

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»**

# **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**ПОСОБИЕ**

**для магистрантов специальности 7-06-0714-01  
«Инновационные технологии в металлургии»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2023**

УДК 620.01(075.8)  
ББК 34.43я73  
П27

*Рекомендовано научно-методическим советом  
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 11 от 28.06.2022 г.)*

Составитель *И. В. Астапенко*

Рецензент: декан заоч. фак. ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *Ю. А. Рудченко*

**Перспективные материалы в машиностроении** : пособие для магистрантов специальности 7-06-0714-01 «Инновационные технологии в металлургии» днев. и заоч. форм обучения / сост. И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – 156 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Приведены теоретические сведения по дисциплине «Перспективные материалы в машиностроении». Изложены описание, характеристики и научные основы развития перспективных машиностроительных материалов.

Для магистрантов специальности 7-06-0714-01 «Инновационные технологии в металлургии» дневной и заочной форм обучения.

УДК 620.01(075.8)  
ББК 34.43я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2023

## Содержание

Введение.....	4
1 Металлические сплавы .....	4
2 Керамические и композиционные материалы .....	41
3 Наноструктурные материалы .....	73
4 Полимерные материалы.....	92
5 Функциональные порошковые материалы.....	118
6 Синтетические сверхтвердые материалы и покрытия .....	128
7 Многофункциональные покрытия .....	136
Литература .....	156

## Введение

Развитие машиностроения неразрывно связано с производством новых перспективных и совершенствованием традиционных материалов. Наука «материаловедение» уходит своими корнями в далекое прошлое, поскольку во все времена от использования природных и созданных человеком материалов зависели прочность, надежность и долговечность выполненных из них деталей, изделий и машин.

Выпускаемые в настоящее время изделия работают в очень тяжелых эксплуатационных условиях. Столетия известные стали и чугуны уже не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к различным изделиям многих отраслей техники. Условия работы современных машин и приборов выдвигают требования прочности и стойкости материалов в широком интервале температур – от  $-269^{\circ}\text{C}$  у сжиженного гелия до  $1000^{\circ}\text{C}$  и выше при динамических нагрузках, в вакууме и в горячих потоках активных газов. Решение важнейших технических задач, связанных с экономным расходом материалов для современной техники, обогащает материаловедение.

XX век ознаменовался крупными достижениями в теории и практике науки о материалах: были созданы высокопрочные материалы для деталей и инструментов, разработаны композиционные материалы, керамики, техническое стекло, открыты сверхпроводники, применяющиеся в энергетике и других отраслях техники, получены наноструктурные материалы, широкое применение получили полимерные материалы и многое другое.

Одновременно совершенствовались способы упрочнения деталей методами пластического деформирования, термической и химикотермической обработкой. Постоянно разрабатываются и все большее применение имеют различные покрытия, позволяющие значительно улучшить качество поверхностей и их защиту от агрессивных сред как самих изделий, так и режущих инструментов.

## ТЕМА 1 МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

### 1.1. Традиционные металлические сплавы

#### 1.1.1. Чугуны

Чугуны – это железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода  $4,3\% \geq C \geq 2,14\%$ .

В зависимости от состояния углерода в чугуне, различают: белые, серые, высокопрочные, ковкие чугуны и чугуны с вермикулярным графитом. На схеме представлена классификация черных металлов.

*Белый чугун* в основном перерабатывают на сталь, поскольку он обладает высокими твердостью и хрупкостью и плохо поддается механической обработке. В таких чугунах углерод находится в связанном состоянии в виде цементита  $Fe_3C$ . Помимо углерода в состав чугуна входят марганец (0,5-1,75%), кремний (0,2-1,75%), фосфор (0,15-2,0%), сера (до 0,08%) и другие химические элементы.

Белый чугун используется также в качестве износостойкого конструкционного материала. При введении в небольших количествах марганца, бора, ванадия, молибдена, титана, хрома образуются сложные и твердые карбиды, например  $(Cr, Fe)_{23}C_6$ .

*Ковкие чугуны* маркируют по пределу прочности на разрыв ( $\sigma_B$ ) с размерностью  $кгс/мм^2$  и относительному удлинению ( $\delta$ ) в процентах. В соответствии с ГОСТ 1215-79 существуют марки ковких чугунов от КЧ30-6 до КЧ80-15. По своим механическим и литейным свойствам ковкие чугуны занимают промежуточное положение между чугунами и литыми сталями.

Они нашли широкое применение при изготовлении деталей автомобилей, тракторов, текстильных и сельскохозяйственных машин, металлорежущих станков (шестерни, ступицы, тормозные колодки, картеры дифференциалов, рычаги, звездочки, катки, втулки, детали рулевого управления и др.), а также в вагоно- и судостроении.

*Серые чугуны* маркируются по пределу прочности на разрыв ( $\sigma_B$ ) с размерностью  $кгс/мм^2$ , но при указании механических свойств используют размерность в МПа. Например, чугун марки СЧ15 имеет  $\sigma_B=150$  МПа ( $15$   $кгс/мм^2$ ). ГОСТ 1412-85 предусматривает марки серых чугунов от СЧ10 до СЧ45. СЧ10, СЧ15 (твердость по Бринеллю до 229 НВ) – чугуны малой прочности; СЧ20-СЧ45 (твердость до 241 НВ) – чугуны повышенной прочности. В них большая часть углерода находится в виде пластинчатого графита.

Они обладают хорошими литейными и демпфирующими свойствами и нашли широкое применение в станкостроении (станины, стойки, траверсы, корпуса коробок скоростей и подач, суппорты металлорежущих станков), в авто- и тракторостроении (картеры коробок скоростей, блоки цилиндров, поршневые кольца, диски сцепления, тормозные барабаны), в химическом и

электромашиностроении, при производстве деталей насосов, компрессоров и других изделий.

*Высокопрочные чугуны* в соответствии с ГОСТ 7993-85 имеют следующие марки: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80 и ВЧ100. Цифры обозначают предел прочности при растяжении в кгс/мм<sup>2</sup>. В них свободный графит находится в виде шаровидных включений.

При маркировке легированных чугунов используются следующие обозначения: А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, П – фосфор, Р – бор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий. Маркировка состоит из сочетания букв и цифр, указывающих содержание легирующего элемента в процентах. Если цифр нет, то содержание составляет 1-1,5%.

Высокопрочный чугун используется в тяжелом машиностроении (детали турбин, валки прокатных станков, шаботы молотов), в автомобильной промышленности (блоки цилиндров, шестерни главных передач, коленчатые и распределительные валы, ступицы, поршневые кольца), в сельскохозяйственном и транспортном машиностроении (сцепки вагонов, ступицы колес, диски муфт, опорные катки, корпуса плугов, зубья борон), а также при изготовлении других ответственных деталей.

*Легированные чугуны* подразделяются на: износостойкие, коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные и антифрикционные.

*Износостойкие чугуны*, например ИЧХ4Г7Д, ИЧХ28Н2, ИЧХ28Н2М2, ИЧХ3ТД, ИЧХ15М3 используют для изготовления рабочих элементов дробебетных и пескоструйных машин, броневых плит мельниц, лопастей шнеков, абразивных насосов и др.

*Коррозионно-стойкие чугуны* легируют медью, молибденом, хромом, никелем и кремнием, что позволяет им работать в химически агрессивных средах.

Чугуны ЧНХТ, ЧН1МШ, ЧН1ХМД широко используют в двигателестроении для изготовления выпускных патрубков, поршней и гильз паровых машин, газовых компрессоров, судовых дизелей и других изделий.

*Жаростойкие чугуны* (ГОСТ 7769-82) обладают стойкостью к образованию окалины. Их выпускают с добавками алюминия, хрома и кремния.

Алюминиевые чугуны обладают большой стойкостью к окислению в среде печных газов при температурах 1100-1150°C, паров серы при температуре 1000°C. Они используются при изготовлении тиглей, для футеровки печных камер, в доменных печах.

Хромистые чугуны ЖЧХ-0,8, ЖЧХ-1,5, ЖЧХ-2,5 используют при строительстве мартеновских, доменных и термических печей. Они могут выдерживать температуру до 650°C. Высокохромистые чугуны (ЖЧХ-30) применяют при изготовлении колосниковых решеток, горелок, коробок для отжига, работающих при температуре до 900°C.

Кремнистые чугуны работают при температурах до 900°C. Из них изготавливают детали газовых турбин, котлов, мартеновских печей и др.

*Жаропрочные чугуны* легируют никелем и хромом. Чугуны ЧН11Г7Х2Ш, ЧН19Х3Ш используют для деталей печной арматуры, роликов листопрокатных станков, в нефтяной и химической промышленности, выпускных патрубков дизелей и др.

*Антифрикционные чугуны* (ГОСТ 1585-85), например АСЧ-4, АКЧ-1, АВЧ-2 (обозначают А – антифрикционный, Ч – чугун, С – серый, В – высокопрочный, К – ковкий) применяются в узлах трения в паре с другими материалами для изготовления подшипников скольжения.

### **1.1.2. Стали**

Конструкционные стали применяют для изготовления различных по назначению деталей машин. Низкоуглеродистые стали обычно подвергают цементации, среднеуглеродистые – улучшению.

*Конструкционные стали обыкновенного качества* имеют три группы: группа А – поставляется по механическим свойствам (применяется для малоответственных деталей, армирования железобетонных конструкций); группа Б – по химическому составу (применяется для изготовления горячекатаной проволоки, листа, холоднокатаной ленты); группа В – по химическому составу и механическим свойствам (для изготовления судового листа, гнутого профиля при строительстве вагонов и др.).

*Конструкционные качественные стали* имеют содержание углерода: 0,05...0,50%. Используют для изготовления средненагруженных деталей машин различного назначения.

*Подшипниковые стали* применяют при производстве деталей подшипников качения (кольца, ролики, шарики, иголки). Для обычных подшипников используют стали марок ШХ6, ШХ9, ШХ10, ШХ15, ШХ15СГ, для прецизионных – 20Х2Н4А-Ш, ШХ15-ШД, получаемые вакуумно-дуговым переплавом.

*Стали для холодной листовой штамповки* и высадки подразделяются на группы: для нормальной, глубокой, весьма глубокой, сложной и особо сложной вытяжки.

При холодной штамповке используют листовую сталь марок 10кп, 20кп, 10пс, 20пс, легированную – 10Г2, 12Х2НМФА, 23Х2НВФА, 25ХГСА, 25ХГФ, 30ХГС и др. Для высадки используют стали, обладающие в холодном состоянии хорошей пластичностью: 08кп, 20кп, 15Х, 30Х, 12ХН, 18Х2Н4МА, 19ХГН, 20ХГСА, 30Х, 30ХНМА.

*Автоматные стали* обладают хорошей обрабатываемостью резанием и делятся на следующие группы:

- углеродистые сернистые А11, А20, А30, А35, А40Г;
- углеродистые свинецсодержащие – АС14, АС35Г2, АС45Г2, АС40;
- сернистоселенистые и хромистые сернистоселенистые А35Е, А45Е, А40ХЕ;
- сернистомарганцовистые свинецсодержащие и легированные свинецсодержащие – АС12ХН, АС14ХГН, АС20ХГНМ и др.

Из этих сталей изготавливаются втулки, болты, гайки, оси, тяги, валики и другие малонагруженные детали автомобильного, текстильного и сельскохозяйственного машиностроения.

*Рессорно-пружинные стали* обладают высокими пределом упругости, выносливостью, пластичностью и вязкостью.

Для изготовления пружин, рессор, пружинных шайб, работающих в обычных условиях, используют стали 65, 70, 75, 85, 60Г, 70Г, У7-У13, У7А-У13А.

Для изготовления тяжело нагруженных пружин и рессор автомобилей и железнодорожных вагонов используют стали 55С2, 55С2А, 60С2, 60С2А, 70С3А.

Стали 50ХГ, 50ХГА, 55ХГР, 50ХФА, 50ХГФА используют для изготовления пружин, имеющих длительный цикл работы при высоких температурах.

Стали 10Х11Н23Т3МР, 12Х18Н9Т, 30Х13, 36НХТЮ5М, 40Х13, 40КХНМ, 40КНХМВТЮ, 42НХТЮА, 68НХВКТЮ используют для



изготовления пружинных деталей, которые работают в агрессивных средах при высоких температурах.

Для изготовления тяжело нагруженных деталей – зубчатых колес, валов, крестовин, карданных валов, штоков и др. – используют стали 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ, 25Х2ГНТА, 15ХГН2ТА, 20ХГНТР, 15Х2ГН2ТРА.

При работе с ударными нагрузками – 20ХГР, 20ХНР, 20ХГНР, 27ХГР, 40ХН, 45ХН, 50ХН, 30ХН3А, 30ХГСН2А, 38ХГН.

*Среднелегированные конструкционные стали* в качестве легирующих элементов используют хром, марганец, никель, молибден. Прочность  $\sigma_B=1400-2000$  МПа. Наиболее широко применяют марки 30ХГСН2А, 30ХГСН2МА, 25Х2ГНТРА, 30Х2ГСН2ВМ и 40ХН2СМА.

В таблице 1.1 представлены свойства среднелегированных конструкционных сталей.

Высокопрочные стали имеют повышенную чувствительность к концентраторам напряжений, водородной хрупкости, коррозии под напряжением, действию поверхностно-активных веществ и к ряду других факторов.

В настоящее время разработаны и применяются новые конструкционные стали повышенной надежности и прочности (марок ВКС-8 и ВКС-9), обладающие высокими физико-механическими характеристиками.

Таблица 1.1

### Свойства среднелегированных конструкционных сталей

Марка стали	Е	$\tau_B$	$\sigma_{пц}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{-1}$
	ГПа	МПа			
30ХГСМ2А	195	1600-1800	900	1250	600
ВКС-8	200	1800-2000	1150	1500	700
ВКС-9	200	1950-2150	1250	1600	660

Эти стали обладают высокими параметрами вязкости разрушения, сопротивления малоциклового усталости и коррозии, что позволяет использовать их для изготовления высоконагруженных сварных деталей с высокой гарантией эксплуатационной надежности и длительного ресурса.

*Высоколегированные стали и сплавы* являются труднообрабатываемыми и по назначению подразделяются на

следующие группы:

– *хладостойкие стали*, предназначенные для работы при температурах 40-80°C: 12ХН3А, 15ХМ, 18Х2Н4ВА, 20ХГНР, 30ХГСА, 30ХГСН2А, 38Х2МЮА, 40ХН2МА и др.;

– *теплоустойчивые стали* предназначены для работы в течение длительного времени при температуре до 600°C: 12МХ, 12Х1МФ, 20Х1М1Ф1ТР, 20Х1М1Ф1БР, 25Х1МФ, 25Х2М1Ф и др. используются при изготовлении паровых котлов, деталей трубопроводов, труб паронагревателей, деталей газовых турбин; стали 12Х8ВФ, 15Х5, 15Х5М, 15Х5ВФ используются для изготовления печей, труб, насосов, задвижек и др.;

– *жаропрочные стали* способны работать при температурах 400-850°C. Стали 9Х16Н15М3Б, 12Х8ВФ, 13Х14Н3В2ФР, 14Х17Н2, 15Х11МФ применяются для изготовления лопаток паровых турбин, трубопроводов высокого давления, труб, печей, работающих при температуре до 580°C. Стали 08Х16Н13М2Б, 11Х11Н2В2МФ, 12Х18Н12Т, 15Х5М, 16Х11Н2В2МФ, 18Х12ВМБФР используются для изготовления литейных форм, лопаток турбин, деталей насосов, задвижек, работающих при температуре до 600°C. Стали 09Х16Н4Б, 37Х12Н8Г8МБФ, 40Х9С2, 40Х10С2М, 45Х14Н14В2М используются для изготовления труб парогенераторов, клапанов двигателей, трубопроводов, работающих при температуре до 850°C;

– *жаростойкие стали* способны работать без окисления и образования окалины при температурах до 1250°C. Стали 12Х13, 12Х18Н9Т, 09Х14Н16Б, 15Х5, 08Х18Н10, 40Х10С2М применяют для изготовления теплообменников, электродов зажигательных систем, муфелей, реторт, деталей котельных установок, работающих при температуре до 850°C. Стали 08Х18Т1, 08Х20Н14С2, 12Х17, 10Х13СЮ, 20Х20Н14С2, 30Х13Н7С2, 45Х22Н4М3, 55Х20Г9АН4 применяются для изготовления печных рольгангов, теплообменников, деталей термических печей, труб, работающих при температуре до 1000°C. Стали 10Х23Н18, 15Х18СЮ, 15Х25Т, 15Х28, 12Х25Н16Г7АР, 20Х23Н18, 20Х25Н20С2, 36Х18Н25С2 применяют для изготовления труб пиролизных установок, деталей газовых турбин, подвесок и опор в котлах, работающих в газовых и жидких агрессивных средах при температуре до 1150°C;

– *коррозионностойкие стали* используются для изготовления деталей, работающих в агрессивных средах. Для слабоагрессивных сред (открытый воздух, пресная вода, пар) используются стали 08Х13,

12X13, 20X13, 25X13H2. Для изготовления медицинских инструментов используют стали 30X13 и 40X13. Для изготовления лопаток турбин, авиационных моторов – стали 14X17H2, 20X17H2. Для изготовления деталей дизелей, элементов судов, работающих в морской воде, используют стали 07X16H6, 08X17H5M3, 09X15H8Ю, 09X16H4Б. Для работы в средах с повышенной агрессивностью используют стали ХН65МФ, Н70МФ, 03X18H12, 04X18H10, 08X18H10Т, 08X18H12Т.

