощающей способностью и стабильностью характеристик амортизации, могут обеспечить эффективную защиту автомобиля при различных видах столкновений и заданных определенным расположением энергопоглощающих устройств в составе конструкции. Рассмотренные положения защиты от ударов могут применяться для оснащения передних и задних бамперов, боковых поверхностей различных транспортных средств и в значительной степени повысить их защищенность при ДТП.

Световозвращающий эффект используется в целях безопасности на дорогах (катафоты, дорожные знаки на столбах, спецодежда и т. д.).

Стандарт *(ГОСТ Р 12.4.219–99*) определяет цветовые и цветовозвращающие характеристики сигнальных материалов для спецодежды, их минимальную площадь и размещение на спецодежде повышенной видимости при дневном освещении на фоне практически любого городского или сельского ландшафта.

Предусмотрено стандартом три класса сигнальной одежды: одежда класса *3* обеспечивает больший контраст, чем одежда класса *2*, которая, в свою очередь, превосходит одежду класса *1*. Высокий уровень световозвращения обеспечивает лучшую видимость сигнальной одежды при свете фар в темноте.

Стандарт определяет, что световозвращающий материал является ретрорефлекторным, обладающим светоотражательными свойствами. Данный материал обладает специальной конструкцией поверхностных структур световозвращающих элементов, позволяющих посылать сигналы по разным направлениям за счет возможности управления углами между падающим возвращающим светом при освещении их в диапазоне углов от близких к *0°* и до *90°* с надежным возвращением падающих лучей к источнику освещения. В качестве конструктивных элементов были выбраны пирамиды, а в качестве световозвращающих материалов тонкопленочные структуры.

Световозвращающие материалы должны быть устойчивы к механическим воздействиям, испытывают на устойчивость к старению, а также на истирание, изгибание, морозостойкость, перепады температур, стирку, химическую чистку и воздействие дождя.

18.2. Шумо- и виброзащитные материалы

Вибрация и шум создают в автомобиле дискомфорт водителю и пассажирам. Поэтому создают различные средства для их гашения.

Есть много видов шумоизоляционных материалов, но выделяют 4 основных группы, которые включают в себя другие виды материалов или их свойства, это: вибропоглощающие, шумоизоляционные, шумопоглощающие и уплотнительно-декоративные.

Вибропоглощающие – эти материалы устанавливаются первым слоем на обезжиренный металл автомобиля. Состоят из верхнего слоя фольги и нижнего слоя мастики. Эти материалы гасят низкочастотные вибрации, которые приходят на кузов от колес, т.е. грубо говоря, убирают вибрацию кузова. Фольга у материалов бывает от *100* до *400 микрон*. Слоев у материала может быть от одного до четырех и часто чередуются мастика с битумом.

Шумоизоляционные – эти материалы устанавливаются вторым слоем на прикатанную и обезжиренную виброизоляцию. Их состав должен отражать и не впитывать влагу, чтобы даже при возникновении конденсата в месте установки не пропустить воду ниже. Ведь очень сложно установить виброизоляцию настолько точно, чтобы не образовалось хоть одного стыка, в который и затечет вода, в результате чего влага может добраться до металла и со временем стать источником коррозии.

Еще эти материалы имеют и теплоизолирующие свойства, тем самым удерживая тепло зимой или холод летом, соответственно, вы станете тратить меньше времени на прогревы зимой или на охлаждение салона летом.

Шумопоглощающие – эти материалы устанавливаются вторым или третьим слоем на обезжиренную виброизоляцию или третьим слоем на шумоизоляцию. Состоят часто из вспененного полиэтилена, полиуретана и т.д. и призваны поглощать или рассеивать шумы, приходящие на них. Эти материалы помогают нейтрализовать эффект эха в автомобиле. Другими словами, при возникновении посторонних шумов, они будут максимально быстро затухать и становиться тише. Это обеспечивает еще больший акустический комфорт внутри автомобиля.

Уплотнительно-декоративные – эти материалы используются для обработки швов и стыков, деталей интерьера и обшивки. Их состав позволяет им выдерживать долгие годы службы, расположившись между трущимися деталями отделки салона.

Сегодня большое распространение получили битумно-полимерные вязкие композиты, в которые в строго определенных пропорциях введены различные наполнители. Материал в виде мат выпускают со специальной самоклеющейся пленкой, которая обеспечивает материалу надежную адгезию с панелью кузова и позволяет сохранить 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 открыто-ячеистую структуру, поглощающий звук. Поставляется толщиной от *5 до 30 мм* с липким слоем, защищенным антиадгезионной пленкой. Кажущаяся плотность – *25–40 кг/м³.* Эластичные свойства пенополиуретана поз-

воляют использовать термофол в качестве прокладок и уплотнителей в различных соединениях.