Коррозионностойкие стали переходного класса обладают высокой надежностью, сопротивлением коррозии под напряжением, хорошей свариваемостью всеми видами сварки (причем сварные соединения не требуют термообработки).

Сталь 07X16H6 является одной из наиболее распространенных, выпускается в виде листов, лент, прутков, поковок, сварочной проволоки. После закалки, обработки холодом и отпуска в интервале температур 250-400°C сталь при параметре прочности  $\sigma_B = 1100-1300$  МПа имеет высокие параметры вязкости разрушения и пластичности и применяется для изготовления силовых деталей и сварных узлов, работающих при низких температурах (до 253°C), в том числе деталей, подвергаемых действию большой концентрации напряжений, а также сварных емкостей, работающих под газовым давлением.

Сталь 08X17H5M3 с параметром прочности  $\sigma_B = 1200-1400$  МПа применяют в качестве листового материала. Листовую сталь упрочняют холодной деформацией и поставляют в виде листов и лент в мягком или полунагартованном состоянии.

Наиболее целесообразно ее использование для изготовления тонкостенных объемных деталей методом глубокой штамповки с умеренными степенями деформации, с последующим упрочнением отпуском при температуре 450°C. Сталь хорошо поддается пайке. Детали, изготовленные из этой стали, могут длительно эксплуатироваться при температуре 500°C.

Сталь 13X15H4AM3 с параметром прочности  $\sigma_B = 1400$  МПа применяют для изготовления высоконагруженных деталей и сварных узлов. Высокие параметры прочности стали обеспечиваются повышенным содержанием углерода и азота, а пластичности и вязкости – наличием в структуре 15-20 % равномерно распределенного остаточного аустенита.

Сталь поставляется в виде поковок, штамповок, прутков и горячекатаных листов.

Термическая обработка состоит из закалки при температуре 1070°C, обработки холодом и отпуска при 200 или 350°C. При параметре прочности  $\sigma_B = 1600$  МПа после отпуска при температуре 200°C сталь 13X15H4AM3 обладает высокими параметрами вязкости разрушения, пластичности, сопротивления к концентраторам напряжений, в том числе к трещинам при длительно действующих нагрузках в контакте с водой.

Сталь 13X15H4AM3 используется для изготовления путем накатки высоконагруженных болтов, работающих как на срез, так и на растяжение.

Наиболее высокопрочной из сталей переходного класса является сталь 18X14H4AM3 с параметром прочности  $\sigma_B = 1600-1800$  МПа. Такая прочность обеспечивается повышением содержания углерода и изменением фазового состава в сторону большего количества мартенсита. При этом сталь 18X14H4AM3 имеет достаточно высокие параметры вязкости разрушения и сопротивления коррозионному растрескиванию.

Сталь 18X14H4AM3 предназначена для изготовления силовых деталей и сварных узлов, работающих при температурах от -70 до +200°C в любых климатических условиях.

В таблице 1.2 представлены сравнительные свойства высокопрочных сталей.

Таблица 1.2

### Сравнительные свойства высокопрочных сталей

Марка стали	$\sigma_B$	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{цц}$
	МПа		
18X14H4AM3	1600-1800	1200	940
30XГСН2А	1600-1800	1250	900

#### 1.1.3 Алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы подразделяются на деформируемые (ГОСТ 4784-74), прессованные (ГОСТ 21488-76) и литейные (ГОСТ1583-89).

Деформируемые обработкой алюминиевые сплавы отличаются хорошей пластичностью ( $\delta$  до 40%), но невысокой прочностью. К ним относятся сплавы алюминия с магнием и марганцем. Это сплавы

АМц, с содержанием 1-1,6 % Mn; АМг2, АМг5, содержащие до 1,6% Mn и до 5,8% Mg. Они используются для изготовления сварных или штампованных малонагруженных конструкций, устойчивы к коррозии. Могут быть упрочнены методами холодной деформации. К *деформируемым прессованием* относятся сплавы системы алюминий–медь–магний с добавками других компонентов, например марганца – дюралюмины. Наибольшее применение имеют сплавы Д18 (Cu – 2,2-3%; Mg – 0,2-0,5%) и Д16 (Cu – 3,8-4,6%; Mg – 1,2-1,8% и 0,3-0,9% Mn). Дюралюмины в любом состоянии хорошо деформируются, могут быть подвергнуты закалке в воде и старению. Сплавы типа В95 являются наиболее прочными и содержат в своем составе 6% Zn, 2,3% Mg, 1,7% Cu, 0,4% Mn, 0,2% Cr. Недостатком этих сплавов является то, что они работают при температуре менее 150°C и подвержены коррозии. Для работы при повышенных температурах используются сплавы АК4, АК6, АК8, АК4-1, хорошо поддающиеся ковке и штамповке.

Алюминиевые деформируемые сплавы обладают высокими физикомеханическими характеристиками, технологичны при изготовлении, и используются в судо- и авиационном машиностроении, в строительстве, сельском хозяйстве, производстве электро- и бытовой техники и электронном машиностроении. В авиационном машиностроении эти сплавы являются основным конструкционным материалом и составляют 80-85% веса планера современного самолета.

С целью повышения надежности самолетов разработаны новые высокопрочные алюминиевые деформируемые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu и среднепрочные сплавы системы Al–Cu–Mg. Эти сплавы имеют повышенные параметры вязкости разрушения и трещиностойкости, сопротивления усталости и коррозионной стойкости и обладают повышенными прочностными свойствами. Наиболее перспективными для авиации являются следующие марки: В95пчТ2, В95очТ2, 1973, 1933 системы Al–Zn–Mg–Cu и 1161, 1163 системы Al–Cu–Mn. Сплавы 1973, 1933 и 1161 дополнительно содержат цирконий.

Сплавы, легированные литием, обладают пониженной плотностью.

Свариваемый сплав 1420 системы Al–Mg–Li–Zr отличается самой низкой плотностью ( $\rho=2470 \text{ кг/м}^3$ ) и обеспечивает высокую удельную прочность  $\sigma_B/\rho=17 \text{ к}\cdot\text{м}$ , а также снижение массы конструкций до 20-25%. Предел прочности сварных соединений  $\sigma_B$  материала составляет примерно  $0,8 \sigma_B$  основного.

Для изготовления тонких листов на базе системы Al–Cu–Li–Zr разра- ботаны сплавы 1450 и 1451, которые по основным служебным характери- стикам не уступают сплаву В95, но позволяют на 10% снизить массу конструкции и на 10% повысить его жесткость.

Разработаны сплавы 1430 и 1440 на базе системы Al–Mg–Li–Cu–Zr с более низкой (на 7-8%) плотностью и более высоким (на 10%) модулем упругости и достаточно высокими параметрами сопротивления усталости и вязкости разрушения, по сравнению со сплавами системы Al–Cu–Mg типа Д16.

В таблице 1.3 указаны свойства алюминиевых деформируемых сплавов.

Таблица 1.3

### Свойства алюминиевых деформируемых сплавов

Марка сплава	Вид заготовки	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %
		МПа		
В95пчТ2	лист	510-540	450-480	10-12
1973Т2	лист	550-570	500-520	
	плита	530	460	8
	панель	540	480	
1933Т3	штамповка	450	390	12
1161НТМО	плита	450	340	
1161Т	панель	450	340	
1163Т7	плита	460	345	

Алюминий-литиевые сплавы по сравнению с традиционными алюминиевыми довольно дорогие и поэтому их применяют эффективно только в тех конструкциях, где необходимо снижение массы.

Для изготовления корпусных деталей приборов используют сплавы типа 1420, обладающие эффектом сверхпластичности, что позволяет в 1,5-2 раза снизить трудоемкость без применения механической обработки.

В автомобиле- и тракторостроении для деталей двигателей и систем распределения выхлопных газов, работающих при температурах до 500°С, используют механически легированный алюминиевый жаропрочный материал Al–3%С, обладающий высокой прочностью ( $\sigma_B=470$ МПа,  $\sigma_B^{350}=190$ МПа) и коррозионной стойкостью. Благодаря высоким антифрикционным свойствам его используют для изготовлении узлов трения, что позволяет при замене деталей из стали и титана обеспечить снижение массы на 30%.

Алюминиевые литейные сплавы обозначаются буквами АЛ и подразделяются на 5 групп.

Группа 1 – силумины – сплавы системы алюминий – кремний (АЛ2, АЛ4, АЛ9). Эти материалы устойчивы к коррозии, обладают хорошей текучестью и малой усадкой. Для модификации в них вводят металлический натрий, в результате чего структура становится мелкозернистой, а материал приобретает пластичность.

Группа 2 – сплавы системы алюминий–кремний–медь (АЛ3, АЛ5, АЛ6), а также АЛ32, содержащий еще марганец и титан.

Группа 3 – сплавы системы алюминий–медь (АЛ7 и АЛ19) содержат повышенное содержание меди, что сказывается на их цене.

Группа 4 – сплавы системы алюминий–магний (АЛ8, АЛ13, АЛ22) обладают низкой плотностью, хорошей коррозионной стойкостью и высокими механическими характеристиками. Используются при изготовлении отливок в автомобильном производстве.

Группа 5 – сплавы на основе алюминия и других компонентов. Например, сплав АЛ24 содержит марганец, магний, цинк, титан и др.

Среди последних разработок можно выделить сплавы ВАЛ 12, ВАЛ 14, ВАЛ 16.

Высокопрочный сплав ВАЛ12 на основе системы Al–Zn–Mg–Si предназначен для изготовления деталей, к которым предъявляются повышенные требования по прочности и усталости. Он может успешно конкурировать как с алюминиевыми деформируемыми сплавами, так и с малоуглеродистыми сталями, некоторыми латунями и бронзами. Детали из сплава ВАЛ12 могут длительно работать при 200°C и кратковременно при 250°C.

Детали, получаемые литьем по методу жидкой штамповки, при которой кристаллизация происходит в металлической форме под давлением, обладают особо высокими механическими свойствами:

- $\sigma_B = 550\text{--}600$  МПа;
- $\sigma_{0,2} = 500\text{--}550$  МПа,  $\delta = 3\text{--}6$  %;
- $\sigma_{-1} = 140\text{--}160$  МПа.

Высокопрочный и жаропрочный сплав ВАЛ14 (Al–Cu–Mn–Cd) имеет высокие физико-механические характеристики ( $\sigma_B = 400\text{--}500$  МПа,  $\sigma_{-1} = 90\text{--}120$  МПа,  $\delta = 7\text{--}15$  %), и предназначен для деталей, испытывающих большие динамические и вибрационные нагрузки. Детали из этого сплава могут длительно работать при 300°C и кратковременно при 350°C.

Сплав ВАЛ16 обладает высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью. Детали из этого сплава могут успешно работать в любых климатических условиях при температурах до 150°С. Материал обладает хорошей свариваемостью (коэффициент ослабления сваркой 0,9–1,0) и высокими механическими свойствами ( $\sigma_B=300-350$ МПа,  $\delta=10-15$  %), что позволяет применять его для изготовления сварных конструкций с деформируемыми сплавами типа АМГ6.

В изделиях современного машиностроения алюминиевые литейные сплавы, обладающие высокой удельной прочностью, заменяют чугун и малоуглеродистые литейные стали. Сравнительные значения механических свойств литейных сплавов, серого чугуна и стали, применяемых для изготовления литых заготовок деталей машин, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4

**Сравнительные характеристики алюминиевых сплавов, стали и чугуна**

Материал	Марка сплава	$\sigma_B$	$\delta$	$\rho$	$\sigma_B/\rho$
		МПа	%	кг/м <sup>3</sup>	к·м
Литейные алюминиевые сплавы	Ал4	230-240	2,0-3,5	2650	8,5-9,0
	Ал5	220-250	0,5-2,5	2680	8,2-9,0
	Ал9	210-230	1,0-3,0	2660	7,7-8,6
	Ал9-1	240-300	2,0-5,0	2690	8,3-11,2
	Ал-19	300-340	4,0-8,0	2780	10,8-12,2
	Ал-32	250-270	1,5-2,0	2650	9,4-10,1
	ВАЛ8	350-400	4,0-6,0	2730	12,8-14,6
	ВАЛ12	550-580	3,0-5,0	2820	18,7-20,5
	ВАЛ14	400-500	4,0-10,0	2800	14,2-17,8
Серый чугун	Сч18	180	-	7200	2,5
	Сч28	280	-	7500	3,7
Сталь	35	400	15,0	7800	5,1

Область применения алюминиевых литейных сплавов весьма широка и постоянно расширяется:

– в авиастроении – силовые детали фюзеляжа, агрегатов, приборов;



– в судостроении – кронштейны палубных надстроек, корпуса механизмов управления и компасов;

– в машиностроении – корпуса электродвигателей, роторов компрессоров, насосов, редукторов, вентиляторов; крыльчатки, шкивы ременных передач, муфты сцепления, корпуса и крышки картеров, коробки скоростей, редукторы, головки и блоки цилиндров, поршни;

– в текстильной промышленности – станины ткацких станков, бобины, корпуса и кожухи швейных машин;

– в пищевой промышленности – детали смесителей, просеивающих агрегатов, разливочных машин;

– в электротехнической промышленности – детали контактных соединений, панели, радиаторы охлаждения, платы и корпуса приборов;

– при производстве бытовой техники – детали бытовых приборов, кухонная утварь.

Алюминиевые литейные сплавы по сравнению с чугунами и сталями обладают рядом важных преимуществ: возможностью получать более точные литые заготовки с малой шероховатостью поверхности высокопроизводительными методами литья в металлические формы (в кокиль, под давлением, жидкой штамповкой), а также более высокой коррозионной стойкостью.

Замена чугуна и стали литейными алюминиевыми сплавами позволяет получать значительный технико-экономический эффект за счет: снижения массы (металлоемкости) конструкций; повышения эксплуатационной надежности и долговечности; уменьшения трудоемкости благодаря применению более точных литых заготовок, а также более легкой обрабатываемости резанием.

#### **1.1.4. Медные сплавы**

В медных сплавах используют буквенные обозначения: С – свинец, О – олово, Б – бериллий, Т – титан, Ф – фосфор, Ж – железо, Мц – марганец, К – кремний, Ц – цинк, А – алюминий, Н – никель.

Сплавы меди с цинком (до 50%) и добавками алюминия, никеля, кремния и марганца называются *латунями*, которые бывают обрабатываемые давлением (ГОСТ 15527-70) и литейные (ГОСТ 177111-80). Наиболее распространены латуни с содержанием цинка до 38%. Они коррозионностойкие, пластичны и в горячем состоянии хорошо обрабатываются давлением. Латуни выпускают восьми марок с максимальным содержанием меди (96%) в латуни марки Л96 и

минимальным – в Л60. Добавки в состав латуни улучшают механические свойства и повышают коррозионную стойкость. Например, ЛМцА-57-3-1 марганцово-алюминиевая латунь, содержит 55,0-58,5% меди, 2,5-3,5% марганца, 0,5-1,5% алюминия, остальное – цинк.

Сплавы меди с оловом называются *бронзами* (ГОСТ 5017-74 – оловянистые и ГОСТ 18175-78 – безоловянистые). Эти сплавы более прочные и коррозионностойкие по сравнению с медью, обладают хорошими литейными свойствами, имеют малый коэффициент трения, что позволяет использовать их при изготовлении вкладышей подшипников, червячных колес, различных элементов точных измерительных приборов. Бронза БрОЦС5-5-5 содержит 4-6% олова, цинка и свинца, остальное – медь. Поскольку олово дороже и дефицитнее меди, то широкое распространение получили алюминиевые бронзы, например БрА5, БрАЖМц10-3-1,5. Алюминиевые бронзы с добавками алюминия до 10% обладают хорошей жидкотекучестью, в горячем и холодном состоянии хорошо обрабатываются давлением, а добавки никеля, марганца, железа и свинца улучшают их механические свойства.

Бериллиевые бронзы БрБ2, в состав которых входят 1,8-2,1% бериллия, 0,2-0,5% никеля, остальное – медь, обладают высокой прочностью и упругостью, что позволяет использовать их для изготовления пружин и пружинных контактов измерительных приборов.

Бронзы БрОЦС4-4-4, содержащие 3-5% олова и цинка, 3,5-4,5% свинца, обладают высокими антифрикционными свойствами.

Кремниевые бронзы, например БрКн-1-3, содержат 0,6-1,1% кремния, 2,4-3,4% никеля и 0,1-0,4% марганца обладают высокой пластичностью и коррозионной стойкостью.

Технически чистая медь (ГОСТ859-78) также применяется в машино- и приборостроении: М00 (меди 99,9%), М0 (99,95%), М1 (99,8%), М2 (99,7%), М3 (99,5%).

#### **1.1.5. Титановые сплавы**

В промышленности применяют в основном титан двух марок: ВТ1-00 и ВТ1-0.

Для легирования титана используют алюминий, который увеличивает прочность, жаропрочность и стойкость к окислению при высоких температурах, но снижает пластичность. Алюминий является  $\alpha$ -стабилизатором. Для получения сплавов смешанной структуры ( $\alpha +$

β), титан легируют марганцем, хромом и молибденом, что позволяет примерно вдвое увеличить прочность по сравнению с чистым титаном, но при температуре не выше 430°C.

Такие сплавы хорошо куется, штампуются и прокатываются, но плохо свариваются.

Широкое распространение имеет сплав ВТЗ-1 (5,5-7% Al, 0,8-2,3% Cr, 2-3% Mo, 0,2-0,4% Si), который обладает термической стабильностью при температуре до 400°C.

Сплав ВТ9 (6-7% Al, 3-4% Mo, 0,3% Si, 0,8-2% Cr) может длительно работать при температуре до 450°C,  $\sigma = 980-1150$  МПа.

Однофазный сплав ВТ5 (4,3-6,2% Al) устойчив к коррозии, хорошо сваривается, сохраняет высокую прочность при температуре до 650°C.

Титановые сплавы следует использовать в тех областях, где к изделиям предъявляются высокие требования по коррозионной стойкости и прочности, например в химической и молочной промышленности. Длительный срок службы титановых изделий позволяет окупать их повышенную стоимость по сравнению со сталями.

Области использования титановых сплавов:

– химическое, нефтехимическое, молочное производство – емкости, баки, трубопроводы, теплообменники, реакторные сосуды, очистительные сооружения;

– машиностроение – корпусные детали, клапаны, золотники, пружины, коленвалы;

– добыча топлива, производство ядерных силовых установок – конденсаторы, лопатки турбин, изделия, работающие в соленой воде океанов, детали бурильного и нефтяного оборудования;

– строительство – крыши, панели, элементы отделки, трубопроводы, оболочки;

– судостроение – опреснители морской воды, глубоководные спускаемые аппараты, подводные лодки, шельфовые нефтяные платформы;

– захоронение радиоактивных отходов – контейнеры, транспортные цистерны;

– медицинская промышленность – имплантаты, сердечные клапаны, микрохирургический инструмент, протезы;

– производство спортивного инвентаря – ракетки, клюшки, детали велосипедов.

Поскольку титановые сплавы достаточно дороги и дефицитны, то это сильно сдерживает их использование. Наиболее широкое распространение имеет использование титанового листа толщиной 1-5 мм (70%), хотя титан поставляется и в виде плит, труб, прутков и поковок. Для снижения себестоимости разработаны вторичные титановые сплавы – ВТВ1, ВТВ2, ВТВ3, ВТВ4. В качестве шихтовых материалов при выплавке слитков используют отходы производства титановых сплавов. Из вторичных титановых сплавов освоено производство листов, плит толщиной 7-50 мм, прутков диаметром 10-25 мм.

Изделия из вторичных титановых сплавов могут быть сварены всеми видами сварки: аргонодуговой, электронно-лучевой, точечной и др. Операции листовой штамповки и гибки заготовок из сплава марки ВТВ1 осуществляют без нагрева, а из сплавов ВТВ2, ВТВ3, ВТВ4 – при нагреве до 700°С. Механическую обработку (точение, фрезерование, строгание и др.) вторичных титановых сплавов проводят инструментом с твердосплавными пластинами типа ВК6 и ВК8. Режимы резания аналогичны режимам для обычных титановых сплавов.

В таблице 1.5 указаны свойства листов и плит из титановых сплавов.

Таблица 1.5

### Свойства листов и плит из титановых сплавов

Марка сплава	Толщина листа, мм	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
ВТ1-0	1-5	390-540	25
	6-10		20
	12-60		13
ВТ1-00	1-5	290-440	25
	6-10		20
	12-60		14
ОТ4-1	1-5	490-640	25
	6-10		11
	10-60		11

#### 1.1.6. Магниево-алюминиевые сплавы

Первичный магний имеет три марки: Мг96, Мг95 и Мг90, с содержанием от 99,96 до 99,90% магния. В магнии содержится железо, кремний, алюминий, медь, никель, марганец и хлор в

незначительных количествах. ГОСТом (2856-79) определены составы магниевых сплавов, предназначенных для фасонного литья, ГОСТом (14957-76) – сплавов для получения изделий методами горячей деформации. Различают литейные магниевые сплавы (МЛ) и сплавы, обрабатываемые давлением (МА).

Сплав МЛ2 (1-2% Mn) имеет невысокие механические свойства, но обладает хорошей антикоррозионной стойкостью.

Сплавы МЛ4 и МЛ5 содержат добавки алюминия и цинка, имеют более высокие физико-механические характеристики, благодаря чему широко используются в промышленности, хотя стойкость к коррозии у них несколько ниже.

Сплав МЛ10 содержит добавки неодима, цинка и циркония, обладает хорошими литейными свойствами, жаропрочен и может выдерживать рабочую температуру до 250°C.

Магниевые литейные сплавы хорошо обрабатываются резанием, обладают малой плотностью, высокой удельной прочностью, способностью к демпфированию колебаний. Изделия, изготовленные из этих сплавов, используются в различных отраслях народного хозяйства:

- авиастроении – детали пассажирских кресел, шасси, двигателей и силовых агрегатов;
- транспортном машиностроении – детали двигателей автомобилей, диски колес, элементы подвески, корпуса лодок и лодочных моторов;
- текстильной промышленности – детали ткацких станков и бобины;
- радиотехнической и электронной промышленности – детали оптических приборов, радио- и киноаппаратуры.

Из магниевых деформируемых сплавов изготавливают следующие изделия:

- в авиастроении – детали бортовой аппаратуры, диски колес, корпуса кресел;
- в производстве товаров народного потребления – детали велосипедов;
- в медицине – детали инвалидных колясок, медицинской техники.

В настоящее время наиболее широко используются магниевые литейные сплавы МЛ5, МЛ5пч, МЛ10 и МЛ12. Сравнительные значения физикомеханических свойств магниевых литейных и алюминиевых сплавов приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6

## Свойства магниевых и алюминиевых сплавов

Материал	Марка	Рабочая температура	$\rho$	$\sigma_B/\rho$
		°С	кг/м <sup>3</sup>	к·м
Магниевые сплавы	МЛ15, МЛ15пч	150	1810	12,7-13,8
	МЛ12	200	1810	12,7-13,8
	МЛ10	250	1780	12,9-14,0
Алюминиевые сплавы	–	150-300	2700-2800	7,7-17,8

В настоящее время для снижения стоимости готовых изделий используют технологию их получения из гранул. Процесс состоит из отливки гранул и их прессования в готовое изделие, например трубу. Возможно также промежуточное изготовление заготовок с последующей механической обработкой, прошивкой или прессованием готового изделия. Свойства гранулированных магниевых сплавов представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7

## Свойства магниевых и алюминиевых сплавов

Материал	Марка	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{сж0,2}$	$\sigma_B/\rho$	$\delta$
		МПа			к·м	%
Гранулированные сплавы	МА14гр	340	270	270	19	13
	МА14Т1	310	230	230	17	8
Серийные сплавы	МА2-1гр	310	240	150	17	7
	МА2-1	260	150	80	15	8

Благодаря малой плотности и значительной прочности таких сплавов существенно снижается вес конструкции: для корпусных деталей экономия по массе составляет 21, 57 и 111% по сравнению с алюминиевыми, титановыми и стальными деталями соответственно.

Сплавы МА1 и МА8 обладают высокой пластичностью, хорошей коррозионной стойкостью и свариваемостью. Сплав МА2 также обладает хорошей пластичностью, но меньшей стойкостью к коррозии.

### 1.1.7. Никелевые сплавы

*Никелевые литейные жаропрочные сплавы.* В настоящее время для повышения ресурса и эксплуатационных характеристик авиационных и ракетных двигателей широко используются жаропрочные никелевые сплавы ЖС6К, ВЖЛ12У и ЖС6У, которые применяются для изготовления рабочих лопаток турбин и цельнолитых роторов, изготовляемых литьем по выплавляемым моделям с последующей термической обработкой. Они имеют равноосную кристаллизацию (Ni–Co–Cr–Al–Ti–W–Mo) и представляют собой  $\gamma$ -твердый раствор, упрочненный фазой на основе Ni 3 Al. Сплавы предназначены для работы при температурах до 1100°C.

Для рабочих лопаток самолетов гражданской авиации используют сплавы с направленной и монокристалльной структурой ЖС30, ЖС26У, имеющие высокие пределы длительной прочности во всем интервале рабочих температур, выносливости, термостойкости и более высокую термостабильность что позволяет увеличивать ресурс двигателя в четыре-пять раз без промежуточного ремонта. Сплавы ВЖЛ12У, ЖС6К, ЖС6У, обладающие плотностью соответственно 7900, 8100 и 8400 кг/м<sup>3</sup>, при равноосной кристаллизации имеют параметр прочности  $\sigma_{100}^{1000}$  соответственно 150, 160, 170 МПа. Сплавы ЖС30 и ЖС26У при моно- и направленной кристаллизации имеют  $\sigma_{100}^{1000} = 200$  МПа.

Литье лопаток методом направленной кристаллизации осуществляется в тонкостенные керамические формы толщиной 6-7 мм, выдерживающие температуру 1750-1780°C; температура в момент начала деформации под нагрузкой сжатия  $\sigma_{0,2}$  МПа – 1650°C.

Применение тонкостенных форм обеспечивает достижение заданного температурного градиента при литье лопаток с монокристаллической структурой. Высокотермические плавильные тигли изготавливают с применением высокоогнеупорных материалов – электрокорунда, муллита, диоксида магния и специальных спекающих добавок. Использование таких тиглей позволяет устранить взаимодействие расплава с рабочей поверхностью, обеспечивая сохранение исходной чистоты металла.

*Никелевые деформируемые жаропрочные сплавы* используются для изготовления дисков турбин и последних ступеней компрессора ГТД. Для этих целей также успешно используют сплав ЭИ698 (Ni–Cr–Mo–Ti–Al–Nb) без содержания кобальта и вольфрама, который выдерживает рабочую температуру 550–700°C при ресурсе 12000 ч.

Для изготовления дисков турбины и последних ступеней компрессора используют также сплав ЭП742 с кобальтом, дисков турбины и валов компрессора – порошковый сплав ЭП741нп, обладающий более однородной структурой, а также сплавы ЭК79 и ЗК79У.

В таблице 1.8 указаны свойства некоторых никелевых сплавов.

Таблица 1.8

### Свойства никелевых сплавов

Марка сплава	$\sigma^{800}$	$\sigma^{900}$	$\sigma^{1000}$	$\sigma_{100}^{800}$	$\sigma_{100}^{900}$	$\sigma_{100}^{1000}$
ЭП648	420-500	220-230	110-140	140-160	40-50	20-25
ВЖ145	450-480	270-300	150-170	160-170	70-80	30-35

Для деталей горячего тракта и жаровых труб современных ГТД с повышенным ресурсом создан объемно-стабильный высокотехнологичный гомогенный свариваемый сплав ВЖ145. Детали из этого сплава могут быть в процессе ремонта подварены любыми методами сварки.

## 1.2. Металлы и сплавы с особыми свойствами

### 1.2.1. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами

Для ряда отраслей машиностроения и приборостроения необходимо применение материалов со строго регламентированными значениями в определенных температурных интервалах эксплуатации таких физических свойств, как температурные коэффициенты линейного расширения  $\alpha$  (ТКЛР) и модуля нормальной упругости  $\beta$  (ТКМУ). Эти коэффициенты определяют характер изменения размеров детали и модуля упругости сплава при нагреве.

### 1.2.2. Сплавы с регламентируемым температурным коэффициентом линейного расширения

Основным представителем сплавов с минимальным ТКЛР является сплав 36Н. Инвар имеет самые низкие значения  $\alpha$  в интервале температур от 100 до +100°C. Благодаря высокому уровню механических свойств и технологичности инвар используется в качестве конструкционного материала для деталей, от которых требуется постоянство размеров при меняющихся температурных условиях эксплуатации. Из инвара изготавливают жестко-закрепленные трубопроводы сложной пространственной формы,



перекачивающие сжиженные газы в криогенных установках. Малая величина ТКЛР позволяет уменьшить напряжения в трубопроводах и предотвратить возможность их разрушения. Отпадает необходимость установки сильфонных узлов для компенсации деформации, что упрощает конструкцию и делает ее более надежной.

Для обеспечения минимально возможного ТКЛР и наибольшей стабильности размеров содержание углерода в сплавах инварного состава не должно превышать 0,05%. Более высокое содержание углерода приводит к изменению параметров кристаллической решетки и магнитострикции парапроцесса. Для сплавов со стеклом повышенное содержание углерода приводит к выделению  $\text{CO}_2$  в процессе впаивания и образованию газовых пузырей в стекле.

В таблице 1.9 приведены составы и свойства сплавов с регламентированными значениями ТКЛР, нашедших наибольшее применение. Значения ТКЛР приведены в состоянии после отжига при температуре  $\sim 900^\circ\text{C}$  с последующим медленным охлаждением.

Таблица 1.9

**Состав и свойства Fe–Ni сплавов с регламентированным ТКЛР (ГОСТ 10994-74)**

Названия сплавов	Марка сплава	Массовая доля элементов			$\Delta T$ °C	Теплопроводность $\alpha$ , $10^{-6}\text{K}^{-1}$
		Ni, %	Co, %	Cu, %		
Инвар	36Н	35-37	–	–	20-80	1,5
Супер инвар	32НКД	31,5-33	3,3-4,2	0,6-0,8	20-100	1,0
Ковар	29НК	28,5-29,5	17-18	–	20-400	4,5-5,2
Платинит	47НД	46-48	–	4,5-5,5	20-400	9,2-10,0

ТКЛР сплавов зависит от предварительной обработки. Минимальное значение коэффициента  $\alpha$  инвара достигается после закалки от  $830^\circ\text{C}$ , в результате которой примеси переходят в твердый раствор, и отпуска при  $315^\circ\text{C}$ . Холодная деформация также способствует снижению ТКЛР. В результате комбинации обеих обработок  $\alpha$  становится почти равным нулю.

Замена части никеля равным количеством кобальта и легирование малыми добавками меди позволяет дополнительно снизить ТКЛР инвара. Такой сплав называют *суперинваром*.

В электровакуумных газоразрядных и полупроводниковых приборах широко используют спаи металлов с такими диэлектриками, как стекло и керамика. Для обеспечения герметичности и вакуумной плотности спаев необходимо соответствие ТКЛР материалов соединяемой пары в эксплуатационном интервале температур. Во избежание напряжений и трещин значение ТКЛР сплава должно быть максимально приближено к ТКЛР диэлектрика и строго регламентировано.

Состав сплавов для пайки и сварки со стеклом подбирают таким образом, чтобы ТКЛР стекла и металла были близки во всем интервале температур вплоть до размягчения стекла. Ковар применяют для соединения с термостойкими стеклами, а платинит – с обычными легкоплавкими стеклами, применяемыми в электровакуумной промышленности.