Звукоизолирующий и противоскрипный материал *термофол-РСа*, представляющий из себя вспененный полиэтилен с липким слоем. Материал обладает удовлетворительными теплоизоляционными свойствами, эластичен, водостоек, экологически безопасен, что позволяет использовать его в качестве прокладки, уплотнителя, тепло- и звукоизолятора в автомобилестроении и машиностроении. *Термофол-РСа* выпускается толщиной от *2* до *40 мм*.

Аналогичными свойствами обладает самоклеящийся звукотеплоизолирующий, шумопоглощающий материал сплен, изготовленный из пенополиэтилена с мелким слоем толщиной от *2* до *15 мм*.

Существуют шумопоглощающие материалы серии *Terodem: Terodem-SP100 Alu* – самоклеющееся битумсодержащее 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 *500×250×22 мм*.

Terodem-SP200 – самоклеющееся пенополиуретановое покрытие с внешним защитным полиуретановым слоем. Поглощает звук, распространяющийся в воздухе. В автомобилях устанавливается на капот и крышку багажника. Поставляется в виде матов *1000×500×10 мм*.

Terodem-SP300 самоклеющееся битумсодержащее покрытие. Поглощает звук, распространяющийся в твердом теле. Поставляется в виде матов *500×500×2,6 мм* и *1000×500×2,6 мм* и применяется для покрытия полов автомобиля. Благодаря высокой эластичности, пригодно для установки на поверхности, имеющей сложную форму.

Бимаст (Bimast) – вибропоглощающий материал на основе битумной и мастичной композиции. Элластичность материалов позволяет герметизировать кузов автомобиля и защитить от коррозии. Бимаст поставляется в виде мат, нагрев при монтаже до *25–30 ºС* позволяет улучшить пластичность и сократить время монтажа. Лицевой слой из алюминиевой фольги материала 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

1. Сущность конструкции энергопоглощения при ДТП.
2. Высокопрочные материалы в кузовных элементах.
3. Шумоизолирующие материалы.
4. Виброизолирующие материалы.
5. Световозвращающие материалы.
6. Требования, предъявляемые к шумо- и виброзащитным материалам.
7. Требования, предъявляемые к световозвращающим материалам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2007. – 535 с.

2. Материаловедение и технология материалов / К.А. Батышев, А.А. Смолькин, С.В. Гольцов и др.; под общ. ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина. – М.: Изд-во МГОУ, 2010. – 323 с.

3. Материаловедение. Практикум: учебно-методическое пособие / О.Н. Моисеев, Л.Ю. Шевырёв, А.Ю. Краснова, С.А. Коробской, П.А. Иванов, В.А. Ламин; под общ. ред. О.Н. Моисеева. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВПО Донской ГАУ, 2015. – 157 с.

4. Материаловедение: практикум / О.Н. Моисеев, Л.Ю. Шевырев, А.Ю. Краснова, П.А. Иванов, С.А. Коробской, В.А. Ламин; под общ ред. О.Н. Моисеева. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2016. – 159 с.

5. Моряков О.С. Материаловедение / О.С. Моряков. – М.: Издательский центр «Академия», 2014. – 288 с.

6. Моисеев О.Н. Практикум по материаловедению: учебное пособие для СПО / О.Н. Моисеев, Л.Ю. Шевырев, П.А. Иванов; под общ ред. О.Н. Моисеева. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2018. – 272 с.

7. Моисеев О.Н. Практикум по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов»: учебное пособие в 2 ч. – Ч. 1: Материаловедение / О.Н. Моисеев, Л.Ю. Шевырев, П.А. Иванов; под общ. ред. О.Н. Моисеева. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2019. – 149 с.

8. Технологические процессы в машиностроении: учебник для вузов / С.И. Богодухов, Е.В. Бондаренко, А.Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов, А.Д. Проскурин; под общ. ред. С.И. Богодухова. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

Учебное издание

Краснова Александра Юрьевна

Иванов Павел Александрович

Усова Елена Владимировна

Конструкционные и защитно-отделочные материалы

Учебное пособие

Редактор Н.П. Лучинкина
Верстка Н.В. Гвоздик
Художественный редактор С.П. Вдовикина

Подписано в печать 22.04.2024 г.
Формат 60×84/16. Усл. п. л. 11,0. Тираж 30 экз. Заказ № 14.

Отдел информационных технологий и издательской деятельности
Азово-Черноморского инженерного института
ФГБОУ ВО Донской ГАУ
347740, г. Зерноград Ростовской области, ул. Советская, 15.