Стали с определенным тепловым расширением служат также для изготовления термобиметаллов, когда слой с низким тепловым расширением (пассивный слой) путем прокатки надежно соединяют с другим слоем, обладающим более высоким тепловым расширением (активный слой). Биметаллические пластины используют в качестве терморегулятора в приборостроении. Нагрев такой пластинки приводит к ее искривлению, позволяющему замкнуть электрическую цепь.

Основным свойством термобиметаллов является термочувствительность, т.е. способность изгибаться при изменении температуры.

### **1.2.3. Сплавы с постоянным модулем упругости**

Сплавы с заданными свойствами упругости, помимо низких значений ТКМУ, должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и релаксационной стойкостью в условиях статического и циклического нагружения.

Уровень ТКМУ чистого железоникелевого сплава даже при небольших колебаниях концентрации никеля, неизбежных в сталеплавильном производстве, становится нестабильным и претерпевает значительные изменения.

Легирование хромом повышает стабильность сплава. Элинвар, содержащий 36% Ni и 12% Cr, характеризуется такими же значениями ТКМУ, как и чистый Fe–Ni сплав, но менее зависящими от возможных отклонений в концентрации никеля. Однако он имеет более низкие механические свойства, которые нельзя улучшить

термической обработкой из-за стабильности аустенитной структуры. Кроме того, температура Кюри этого сплава составляет около 100°С, что ограничивает температурный интервал его применения.

Для повышения температуры Кюри в элинварах увеличивают концентрацию никеля, а для улучшения механических свойств элинвары дополнительно легируют титаном, алюминием или бериллием и подвергают двойной закалке 900-950°С в воду и старению при 600-700°С в течение 4 часов. В таблице 1.10 указаны состав и свойства элинварных сплавов.

Таблица 1.10

### Состав и свойства элинварных сплавов (ГОСТ 10994-74)

Марка сплавов	Массовая доля элементов, %, остальное – железо				Механические свойства после термообработки			$\alpha$	Температура эксплуатации
	Ni	Cr	Ti	Al	$\sigma_{0,005}$ , МПа	$\delta$ , %	E, ГПа	$10^{-6} \text{ K}^{-1}$	°С
42НХТЮ	41,5-43,5	5,3-5,9	2,4-3,0	0,5-1,0	590-690	10-15	177-186	9,5	От -269 до +100
44НХТЮ	43,5-45,5	5,0-5,6	2,2-2,7	0,4-0,8	590-640	10-15	177-181	8,0	От -269 до +200
30Н25КТЮ*	29,5-30,5	–	2,7-3,0	0,5-1,0	–	–	–	–	От -269 до +400

\* Данный сплав содержит 25,5-26,5% Со

После первой закалки элинварные сплавы высокопластичны. Относительное удлинение сплава 42НХТЮ составляет не менее 30%, сплава 44НХТЮ – не менее 20%. В этом состоянии они могут подвергаться штамповке и механической обработке.

При повторной закалке избыточные фазы растворяются в аустените, а при старении из твердого раствора происходит выделение упрочняющих дисперсных фаз  $(\text{FeNi})_3(\text{TiAl})$ ,  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ . К наибольшему упрочнению приводит сочетание низкотемпературной термомеханической обработки с последующим старением.

Элинварные дисперсионно-твердеющие сплавы типа 42НХТЮ, 44НХТЮ применяют для изготовления упругих чувствительных элементов прецизионных приборов: расходомеров, регуляторов скорости и датчиков линейных ускорений, динамометров электронных весов, волосковых спиралей часовых механизмов.

Сплав 30Н25КТЮ относится к элинварам с наиболее высокой точкой Кюри (470°С). Благодаря этому он сохраняет температурную стабильность упругих свойств и релаксационной стойкости вплоть до 400°С. Сплав рекомендуется применять после низкотемпературной термомеханической обработки с последующей закалкой и старением. Учитывая большое влияние предшествующей обработки на свойства стали, конкретный режим деформации и термической обработки подбирается для каждой партии сплава в зависимости от заданных механических свойств. Высокий запас пластичности в горячем и холодном состоянии позволяет изготавливать изделия сложной формы.

#### **1.2.4. Металлы с памятью формы**

Долгое время неупругую деформацию считали полностью необратимой. В начале 60-х годов XX в. был открыт обширный класс металлических материалов, у которых элементарный акт неупругой деформации осуществляется за счет структурного превращения. Такие материалы обладают обратимостью неупругой деформации. Явление самопроизвольного восстановления формы – эффект памяти формы (ЭПФ) – может наблюдаться как в изотермических условиях, так и при температурных изменениях. При теплосменах такие металлические материалы могут многократно обратимо деформироваться.

Способность к восстановлению деформации не может быть подавлена даже при высоком силовом воздействии. Уровень реактивных напряжений некоторых материалов с ЭПФ может составлять до 1000-1300 МПа.

Металлы, обладающие ЭПФ, относятся к числу наиболее ярких представителей материалов со специальными свойствами. Повышенный интерес к этому металлургическому феномену обусловлен уникальным сочетанием высоких обычных механических характеристик, сопротивления усталости, коррозионной стойкости и необычных свойств, таких как термомеханическая память, реактивное напряжение, основанных на термоупругом мартенситном превращении. Особенностью сплавов с ЭПФ является ярко выраженная зависимость большинства свойств от структуры. Значения физико-механических характеристик меняются в несколько раз при обратимом фазовом переходе аустенит – мартенсит для разных сплавов в интервале температур обычно от -150 до + 150°С.

Из большого числа сплавов с ЭПФ наиболее перспективными для практического применения являются сплавы Ti–Ni эквиатомного состава (примерно 50:50% (ат.)), обычно называемые никелидом титана или нитино-лом. Реже используют более дешевые сплавы на основе меди Cu–Al–Ni и Cu–Al–Zn.

Эффект памяти формы состоит в том, что образец, имеющий определенную форму в аустенитном состоянии при повышенной температуре, деформируют при более низкой температуре мартенситного превращения. После перегрева, сопровождающегося протеканием обратного превращения, исходная характерная форма восстанавливается. ЭПФ проявляется в сплавах, характеризующихся термоупругим мартенситным превращением, когерентностью решеток исходной аустенитной и мартенситной фаз, сравнительно небольшой величиной гистерезиса превращения, а также малыми изменениями объема при превращениях. В никелиде титана объемные изменения составляют около 0,34%, что на порядок меньше, чем в сталях (около 4%).

Сплавы с ЭПФ часто относят к так называемым интеллектуальным материалам, позволяющим создавать принципиально новые конструкции и технологии в разных отраслях машиностроения.

#### **1.2.5. Радиационностойкие материалы**

Конструкционные материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, оказывающие отрицательное влияние, в первую очередь, на механические свойства и коррозионную стойкость. Из всех видов облучения (нейтроны,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы,  $\gamma$ -излучение) наиболее сильное влияние оказывает нейтронное облучение.

Радиационностойкими материалами называют материалы, сохраняющие стабильность структуры и свойств в условиях нейтронного облучения.

В таблице 1.11 показано, что происходит при воздействии нейтронного облучения на различные материалы

Таблица 1.11

**Воздействие нейтронного облучения на различные материалы**

Интегральный поток быстрых нейтронов, нейтронов/см <sup>2</sup>	Материал	Воздействие облучения
1014 – 1015	Политетрафторэтилен, полиметилметакрилат и целлюлозы	Снижение прочности при растяжении
1016	Каучук	Снижение эластичности
1017	Органические жидкости	Газовыделение
1018 – 1019	Металлы	Заметный рост предела текучести
1018 – 1019	Полистирол	Снижение прочности при растяжении
1020	Керамические материалы	Уменьшение теплопроводности, плотности, кристалличности
1020	Все пластмассы	Непригодны для использования в качестве конструкционного материала
1020	Углеродистые стали	Значительное снижение пластичности, удвоение предела текучести, повышение перехода от вязкого разрушения к хрупкому
1020 – 1021	Коррозионностойкие стали	Трехкратное увеличение предела текучести
1021	Алюминиевые сплавы	Снижение пластичности без полного охрупчивания

Скорость коррозии сплавов на основе алюминия в водной среде в условиях облучения возрастает в 2-3 раза. Аустенитные хромоникелевые стали во влажном паре подвержены межкристаллической коррозии и коррозионному растрескиванию.

Наиболее опасным следствием облучения является радиационное распухание. На рисунке 1.1 представлены характеристики радиационного распухания ряда марок сталей и сплавов.

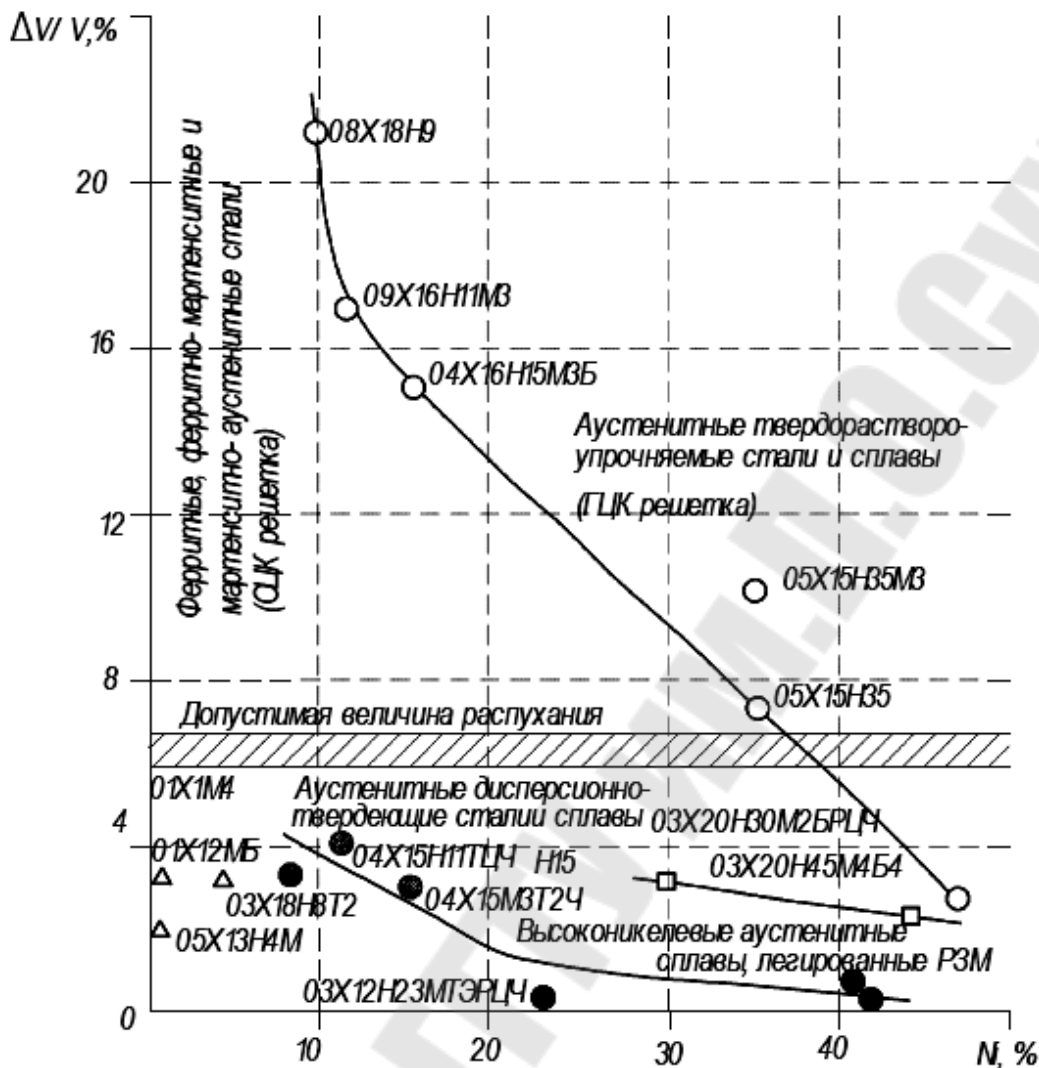


Рис. 1.1. Зависимость радиационного распухания сталей и сплавов с ОЦК и ГЦК решетками от структуры

Распухание можно подавить путем структурно-принудительной рекомбинации металлов за счет непрерывного распада твердого раствора с определенной дилатацией на границе матрицы с образующейся вторичной фазой. Возникающие при распаде сильные поля структурных напряжений способствуют рекомбинации радиационных дефектов и существенно снижают распухание. Развитое дисперсионное твердение является способом подавления радиационного распухания.

Радиационная стойкость реакторных материалов может быть достигнута при выполнении комплекса условий: оптимальные химический состав и структура материалов; условия их эксплуатации: уровни рабочей температуры, нейтронного потока и свойства коррозионной среды.

### 1.2.6. Аморфные металлические сплавы

В обычных условиях реализуются лишь восходящие ветви кривых скоростей зарождения и роста кристаллов ( $C_3$  и  $C_Р$ ) и с ростом  $\Delta T$  увеличиваются скорости обоих процессов.

Использование специальных методов позволяет достигать скорости охлаждения более  $10^5$  К/с и получать металл в стеклообразном аморфном состоянии.

На рисунке 1.2 схематически изображена ТТТ диаграмма (temperature-time-transformation), которая показывает характер фаз, образующихся в сплаве при различных скоростях охлаждения. При переохлаждении жидкой фазы ниже равновесной температуры плавления  $T_{пл}$  скорость кристаллизации достигает максимума при температуре  $T_n$ .

Если жидкость закалить со скоростью выше критической до температуры стеклования  $T_d$ , то система будет «заморожена» и образуется аморфное состояние. Критическая скорость охлаждения для разных аморфных сплавов составляет от  $10^2$  до  $10^{10}$  К/с.

Из диаграммы также следует, что если полученный аморфный сплав впоследствии нагреть до температуры  $T < T_n$  и выдерживать изотермически в течение времени  $\tau_x$ , он начнет кристаллизоваться. Если же аморфный сплав медленно нагревать от комнатной температуры, то кристаллизация начинается при температуре  $T_x$ , которая подобна структуре замороженной жидкости.

Затвердевание происходит настолько быстро, что атомы вещества оказываются замороженными в тех положениях, которые они занимали, будучи в жидком состоянии.

Аморфная структура характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов, благодаря чему в ней нет кристаллической анизотропии, отсутствуют границы блоков, зерен и другие дефекты структуры.



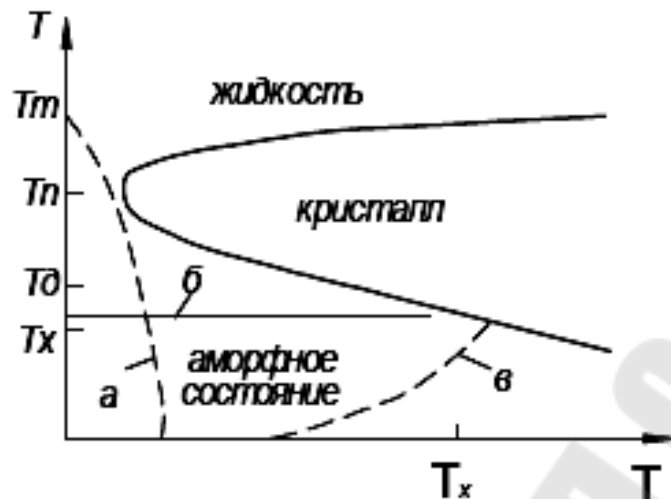


Рис. 1.2. Схема диаграммы процесса образования фаз в переохлажденном расплаве:  
*a* – критическая скорость охлаждения с получением аморфного состояния; *б* – изотермический отжиг аморфного состояния, приводящий к кристаллизации в период времени  $\tau_x$ ; *в* – медленный нагрев аморфного состояния, ведущий

Следствием такой аморфной структуры являются необычные магнитные, механические, электрические свойства и коррозионная стойкость аморфных металлических сплавов. Наряду с высокой магнитной мягкостью, такой, что уровень электромагнитных потерь в аморфных сплавах с высокой магнитной индукцией оказывается существенно ниже, чем во всех известных кристаллических сплавах, эти материалы проявляют исключительно высокие механическую твердость и прочность при растяжении, в ряде случаев имеют близкий к нулю коэффициент теплового расширения, а удельное электросопротивление их в три-четыре раза выше его значения для железа и его сплавов. Некоторые из аморфных сплавов характеризуются высокой коррозионной стойкостью.

Затвердевание с образованием аморфной структуры принципиально возможно для всех металлов и сплавов. Для практического применения обычно используют сплавы переходных металлов (Fe, Co, Mn, Cr, Ni и др.), в которые для образования аморфной структуры добавляют аморфообразующие элементы (B, C, Si, P, S). Такие аморфные сплавы обычно содержат около 80% (ат.) одного или нескольких переходных металлов и 20% металлоидов, добавляемых для образования и стабилизации аморфной структуры. Состав аморфных

сплавов близок по формуле  $Me_{80}X_{20}$ , где  $Me$  – один или несколько переходных металлов, а  $X$  – один или несколько аморфизаторов. Аморфизаторы понижают температуру плавления и обеспечивают достаточно быстрое охлаждение расплава ниже его температуры стеклования так, чтобы в результате образовалась аморфная фаза. На термическую стабильность аморфных сплавов оказывают наибольшее влияние кремний и бор, наибольшей прочностью обладают сплавы с бором и углеродом, а коррозионная стойкость зависит от концентрации хрома и фосфора.

Уникальный характер металлических стекол проявляется в физико-механических и химических свойствах. Отсутствие свойственной кристаллам периодичности в структуре оказывается причиной высокой прочности, магнитомягкого поведения, крайне низких акустических потерь и высокого электросопротивления. Процессы усталостного разрушения и намагничивания в металлических стеклах и кристаллических металлах во многих отношениях очень сходны. Химическая однородность обуславливает высокую коррозионную стойкость некоторых металлических стекол в кислых средах, а также растворах, содержащих ионы хлора. Почти неограниченная взаимная растворимость элементов в стеклообразном состоянии представляет большой интерес для изучения процессов электронного переноса при низких температурах.

Аморфные высокоуглеродистые стали, содержащие  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $W$ , обладают высоким сопротивлением разрушению и термической стабильностью: например,  $Fe_{54}Cr_{16}Mo_{12}C_{18}$  имеет предел прочности при растяжении 3800 МПа и температуру кристаллизации 880 К.

При этом такие высокоуглеродистые сплавы имеют высокие коррозионные характеристики и нечувствительны к охрупчиванию при старении. Такие сплавы целесообразно использовать в высокопрочных композитах.

Сочетание высокой прочности, коррозионной стойкости и износостойкости, а также магнитомягких свойств обуславливает возможность и других областей применения. Например, возможно использование таких стекол в качестве индукторов в устройствах магнитной сепарации. Изделия, сплетенные из ленты, использовали в качестве магнитных экранов. Преимущество этих материалов в том, что их можно разрезать и изгибать для получения необходимой формы, не снижая при этом их магнитных характеристик.

Аморфные сплавы практически не подвержены питтинговой коррозии, даже в случае анодной поляризации в соляной кислоте.

Высокая стойкость против коррозии обусловлена образованием на поверхности пассивирующих пленок, обладающих высокими защитными свойствами, высокой степенью однородности и быстротой образования. Помимо хрома повышению коррозионной стойкости способствует введение фосфора. В пленке высокохромистых кристаллических сталей всегда присутствуют микропоры, которые со временем преобразуются в очаги коррозии. Образование однородной пассивирующей пленки обеспечивается химической и структурной однородностью аморфной фазы, лишенной кристаллических дефектов, таких как выделения избыточной фазы, сегрегационные образования и границы зерен.

Аморфные металлы часто называют материалами будущего, что обусловлено уникальностью их свойств, не встречающихся у обычных кристаллических металлов (таблица 1.12).

Таблица 1.12

### Свойства и основные области применения аморфных металлических материалов

Состав сплава	Свойства	Применение
Fe75Si10B15	Высокая прочность, высокая вязкость	Проволока, армирующие материалы, пружины, режущий инструмент
Fe45Cr25Mo10P13 C7	Высокая коррозионная стойкость	Электродные материалы, фильтры для работ в растворах кислот, морской воде, сточных водах
Fe81B13Si4C2	Высокая магнитная индукция насыщения, низкие потери	Сердечники трансформаторов, преобразователи, дроссели
Fe5Co70Si10B15	Высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила	Магнитные головки и экраны, магнетометры, сигнальные устройства
Fe83B17	Постоянство модулей упругости и температурного коэффициента линейного расширения материала	Инварные и элинварные материалы

### 1.2.7. Сверхпроводящие материалы

С понижением температуры наблюдается монотонное падение электросопротивления. Вблизи абсолютного нуля у многих металлов и сплавов происходит резкое падение электросопротивления, и они становятся сверхпроводниками (рис. 1.3).

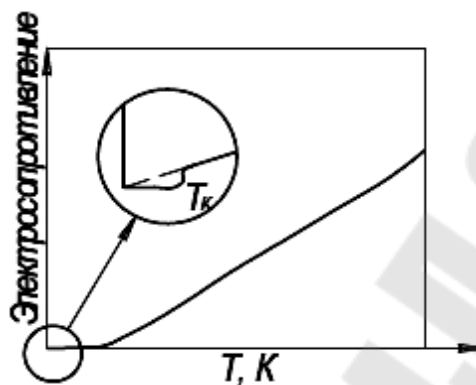


Рис. 1.3. Влияние температуры на электросопротивление сверхпроводящих материалов

*Сверхпроводимость* – способность материалов не оказывать сопротивления электрическому току при температурах ниже характерной для них критической температуры  $T_k$ .

Поиск новых сверхпроводников продолжается, хотя пока проблема остается чисто научной. В перспективе необходимо разработать технологию производства и применения высокотемпературных сверхпроводников. Наиболее важными областями применения сверхпроводников является создание сильных магнитных полей, получение и передача электроэнергии.

Сверхпроводящие магниты используют для исследований в области физики высоких энергий, создания мощных магнитных кольцевых ускорителей частиц и систем управления движением пучков частиц на выходе из ускорителя. Сверхпроводящие магнитные системы применяют в жидководородных пузырьковых камерах, в которых по кривизне траекторий от пузырьков вскипающей жидкости определяют знак заряда и импульс пролетающих частиц.

В настоящее время исследователями ряда стран разработано большое число керамических материалов с переходом при температурах  $250K$  и даже при комнатной температуре. Значительная часть разработанных материалов характеризуется нестабильностью и большой хрупкостью. Динамика разработок сверхпроводящих материалов представлена на рисунке 1.4.

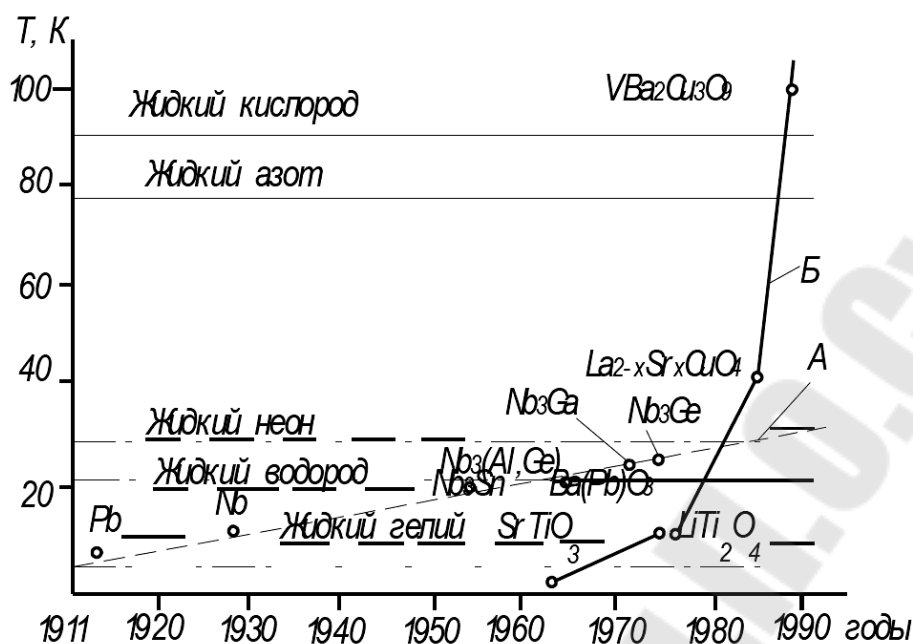


Рис. 1.4. Динамика разработок сверхпроводников:  
 А – металлические материалы, В – керамика

Из всех чистых металлов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, наивысшую критическую температуру перехода имеет ниобий ( $T_{кр}=9,2\text{К}$ ). Но для ниобия характерны низкие значения критического магнитного поля (около  $0,24\text{Тл}$ ), что недостаточно для его широкого применения. Хорошим сочетанием критических параметров  $T_{к}$  и  $B_{к}$  отличаются сплавы и интерметаллидные соединения ниобия с цирконием, титаном, оловом и германием. В таблице 1.13 приведены критические параметры сверхпроводников, представляющих практический интерес.

Таблица 1.13

### Критические параметры сверхпроводящих материалов

Сверхпроводящий материал	Критические параметры		Сверхпроводящий материал	Критические параметры	
	$T_{к}$ , К	$B$ , Тл, при $T_{к}=4,2\text{К}$		$T_{к}$ , К	$B$ , Тл, при $T_{к}=4,2\text{К}$
Nb–Zr	9-11	7-9	Nb <sub>3</sub> Ga	20,2	34
Nb–Ni	8-10	9-13	Nb <sub>3</sub> Ge	23,2	37
Nb <sub>3</sub> Sn	18,0	22-25	V <sub>3</sub> Ga	14,5-15,0	21
Nb <sub>3</sub> Al <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub>	20,3-20,5	40	V <sub>3</sub> Si	17,0	23

Сверхпроводимость позволяет также решить проблему запаса электроэнергии впрок с выдачей ее при пиковых нагрузках. Индуктивный накопитель энергии представляет собой тороидальный криостат диаметром несколько метров, по виткам обмотки которого практически без потерь циркулирует ток.

### **1.2.8. Материалы со специальными магнитными свойствами**

К материалам со специальными магнитными свойствами относятся сплавы с большой магнитострикцией и термомагнитные сплавы.

Сплавы с большой магнитострикцией используют в ультразвуковой и гидроакустической аппаратуре для изготовления излучателей, ультразвуковых преобразователей энергии, линий задержки в электрических цепях и электромеханических фильтров. Применение каждого магнитострикционного сплава определяется комплексом магнитных и механических свойств, а также сохранением этого комплекса во всем интервале рабочих температур

Коэффициент магнитной связи  $k = E_1/E_2$  показывает, какая доля подведенной магнитной или механической энергии  $E_2$  преобразуется соответственно в механическую или магнитную энергию  $E_1$  (без учета магнитных и механических потерь).

Добротность магнитострикционного материала характеризует магнитострикционная постоянная:

$$a = \sigma/B, \quad (1.2.1)$$

где  $\sigma$  – напряжение, Па;  $B$  – соответствующая этому напряжению индукция, Тл.

Измеряют  $a$  в процессе намагничивания сердечника при его фиксированной деформации, т.е. когда сердечник предварительно упруго сжат. Величина  $B/\sigma$ , обратная  $a$ , называется динамической постоянной чувствительности.

Потери энергии при магнитострикционных колебаниях превращаются в теплоту и вызывают нагрев изделий. Чем выше  $\theta$ , тем меньше изменяются магнитные свойства из-за этого нагрева. Например, у сплава 49К2Ф удельные потери при  $B = 1$ Тл и  $f$  (частоте магнитных колебаний), равной 100 и 1000Гц, составляют 2 и 20 Вт/кг соответственно, а при  $B = 2$ Тл и таких же значениях  $f$  – 6 и 60Вт/кг. Свойства магнитострикционных сплавов приведены в таблице 1.14.

Интенсивность намагничивания у термомагнитных сплавов уменьшается с повышением температуры, поэтому, чтобы компенсировать ошибки приборов, обусловленные изменением магнитного потока при изменении температуры, в магнитную цепь вводят шунты.

Таблица 1.14

### Свойства магнестрикционных сплавов

Марка сплава	$\lambda_s$ $s \cdot 10^6$	$B_s$ , Тл	$H_c$ , А/м	$\theta$ , °С	$k$	$a \cdot 10^7$ , Па/Тл
49К2Ф	70	2,40	140	980	0,48-0,54	2,2
65К	90	2,20	100	980	0,27-0,30	1,5
14Ю	40	1,20	25	500	0,26	1,2
12Ю	40	1,60	10	600	0,30	0,9

Магнитная индукция ферромагнетиков очень резко изменяется вблизи точки Кюри, поэтому материал шунта должен иметь температуру точки Кюри в интервале рабочих температур.

Этим условиям удовлетворяет сплав Fe+ (30-35%) Ni, – который перестает быть ферромагнитным при 100°С. Введение в сплав хрома или алюминия дополнительно снижает температуру точки Кюри. Потребность в магнитах на основе редкоземельных металлов (РЗМ) постоянно растет, поскольку они используются во всех отраслях промышленности, в том числе и в быту. В настоящее время при изготовлении поездов, движущихся на основе магнитной левитации, переходят от использования электромагнитов на постоянные магниты. В 1979 году в Японии поезд МЛ-500 достиг скорости 517 км/ч. Немецкий 200-местный поезд Transrapid-06 в 1988 году достиг скорости 400 км/ч.

При использовании магнитной левитации сопротивление движению в 20 раз меньше, чем рельсового поезда. Кроме того, отсутствует износ колес и рельсов. Разработаны три базовых сплава для магнитов на основе РЗМ ( $SmCo_5$ ,  $Sm_2Co_{17}$  и  $Nd_2Fe_{14}B$ ), которые легируют в зависимости от технических требований и условий эксплуатации широким спектром металлов: Dy, Tb, Al, Cu, Nb, Zr, Ga. Магниты на основе Nd–Fe–B с более высокими значениями остаточной магнитной индукции  $B_r$ , максимального энергетического произведения  $[(BH)_{max}]$  и меньшей стоимостью не могут заменить магниты на основе Sm–Co, так как последние обладают примерно в два раза более высокой максимальной температурой эксплуатации.

Существуют две основные технологии производства магнитов на основе РЗМ: порошковая технология, основанная на спекании с последующим шлифованием, и упрощенная технология получения композиционных магнитов (КМ, порошок РЗМ плюс полимерное связующее) без механической обработки. Композиционные магниты в два-четыре раза дешевле спеченных, уступают им по магнитным характеристикам, но превосходят все серийно выпускаемые магниты, не содержащие РЗМ, например ферриты, ЮНДК ит.д., и применяются в бытовой технике. В настоящее время у нас нет серийного производства КМ на основе РЗМ, тогда как в США, Японии и других странах их удельный вес в производстве непрерывно растет.

В настоящее время разработаны спеченные и композиционные магниты, характеристики которых приведены в таблице 1.15.

Таблица 1.15

#### Свойства магнитов на основе редкоземельных металлов

Тип магнита	Марка	$B_r$ , Тл	$iH_c$ , кА/м	$(BH)_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	ТКИ, °С	$T_{аб. max}$ , °С
Спеченный	ВМТ-64	0,57	630	64	0,08	120
	ВМТ-80	0,63	720	80	-0,07	140
	ВМТ-95	0,70	960	95	-0,06	160
	ВМТ-110	0,75	1275	110	-0,05	180
	ВМТ-240	1,10	1300	239	-0,035	250
	ВМТ-280	1,18	940	279	-0,05	100
Композиционный	ВПМТ-100	0,70	2000	98	-0,05	150
	ВПМТ-130	0,80	560	128	-0,12	60



## ТЕМА 2 КЕРАМИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 2.1. Керамические материалы

#### 2.1.1. Виды керамических материалов

Керамика относится к основным материалам, оказывающим определяющее влияние на уровень и конкурентоспособность промышленной продукции. Это влияние сохранится и в ближайшем будущем. Войдя в технику и технологию в конце 60-х годов XX века, керамика произвела настоящую революцию в материаловедении, за короткое время став, по общему мнению, третьим промышленным материалом после металлов и полимеров.

Керамика была первым конкурентоспособным по сравнению с металлами классом материалов для использования при высоких температурах.

Основными разработчиками и производителями керамических материалов являются США и Япония. В таблице 2.1 приведена классификация основных видов керамики.

Исследование, проведенное Национальным бюро стандартов США, показало, что использование керамических материалов позволило к 2000 г. осуществить экономию ресурсов страны в размере более 3 млрд. долларов. Ожидаемая экономия была достигнута прежде всего за счет использования транспортных двигателей с деталями из керамики, керамических материалов для обработки резанием и оптокерамики для передачи информации. Помимо прямой экономии применение керамики позволит снизить расход дорогих и дефицитных металлов: титана и тантала в конденсаторах, вольфрама и кобальта в режущих инструментах, кобальта, хрома и никеля в тепловых двигателях.

*Керамическая технология* предусматривает следующие основные этапы: получение исходных порошков, изготовление компактных материалов, их обработку и контроль изделий.

При производстве высококачественной керамики с высокой однородностью структуры используют порошки исходных материалов с размером частиц до 1 мкм. Процесс получения столь высокой степени дисперсности требует больших энергозатрат и является одним из основных этапов керамической технологии.

Измельчение производится механическим путем с помощью мельющих тел, а также путем распыления измельчаемого материала в

жидком состоянии, осаждением на холодных поверхностях из парогазовой фазы, виброкавитационным воздействием на частицы, находящиеся в жидкости, с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и другими методами.

Таблица 2.1

### Характеристика основных видов керамики

Функциональный вид керамики	Используемые свойства	Применение	Используемые соединения
1	2	3	4
Электрокерамика	Электропроводимость, электроизоляционные, диэлектрические и пьезоэлектрические свойства	Интегральные схемы, конденсаторы, вибраторы, зажигатели, нагреватели, термисторы, транзисторы, фильтры, солнечные батареи, твердые электролиты	BeO, MgO, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZnO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , SiC, B <sub>4</sub> C, TiC, CdS, титанаты, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Магнетокерамика	Магнитные свойства	Головки магнитной записи, магнитные носители, магниты	Магнитомягкие магнитотвердые ферриты
Оптокерамика	Прозрачность, поляризация, флуоресценция	Лампы высокого давления, ИК-прозрачные окна, лазерные материалы, световоды, элементы оптической памяти, экраны дисплеев, модуляторы	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Y <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , TO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ThO <sub>2</sub> , ZnS, CdS
Хемокерамика	Абсорбционная и адсорбционная способность, каталитическая активность, коррозионная стойкость	Сорбенты, катализаторы и их носители, электроды, датчики влажности газов, элементы химических реакторов	ZnO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SnO, SiO <sub>2</sub> , MgO, BaS, CeS, TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC, титаниды

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4
Био-керамика	Биологическая совместимость, стойкость к биокоррозии	Протезы зубов, суставов	Системы оксидов
Термо-керамика	Жаропрочность, жаростойкость, огнеупорность, теплопроводность, коэффициент термического расширения (КТР), теплоемкость	Огнеупоры, тепловые трубы, футеровка высокотемпературных реакторов, электроды для металлургии, теплообменники, теплозащита	SiC, TiC, B <sub>4</sub> C, TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , BeS, CeS, BeO, MgO, ZrO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO, композиты
Механо-керамика	Твердость, прочность, модуль упругости, вязкость разрушения, износостойкость, триботехнические свойства, КТР, термостойкость	Керамика для тепловых двигателей, уплотнительная, антифрикционная и фрикционная; режущий и прессинструмент; направляющие, износостойкие детали	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , ZrO <sub>2</sub> , SiC, TiB <sub>2</sub> , ZnB <sub>2</sub> , TiC, TiN, WC, B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BN, композиты
Ядерная керамика	Радиационная стойкость, жаропрочность и стойкость, захват нейтронов, огнеупорность, радиоактивность	Ядерное горючее, футеровка реакторов, экранирующие материалы, поглотители излучения, поглотители нейтронов	UO <sub>2</sub> , UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> , UC, US, ThS, SiC, B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BeO
Сверхпроводящая керамика	Электропроводимость	Линии электропередач, МГД-генераторы, накопители энергии, интегральные схемы, железнодорожный транспорт на магнитной подвеске	Оксидные системы: La-Ba-Cu-O, La-Sr-Cu-O, Y-Ba-Cu-

Для сверхтонкого помола (частицы менее 1 мкм) наиболее перспективны вибрационные мельницы, или атриторы.

Консолидация керамических материалов состоит из процессов формования и спекания. Различают три основные группы методов формования:

1. Прессование под действием сжимающего давления, при котором происходит уплотнение порошка за счет уменьшения пористости.

2. Пластичное формование выдавливанием прутков и труб через мундштук (экструзия) формовочных масс с пластификаторами, увеличивающими их текучесть.

3. Шликерное литье для изготовления тонкостенных изделий любой сложной формы, в котором для формования используют жидкие суспензии порошков.

При переходе от прессования к пластичному формованию и шликерному литью увеличиваются возможности изготовления изделий сложной формы, однако усложняется процесс сушки изделий и удаления пластификаторов из керамического материала. Поэтому для изготовления изделий сравнительно простой формы предпочтение отдается прессованию, а более сложной – экструзии и шликерному литью.

При спекании отдельные частицы порошков превращаются в монолит и формируются окончательные свойства керамики. Процесс спекания сопровождается уменьшением пористости и усадкой.

Применяют печи для спекания при атмосферном давлении, установки горячего изостатического прессования (газостаты), прессы горячего прессования с усилием прессования до 1500 кН. Температура спекания в зависимости от состава может составлять до 2000-2200°C.

Часто применяются совмещенные методы консолидации, сочетающие формование со спеканием, а в некоторых случаях – синтез образующегося соединения с одновременным формованием и спеканием.

Обработка керамики и контроль являются основными составляющими в балансе стоимости керамических изделий.

По некоторым данным, стоимость исходных материалов и консолидации составляет всего лишь 11% (для металлов – 43%), в то время как на обработку приходится 38% (для металлов – 43%), а на контроль – 51% (для металлов – 14%).

К основным методам обработки керамики относятся термообработка и размерная обработка поверхности.

Термообработка керамики производится с целью кристаллизации межзеренной стеклофазы. При этом на 20-30% повышаются твердость и вязкость разрушения материала.

Большинство керамических материалов с трудом поддается механической обработке. Поэтому основным условием керамической технологии является получение практически готовых изделий. Для доводки поверхностей керамических изделий применяют абразивную обработку алмазными кругами, электрохимическую, ультразвуковую и лазерную обработку. Эффективно применение защитных покрытий, позволяющих залечить мельчайшие поверхностные дефекты – неровности, риски и т.д.

Для контроля керамических деталей чаще всего используют рентгеновскую и ультразвуковую дефектоскопию.

Учитывая, что большинство керамических материалов имеет низкую вязкость и пластичность и, соответственно, низкую трещиностойкость, для аттестации изделий применяют методы механики разрушения с определением коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ . Одновременно строят диаграмму кинетики роста дефекта.

Количественно вязкость разрушения кристаллической керамики и стекла составляет около  $1-2 \text{ МПа/м}^{1/2}$ , в то время как для металлов значения  $K_{Ic}$  значительно выше (более  $40 \text{ МПа/м}^{1/2}$ ). Прочность химических межатомных связей, благодаря которой керамические материалы обладают высокой твердостью, химической и термической стойкостью, одновременно обуславливает их низкую способность к пластической деформации и склонность к хрупкому разрушению.

Возможны два подхода к *повышению вязкости разрушения керамических материалов*. Один из них *традиционный*, связанный с совершенствованием способов измельчения и очистки порошков, их уплотнения и спекания. Вторым подходом является *торможение роста трещин под нагрузкой*. Существует несколько способов решения этой проблемы. Один из них основан на том, что в некоторых керамических материалах, например в диоксиде циркония  $\text{ZrO}_2$ , под давлением происходит перестройка кристаллической структуры. Исходная тетрагональная структура  $\text{ZrO}_2$  переходит в моноклинную, имеющую на 3-5% больший объем.

Расширяясь, зерна  $\text{ZrO}_2$  сжимают трещину, и она теряет способность к распространению (рис. 2.1, а). При этом сопротивление хрупкому разрушению возрастает до  $15 \text{ МПа/м}^{1/2}$ .

Второй способ (рис. 2.1., б) состоит в создании композиционно-го материала путем введения в керамику волокон из более прочного керамического материала, например карбида кремния SiC. Развивающаяся трещина на своем пути встречает волокно и дальше не распространяется. Сопrotивление разрушению стеклокерамики с волокнами SiC возрастает до 18-20 МПа/м<sup>1/2</sup>, существенно приближаясь к соответствующим значениям для металлов.

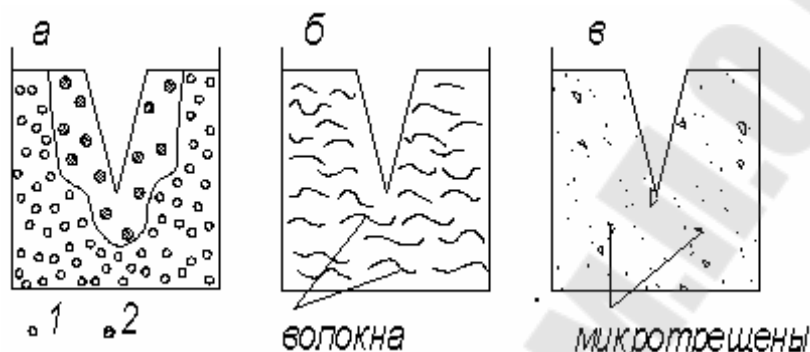


Рис. 2.1. Схема упрочнения конструкционной керамики включениями  $ZrO_2$  (а), волокнами (б) и микротрещинами (в):  
1 – тетрагональный  $ZrO_2$ ; 2 – моноклинный  $ZrO_2$

Третий способ состоит в том, что с помощью специальных технологий весь керамический материал пронизывают микротрещинами (рис. 2.1, в). При встрече основной трещины с микротрещиной угол в острие трещины возрастает, происходит затупление трещины и она дальше не распространяется.

Определенный интерес представляет физико-химический способ повышения надежности керамики. Он реализован для одного из наиболее перспективных керамических материалов на основе нитрида кремния  $Si_3N_4$ . Способ основан на образовании определенного стехиометрического состава твердых растворов оксидов металлов в нитриде кремния, получивших название *сиалонов*. Примером высокопрочной керамики, образующейся в этой системе, являются сиалоны состава  $Si_{6-x}Al_xN_{8-x}O_x$ , где  $x$  – число замещенных атомов кремния, азота в нитриде кремния, составляющее от 0 до 4,2. Важным свойством сиалоновой керамики является более высокая, чем у нитрида кремния стойкость к окислению при высоких температурах.

### 2.1.2. Свойства и применение керамических материалов

В современном машиностроении применение керамики постоянно увеличивается. Она многообразна по химическому составу и фи-

зико-механическим характеристикам. Керамика может работать при высоких температурах 1600-2500°C (жаропрочные стали 800-1200°C, молибден – 1500° С, вольфрам – 1800°C), она имеет плотность в два-три раза меньшую, чем у жаропрочных материалов, твердость близкую к твердости алмаза, отличные диэлектрические характеристики, высокую химическую стойкость. Запасы исходных материалов для производства керамики на земле неисчерпаемы. Из керамики изготавливают детали газотурбинных и дизельных двигателей, тепловыделяющие элементы ядерных реакторов, легкую броню и элементы теплозащиты космических кораблей, тонкостенные поплавки и контейнеры для глубоководной техники, режущие пластины и оснастку для горячего деформирования металлов, плунжеры и уплотнительные кольца в насосах для перекачки агрессивных сред, элементы особо точных гироскопов и платы ЭВМ, подшипники, постоянные магниты и т. д.

Применение керамики в автомобильных двигателях позволит поднять рабочую температуру в цилиндрах с 1200 до 1600°C, при этом сокращаются потери тепла, снижается расход топлива, улучшаются эксплуатационные характеристики.

При изготовлении изделий из керамики нельзя просто заменять металлические детали на керамические. Особо должны учитываться условия их работы и действующие нагрузки, поскольку все детали выполняются целиком, и это может снизить прочность всей конструкции. Кроме того, она не имеет пластической деформации и обладает низкой ударной вязкостью.

В настоящее время сформулированы основные требования, которые следует учитывать при проектировании керамических деталей.

В нагруженных зонах керамическая деталь не должна иметь концентраторов напряжений. Практически не используются в керамических конструкциях болтовые соединения, в них стараются не сверлить отверстия, делать уступы, проточки, чтобы избежать микротрещин. В местах контакта керамики с металлом необходимо устанавливать демпфирующие прокладки.

Металлические и керамические детали одного изделия должны иметь одинаковые температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) или необходимо предусмотреть компенсационные прокладки, причем должны быть учтены и переходные процессы, когда происходит нагрев или охлаждение.

Керамика имеет теплоемкость в два раза большую, чем металл, который нагревается вдвое быстрее, что вызывает тепловые деформации и напряжения. Крайне желательно, чтобы температура керамической детали по всему объему была бы одинаковой. Наиболее благоприятно воспринимаются напряжения сжатия. При отсутствии нагрузки в керамических деталях не должны сохраняться остаточные напряжения его полимеризации.

В настоящее время используются керамические материалы на основе нитрида кремния – реакционно-связанный, спеченный и горячепрессованный нитрид кремния с легирующими добавками. Реакционно-связанный нитрид кремния имеет относительно низкую по сравнению с другими материалами прочность, но изготовленные из него детали сложного профиля дают стабильно малую усадку. Горячепрессованный нитрид кремния обладает максимальной прочностью. Свойства керамических материалов существенно зависят от рабочих параметров и технологии их изготовления. В настоящее время разработаны составы керамик, которые по своим эксплуатационным характеристикам могут заменять жаропрочные стали, но разработки в области составов, технологии их получения продолжаются. Принципиальными недостатками керамики являются ее хрупкость и сложность обработки. Керамические материалы плохо работают в условиях механических или термических ударов, а также при циклических условиях нагружения. Им свойственна высокая чувствительность к надрезам. В то же время керамические материалы обладают высокой жаропрочностью, превосходной коррозионной стойкостью и малой теплопроводностью, что позволяет с успехом использовать их в качестве элементов тепловой защиты.

При температурах выше  $1000^{\circ}\text{C}$  керамика прочнее любых сплавов, в том числе и суперсплавов, а сопротивление ползучести и жаропрочность ее выше. К основным областям применения керамических материалов относятся режущий инструмент, детали двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей и др.

#### *Режущий керамический инструмент*

Режущая керамика характеризуется высокой твердостью, в том числе при нагреве, износостойкостью, химической инертностью к большинству металлов в процессе резания. По комплексу этих свойств керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы (табл. 2.2).



Высокие свойства режущей керамики позволили существенно повысить скорости мехобработки стали и чугуна (табл. 2.3).

Таблица 2.2

### Сравнительные значения свойств инструментальных материалов

Свойство	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Керамика на основе $Al_2O_3$
Твердость по Виккерсу, HV	850	1700	2100
Температура размягчения, °C	550	1100	1500
Температура начала образования окалины, °C	800	800	–

Для изготовления режущего инструмента широко применяется керамика на основе оксида алюминия с добавками диоксида циркония, карбидов и нитридов титана, а также на основе бескислородных соединений – нитрида бора с кубической решеткой ( $\beta$ -BN), обычно называемого кубическим нитридом бора, и нитрида кремния  $Si_3N_4$ .

Таблица 2.3

### Сравнительные значения скоростей резания при точении керамическим инструментом и инструментом из твердого сплава

Обрабатываемый материал	Твердость	Скорость резания, м/мин, инструментом, оснащенным	
		керамикой	твердым сплавом
Углеродистая сталь	150-250HV	250-300	100-200
Легированная сталь	46-45HRC	100-160	25-65
Серый чугун	120-240HV	300-400	100-200
Высокопрочный чугун	160-300HV	200	50-100

Режущие элементы на основе кубического нитрида бора в зависимости от технологии получения, выпускаемые под названиями эльбор, боразон, композит 09 и др., имеют твердость, близкую к твердости алмазного инструмента, и сохраняют устойчивость к нагреву на воздухе до 1300-1400°C. В отличие от алмазного инструмента куби-

ческий нитрид бора химически инертен по отношению к сплавам на основе железа. Его можно использовать для черного и чистового точения закаленных сталей и чугунов практически любой твердости.

Режущие керамические пластины используются для оснащения различных фрез, токарных резцов, расточных головок, специального инструмента.

## **2.2. Композиционные материалы**

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

*Композиционным материалом (КМ), или композитом,* называют объемную гетерогенную систему, состоящую из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов, строение которой позволяет использовать преимущества каждого из них.

Принцип построения КМ человек заимствовал у природы. Типичными композиционными материалами являются стволы деревьев, стебли растений, кости человека и животных.

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

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

Важными характеристиками материалов, работающих в этих условиях, являются удельная прочность  $\sigma_v/\rho$  и удельная жесткость  $E/\rho$ , где  $\sigma_v$  – временное сопротивление,  $E$  – модуль нормальной упругости,  $\rho$  – плотность материала. По удельной прочности и жесткости композиционные материалы превосходят все известные конструкционные сплавы.

КМ состоят из сравнительно пластичного матричного материала основы и более твердых и прочных компонентов, являющихся наполнителями. Свойства КМ зависят от свойств основы, наполнителей и прочности связи между ними.

Матрица связывает композицию в монолит, придает ей форму и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают КМ с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной – полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической – керамические композиционные материалы (ККМ).

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, часто называемые *упрочнителями*. Они имеют высокую прочность, твердость и модуль упругости. По типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяют на *дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые* (рис. 2.2).

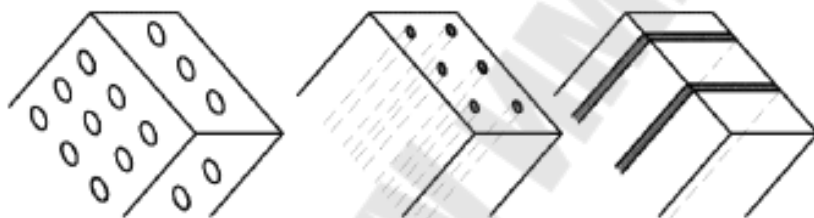


Рис. 2.2. Схемы строения композиционных материалов:  
*а* – дисперсно-упрочненные; *б* – волокнистые; *в* – слоистые

В дисперсно-упрочненные КМ искусственно вводят мелкие равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и др., не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между ними, тем прочнее КМ. В отличие от волокнистых, в дисперсно-упрочненных КМ основным несущим элементом является матрица. Ансамбль дисперсных частиц наполнителя упрочняет материал за счет сопротивления движению дислокаций при нагружении, что затрудняет пластическую деформацию. Эффективное сопротивление движению дислокаций создается вплоть до температуры плавления матрицы, благодаря чему дисперсно-упрочненные КМ отличаются высокой жаропрочностью и сопротивлением ползучести.

Арматурой в волокнистых КМ могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки разного плетения. Армирование волокнистых КМ может осуществляться по одноосной, двухосной и трехос-

ной схеме (рис. 2.3, а). Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Армирование дает большой прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо.

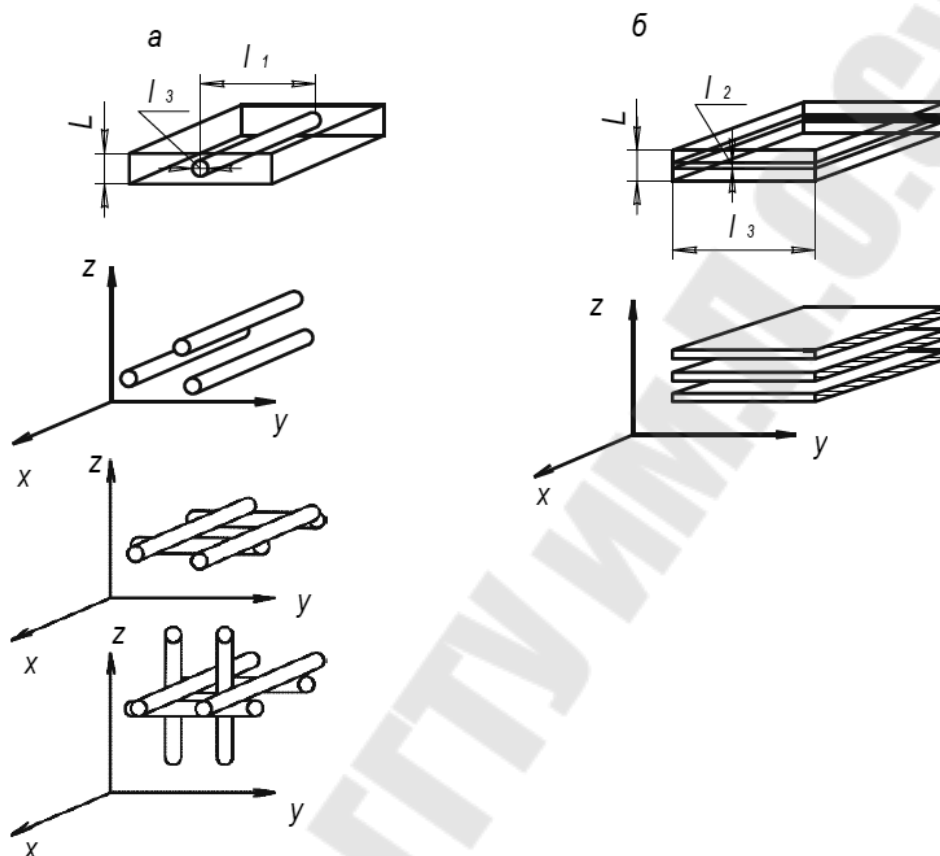


Рис. 2.3. Схемы армирования волокнистых (а) и слоистых композиционных материалов (б)

Слоистые композиционные материалы (рис. 2.3, б) набираются из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала («сэндвич»). Слои наполнителя в таких КМ могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами. Для слоистых композиций обычно используют неметаллические материалы.

### 2.2.1. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы

При дисперсном упрочнении частицы блокируют процессы скольжения в матрице. Эффективность упрочнения при условии минимального взаимодействия с матрицей зависит от вида частиц, их объемной концентрации, а также от равномерности распределения в матрице. Применяют дисперсные частицы тугоплавких фаз типа

$Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , BN, SiC, имеющие малую плотность и высокий модуль упругости. КМ обычно получают методом порошковой металлургии, важным преимуществом которого является изотропность свойств в различных направлениях.

В промышленности обычно применяют дисперсноупрочненные КМ на алюминиевой и реже – никелевой основах. Характерными представителями этого вида композиционных материалов являются материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые состоят из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия.

Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1 мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче и в ней повышается содержание оксида алюминия.

Дальнейшая технология производства изделий и полуфабрикатов из САП включает холодное прессование, предварительное спекание, горячее прессование, прокатку или выдавливание спеченной алюминиевой заготовки в форме готовых изделий, которые можно подвергать дополнительной термической обработке.

Сплавы типа САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы с 6-9 %  $Al_2O_3$  – и при комнатной температуре. Из них холодным волочением можно получить фольгу толщиной до 0,03 мм. Эти материалы хорошо обрабатываются резанием и обладают высокой коррозионной стойкостью.

Марки САП, производимые в России и Беларуси, 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 следующие:  $\sigma_B = 280$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 220$  МПа; САП-3:  $\sigma_B = 420$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 340$  МПа.

Материалы типа САП обладают высокой жаропрочностью и превосходят все деформируемые алюминиевые сплавы. Даже при температуре 500°C они имеют  $\sigma_B$  не менее 60-110 МПа. Жаропрочность объясняется тормозящим действием дисперсных частиц на процесс рекристаллизации. Характеристики прочности сплавов типа САП весьма стабильны. Испытания длительной прочности сплавов типа САП-3 в течение 2 лет практически не повлияли на уровень

свойств как при комнатной температуре, так и при нагреве до 500°C. При 400°C прочность САП в 5 раз выше прочности стареющих алюминиевых сплавов.

Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до 300-500°C. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

### *Синтегран*

Синтегран производится из дробленого гранита, сцементированного специальными видами смол. Смесь заливается в форму и подвергается вибрационному воздействию на специальном вибростоле.

Такое «гранитное литье» по прочности не уступает чугуному, но значительно легче его, трудоемкость при его изготовлении значительно ниже, а затраты электроэнергии меньше в сотни раз. Кроме того, такое литье легко ремонтируется. Детали, изготовленные из синтеграна не нуждаются в дополнительной обработке и шлифовке.

В настоящее время синтегран используется для изготовления инструмента, специальной оснастки, ответственных деталей измерительных комплексов, высокоточных и специальных станков (точность обработки которых составляет 0,001 мкм), шпал для метрополитена, изделий бытового и мемориального назначения, а также многих других деталей. Слово «синтегран» означает синтетический гранит.

Поскольку состояние современного литейного производства не позволяет поставлять чугунные отливки конструктивных элементов металлорежущих станков требуемого качества, то станкостроительные заводы вынуждены использовать при изготовлении станин станков альтернативные материалы. В частности, даже для изготовления станин универсальных станков стали использовать модифицированные бетоны.

Для изготовления элементов станков, обладающих особо высокой точностью и работающих в области высокочастотных колебаний (расточные, шлифовальные станки, станки для физико-химических методов обработки и др.), целесообразно использовать синтегран.

Синтегран состоит из полимерного связующего и высокопрочных минеральных наполнителей и заполнителей.

Полимерное связующее состоит из смолы и отвердителя. От вида связующего, его содержания в композиционном материале зависят его свойства и физико-механические характеристики.

Наполнители – это мелкодисперсные порошки с размером частиц менее 100 мкм и имеющие удельную поверхность порядка 1000 см<sup>2</sup>/г. При изготовлении синтеграна в качестве наполнителя используют кислотоустойчивый порошок марки ПК-1, который представляет собой помол переплава габбродиабаза и пироксенового порфита с удельной поверхностью 2300-2500 см<sup>2</sup>/г.

Заполнители – это различные фракции минерального вещества (щебня) с размерами зерен 6,3-20 мм. От вида, количества и размера фракций заполнителя зависят прочностные свойства материала. При изготовлении синтеграна используют щебень габбро-диабаза.

Поводом для разработки синтеграна послужило то, что многие конструкции высокоточных станков, оснастки и инструмента, выполненные из металла, не соответствуют предъявляемым требованиям, а изготовление их из натурального камня, например гранита, весьма трудоемко и экономически невыгодно.

Существуют конструкции, которые из натурального минерала выполнить невозможно.

Использование же синтеграна снимает вышеперечисленные проблемы. По сравнению с чугуном синтегран имеет преимущества:

- более высокие демпфирующие способности;
- высокая тепловая стабильность и нечувствительность к кратковременному перепаду температур;
- высокая временная стабильность геометрических размеров из-за малых внутренних напряжений;
- высокая стойкость к действию агрессивных сред;
- малая усадка, позволяющая изготавливать детали без последующей механической обработки;
- высокий коэффициент использования материала (практически равный 1);
- простота и малые габариты используемого оборудования, высокая производительность при малых энергозатратах;
- возможность полной автоматизации технологического процесса изготовления.

Области применения синтеграна в станкостроении представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

### Области применения синтеграна в станкостроении и инструментальной промышленности

Область применения	Типы изделий	Типы станков	Достижимый эффект
Детали функционального назначения	Державки и корпуса режущего инструмента (резцов, фрез, шеверов и др), центры, патроны, шпиндели и др.	Токарные, фрезерные, шлифовальные, расточные и др., любые механизмы	Улучшение демпфирования, снижение шума, повышение точности, экономия материальных и трудовых затрат
Корпусные детали	Коробки скоростей и подачи, каретки, корпуса редукторы, суппорта, столы и т.д.	то же	то же
Элементы измерительных машин	Контрольные плиты, направляющие, стойки, траверсы и т.д.	Измерительные	Повышение точности, упрощение конструкции, снижение материалоемкости
Элементы станков, к которым предъявляются специальные требования	Станины, корпуса, стойки, основания и др.	Станки для физико-химической обработки	Увеличение срока службы, экономия дорогостоящих специальных сталей, возможность создания новых конструкций
Комбинированные детали	Станины, столы, основания, стойки, траверсы	Станки общего назначения	Повышение жесткости и улучшение динамических характеристик
Основания	Станины, стойки траверс, порталы, тумбы и др.	Любые станки и механизмы	Улучшение демпфирования, снижение шума, повышение точности



Замена чугунных изделий на синтеграновые позволяет значительно повысить точность изготавливаемых станков, измерительных комплексов и отдельных узлов и деталей, а также снизить трудовые и материальные затраты.

В зависимости от назначения существуют три основных типа синтегранов:

– для изготовления корпусных деталей станков – синтеграны, которые обладают высокой жесткостью, прочностью, стабильностью размеров и физико-механических характеристик во времени. К этому типу материалов не предъявляются дополнительные требования по высокой износостойкости, низкому коэффициенту трения и т.п., поскольку эти детали не подвергаются механической обработке, а их рабочие поверхности выполняются из других материалов;

– для изготовления корпусов инструмента и специальной оснастки, а также деталей измерительных машин и приборов необходимы синтеграны, обладающие вышеперечисленными свойствами, а также обладающие высокими износостойкостью и термостабильностью и возможностью механической обработки;

– для изготовления деталей оснастки и станков для физико-химических методов обработки необходимы синтеграны, обладающие повышенной стойкостью к агрессивным средам, а также имеющие специальные свойства, например диэлектрические.

Поскольку компонентами синтегранов являются наполнители, заполнители и полимерное связующее, то от их свойств и соотношения решающим образом зависят и свойства готового материала.

Заполнители выполняют роль своеобразного скелета синтеграны и определяют свойства материала в целом. В качестве заполнителей применяют твердокаменные породы – базальты, граниты, габбро-диабазы в виде щебня с размерами зерен от 60 мкм до 20 мм.

В зависимости от коэффициента технологичности  $K_t$  синтеграны можно разбить на 5 групп: сверхжесткие,  $K_t = 1,1-1,2$ ; жесткие,  $K_t = 1,25-1,45$ ; нормальные,  $K_t = 1,5-1,7$ ; пластичные,  $K_t = 1,75-1,9$ ; сверхпластичные,  $K_t = 2,0-2,1$ .

Сверхжесткие и жесткие смеси в своем составе имеют очень малое количество связующего и их формование затруднено из-за необходимости создания избыточного давления. Такие смеси не используются для изготовления ответственных деталей.

Сверхпластичные смеси, наоборот, имеют большое количество связующего, вследствие чего они не обладают оптимальными физико-

механическими характеристиками и используются в основном при изготовлении второстепенных изделий.

Для изготовления ответственных деталей оснастки и инструмента используются нормальные и пластичные смеси с содержанием связующего 6- 10% и 7,5-13% соответственно.

Разработанные применительно для станкостроения составы синтегранов обладают достаточно высокими физико-механическими характеристиками (таблице 2.5) и не уступают материалам, предназначенным для аналогичных целей, например гидробетонам (табл. 2.6).

Таблица 2.5

**Физико-механические характеристики композиционного материала (синтегран), данные в сравнении с натуральными гранитами чугунами**

Параметр	Единица измерений	Чугун	Гранит	Синтегран нормальный
Плотность	г/см <sup>3</sup>	7,0...7,5	2,6-3,0	2,4-2,7
Прочность – при сжатии – при растяжении – при изгибе	МПа	400...900 180...250 160...400	– – 3,5-5,0	180-200 15-20 32-36
Модуль упругости при изгибе $\times 10^{-4}$	МПа	10...12	1,5-2,5	4,5-5,5
Коэффициент Пуассона	-	0,26	-	0,25-0,4
Теплопроводность	Вт/м °К	75	0,8	0,5-0,9
Коэффициент линейного расширения $\times 10^{-6}$	1/°С	9,0-12,0	7-19,0	12,0-16,0
Водопоглощение за сутки	%	–	0,02-0,1	0,02-0,05
Декремент колебаний		0,006-0,008	0,02-0,04	0,06-0,08

Количество связующего влияет на свойства композиционного материала: чем его больше, тем более упрощается технологический процесс и повышаются демпфирующие способности, но снижается модуль упругости, повышается усадка, ведущая к внутренним напряжениям, снижается стабильность размеров во времени.

При увеличении размеров максимальной фракции заполнителя повышаются прочностные характеристики, но повышается трудоемкость изготовления и снижается технологичность.

Композиционные материалы позволяют в 6-15 раз снизить радиоактивное излучение по сравнению с традиционно применяемыми для этих целей материалами при одинаковых габаритах конструкции.

Таблица 2.6

### Сравнительные характеристики синтеграна и гидробетона

Параметр	Единица измер.	Синтегран	Гидробетон
Плотность	г/см <sup>3</sup>	2,4-2,7	1,7-2,1
Водопоглощение за сутки	%	0,02-0,1	4-8
Прочность при сжатии	МПа	180-200	80-120
Модуль упругости при изгибе $\times 10^{-4}$	МПа	4,5-5,5	1,8-2,1
Склонность к короблению	у.е.	1	4,5
Демпфирование	у.е.	1	0,5-0,6

В настоящее время полностью отработаны технологии изготовления изделий из синтеграна, конструкции оснастки и литейных форм, имеется полный комплект конструкторской и технологической документации, санитарные сертификаты и многолетний опыт эксплуатации изделий.

#### 2.2.2. Дисперсно-упрочненные волокнистые композиционные материалы

Помимо обеспечения прочности и монолитности конструкции матрица должна иметь необходимую пластичность и быть работоспособной в той температурной области, для которой предназначен КМ. Для изготовления КМ, применяемых при температурах ниже 200°C, используют полимерные матрицы.

В настоящее время широко используются композиционные материалы, армированные стеклянными волокнами – стеклопластики. Они обладают высокой прочностью, легко поддаются механической обработке, обладают устойчивостью к тепловым ударам и знакопеременным нагрузкам, радиопрозрачностью, коррозионной стойкостью. В качестве армирующего элемента могут быть непрерывные волокна в виде нитей или жгутов, или ткани. Слоистые стеклопластики на основе тканей называются стеклотекстолитами. Наиболее высокие ме-

ханические характеристики имеют стеклотекстолиты на основе однослойных тканей сатинового переплетения. Применение многослойных стеклотканей увеличивает межслоевую прочность пластика, упрощает сборку заготовки изделия, уменьшая число ручных операций. Такие композиты широко используют в судостроении, авиации, в космической технике, автомобилестроении, при изготовлении некоторых бытовых приборов. В качестве связующего используются как терморезистивные смолы (эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные и др.), так и термопластичные.

Органопластики на основе высокопрочных арамидных волокон обладают высокими прочностными и упругими характеристиками, ударной вязкостью, высокой химической стойкостью, высокими теплоизоляционными и диэлектрическими свойствами, плохо горят и выделяют мало дыма. Органопластики – самые легкие полимерные композиционные материалы, их плотность составляет 1250-1350 кг/м<sup>3</sup>.

В зависимости от состава, структуры и технологии получения материалов свойства органопластиков могут меняться в широких пределах: прочность при растяжении  $\sigma_B$  от 300 до 3000 МПа, модуль упругости  $E$  от 13 до 100 ГПа. По удельной прочности при растяжении (200 к·м) органопластики занимают ведущее место среди конструктивных материалов. Для органопластиков характерны высокие параметры вязкости разрушения, длительность ресурса и надежность эксплуатации изделий в условиях воздействия механического или акустического удара, эродирующих потоков, вибрационных нагрузок. Благодаря пониженной плотности, низкой дымообразующей способности, высоким эстетическим качествам органопластики используют при обшивке салонов самолетов, судов, автомобилей, для внутренней отделки жилых и промышленных зданий.

При изготовлении современных вертолетов с использованием органопластиков повышается их эксплуатационная надежность, сокращается примерно в три раза производственный цикл, достигается снижение массы агрегатов на 20-30%, снижается трудоемкость и увеличивается ресурс их работы.

В пассажирских самолетах ТУ-204, ИЛ-96-300, ИЛ-114, ТУ-334 органопластики использованы в панелях пола, деталях внешнего контура, обшивке салонов. Так, в самолете ТУ-204 объем органопластиков по массе составляет около 3 т, в самолете ИЛ-96-300 – 1,5 т.

Органопластики используются при изготовлении защитных экранов в корпусах вентиляторов турбореактивных двигателей, поскольку могут выдерживать механический удар, например при столкновении самолета с птицей.

Материалами нового поколения являются металлоорганопластики, состоящие из чередующихся слоев алюминиевого сплава и органопластика, который снижает нагруженность металла и увеличивает долговечность материала в целом. По сравнению с традиционными материалами они обладают высокой трещиностойкостью, что позволяет изготавливать из них безопасно повреждаемые конструкции на воздушном и автомобильном транспорте.

Применение алора взамен традиционных алюминиевых сплавов обеспечивает снижение массы конструкции на 10-20% при использовании тканевого арамидного наполнителя и в 2 раза – однонаправленного. При этом значительно снижается масса изделия. Свойства органопластиков представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7

### Свойства органопластиков и алюминиевого сплава

Материал	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\rho$	$E$
	МПа		кг/м <sup>3</sup>	ГПа
Равнопрочный МПКМ	500	350	2400	64
Однонаправленный МПКМ	800	550	2450	70
Алюминиевый сплав Д16	430	300	2780	70

Алор обладает высокими демпфирующими характеристиками, что позволяет использовать его в конструкциях, подверженных высокочастотным колебаниям (вагоны скоростных поездов, автомобили, самолеты и др.), что позволяет увеличить ресурс их работы в несколько раз. Он технологичен, хорошо поддается всем видам механической обработки, пластическому деформированию.

Углепластики – композиты на основе высокопрочных углеродных волокон являются наиболее перспективными композиционными материалами. Они обладают высокими прочностью и жесткостью, термостойкостью до 570К, низким температурным коэффициентом линейного расширения, стойкостью к агрессивным средам. В них в качестве армирующих элементов применяются непрерывные волокна в виде нитей, жгутов, тканей или нетканых материалов. Матрицы изготавливают из эпоксидных, полиамидных, полиэфирных или других

смола. Углепластики КМУ-ЛР, КМУ-ЛТК и КМУ-Т работают в интервале температур от  $-60$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ , в том числе в агрессивных средах, имеют высокие физико-механические характеристики (табл. 2.8).

Таблица 2.8

**Физико-механические свойства углепластиков при  $T = 298\text{K}$**

Материалы/ параметр	P313	AS/4397	КМУ-4	КМУ-2У	КМУ-3Л
Волокно	Торнел-300	А	Жгут ВМН-4	Жгут ВМН-4	Лента ЛУ-2
Матрица	Эпоксидная	Полиамидная	Эпокситрифенольная	Полиимидная	Эпоксифенольная
Плотность $\rho$ , кг·м <sup>-3</sup>	1,55	1,57	1,5	1,4	1,4
Прочность $\sigma_{+1}$ , МПа	1400	1431	1020	900	650
Прочность $\sigma_{-1}$ , МПа	1108	1451	400	400	400
Модуль упругости $E_1$ , ГПа	142,8	128,5	180	140	120

Углепластик КМУ-П – однонаправленный, пултрузионный, работает в агрессивных средах в интервале температур от  $-60$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ , обеспечивает повышение жесткости, сопротивления усталости, ресурса и снижение массы детали. Он выпускается в виде полос, труб, швеллера, уголка и других сечений.

Углепластики технологичны в изготовлении, обладают низким коэффициентом термического расширения, коррозионной стойкостью, высокими жесткостью, теплопроводностью, тепло-, и морозостойкостью, стойкостью к радиации.

Они превосходят металлы по усталостной прочности и вибропрочности (в 1,5–2 раза выше, чем у сталей, в 8–9 раз выше, чем у алюминиевых сплавов). Свойства углепластиков представлены в таблице 2.9.

Из углепластиков КМУ-9ЛР, КМУ-9ЛТ, КМУ-9ЛТК, КМУ-9Т изготавливают элементы конструкции ткацких станков, что позволяет

повысить в 2,3 раза производительность по сравнению с обычным серийным станком АТ и снизить в 2,5 раза уровень производственного шума.

Таблица 2.9

### Свойства углепластиков КМУ-П и КМУ-4

Материал	Температура,	$\sigma_v$	$\sigma_{сж}$	E
	°С	МПа		ГПа
КМУ-П	20	1650	1200	145
	150	1300	780	135
КМУ-4	20	1600	780	120
	160	1200	520	115

В автомобильной промышленности из углепластиков изготавливают элементы несущего кузова и подвески, передаточные узлы механизмов трансмиссии, силовые каркасы сидений, детали двигателей внутреннего сгорания, бамперы, что позволяет снизить массу, повысить эксплуатационные характеристики автомобиля и снизить коррозию.

Углепластики применяют при изготовлении лодок, яхт, катамаранов, высококлассных теннисных ракеток, рыболовных удилищ, не уступающих по своим характеристикам зарубежным аналогам. В машиностроении из них изготавливают корпусные детали машин и приборов, детали фрикционного назначения, элементы приводов электродвигателей, фильтры для агрессивных жидкостей и т. д., при этом достигаются снижение массы и металлоемкости, повышение долговечности, сокращение потерь от коррозии, уменьшение энергозатрат при изготовлении.

Пластики с армирующими элементами в виде волокон бора называются боропластиками. Они применяются для изготовления изделий, работающих при повышенных температурах, и имеют высокую прочность при сжатии. Борные волокна являются полупроводниками, а сам материал обладает повышенной тепло- и электропроводностью. В качестве связующего используют эпоксидные, полиэфирные, фенолформальдегидные и другие смолы.

Для работы при более высоких температурах применяют металлические матрицы. Обычно используют металлы с малой плотностью: алюминий, реже – магний, титан.

Свойства боропластиков представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10

### Свойства боропластика

Параметр	Значение при температуре	
	293К	473К
Прочность при растяжении $\sigma^+$ , МПа	1200	980
Прочность при сжатии $\sigma^-$ , МПа	1160	1020
Прочность при сдвиге $\tau$ , МПа	60	45
Модуль упругости при растяжении, Е, ГПа	250	240
Модуль упругости при сдвиге G, ГПа	9,80	5,10
Предел выносливости при изгибе, МПа, $10^7$	400	350
Логарифмический декремент колебаний, %	0,5	3,5
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)	0,5	54

Металлические КМ обладают рядом преимуществ перед полимерными. Помимо более высокой рабочей температуры, они характеризуются лучшей изотропией и большей стабильностью свойств в процессе эксплуатации, более высокой эрозионной стойкостью.

Пластичность металлических матриц сообщает конструкции необходимую вязкость. Это способствует быстрому выравниванию локальных механических нагрузок.

Высокая теплопроводность металлических КМ предохраняет от локальных перегревов, что особенно важно для таких изделий, как наконечники ракет и ведущие кромки крыльев.

Высокая электропроводность металлических КМ хорошо защищает их от электромагнитного излучения, молнии, снижает опасность статического электричества.

Важным преимуществом металлических КМ является более высокая технологичность процесса изготовления, формовки, термообработки, формирования соединений и покрытий.

На рисунке 2.4 схематически показан способ изготовления композита. Волокна сматывают с бобин, подвергают поверхностной обработке, улучшающей адгезию, протягивают в ванну, где их покрывают полимерной смолой. Смола скрепляет волокна в плоский жгут-ленту. Готовые ленты собирают в слоистый листовый материал (аналог фанеры) или же наматывают в более сложные формы. Собранный в листы или намотанный материал отверждают термообработкой. Слои можно накладывать поочередно с разным направлением воло-



кон и формировать в композите клетчатую структуру арматуры. Это придает материалу жесткость.

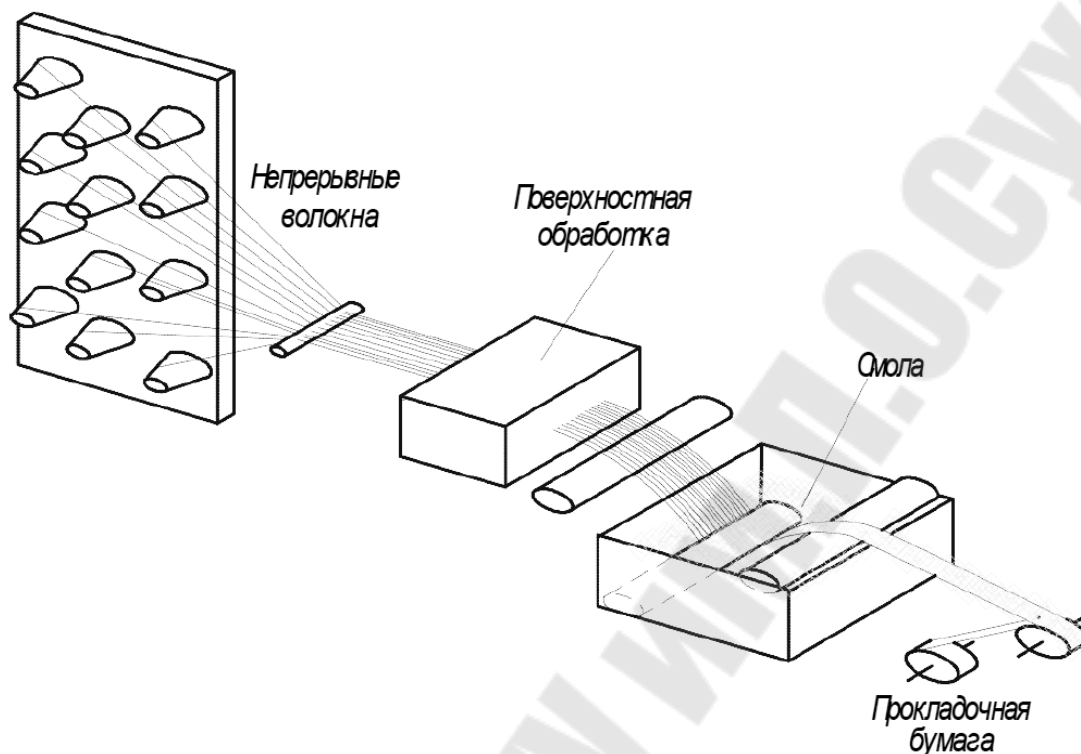


Рис. 2.4. Схема изготовления композиционного материала

Недостатком такого композита является отсутствие поперечного армирования в каждом отдельном слое и между слоями. Поэтому материал может расслаиваться. К тому же появившаяся трещина в объемном образце из такого КМ легко находит путь распространения между слоями. Для устранения этих недостатков изготавливают тканые КМ.

Свойства основных металлических матриц представлены в таблице 2.11.

Для наиболее высоких рабочих температур в качестве матричного материала применяют керамику. Ее основной недостаток – отсутствие пластичности – в некоторой степени компенсируется армирующими волокнами, тормозящими распространение трещин в керамике.

## Свойства металлических матриц

Матрица	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	E, ГПа	$\alpha$ , $10^{-5}K^{-1}$
Al	2,63 – 2,80	250 – 573	69 – 73	11 – 13
Mg	1,74 – 1,83	200 – 280	43 – 45	14 – 15
Ni	4,5	500 – 1200	113	9 – 10
Cu	8,94	220 - 400	132	17 - 18

Использование в качестве матричного материала аморфного углерода, а в качестве армирующего материала – волокон из кристаллического углерода (графита) позволило создать композит, выдерживающий нагрев до 2500 °С. Такой углерод-углеродный композит перспективен для космонавтики и заатмосферной авиации.

Толчком к интенсивному использованию углерод-углеродных композитов в США послужили работы по программе создания космических кораблей многоразового использования. Недостаток углеродной матрицы состоит в возможном окислении и абляции. Для предотвращения этих явлений композит покрывают тонким слоем карбида кремния.

Таким образом, наиболее важным критерием выбора матричного материала является рабочая температура эксплуатации композита.

Помимо высокой прочности и жесткости, основными требованиями, предъявляемыми к волокнам для КМ, является хорошее смачивание материала волокна расплавленной матрицей в процессе изготовления композита. Важными условиями являются слабое взаимодействие волокна с материалом матрицы и его высокая окислительная стойкость.

Для армирования металлических КМ обычно используют непрерывные волокна: углеродные (УВ), борные (В), оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), карбида кремния (SiC), карбида бора (B<sub>4</sub>C), нитрида бора (BN), диборида титана (TiB<sub>2</sub>), оксида кремния (SiO<sub>2</sub>). Также в качестве волокон применяют металлическую тонкую проволоку, полученную методом волочения из стали, вольфрама, титана, молибдена и бериллия. Наиболее распространены для армирования металлических КМ получили непрерывные/дискретные углеродные и борные волокна.

Волокна бора обычно получают осаждением бора из газовой фазы при диссоциации его галоидных соединений, например треххлори-

стого бора  $BCl_3$ . Бор осаждается на основу из тонкой (12 мкм) вольфрамовой нити, нагретой до 1100-1200°C. В процессе осаждения бор диффундирует в вольфрамовую основу, образуя бориды вольфрама в сердцевине волокна. Время пребывания волокна в реакционной камере составляет 1-2 мин. Общий диаметр борного волокна составляет 100-150 мкм. Свойства волокон для армирования металлических КМ представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12

### Свойства волокон для армирования металлических КМ

Тип волокна	Основа	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	E, ГПа	$\alpha$ , 10 <sup>-5</sup> К <sup>-1</sup>
C	ПАН	1,7-2,0	1,7-3,2	170-517	-1,0...-1,5
	Вискоза	1,6-1,8	0,6-3,2	400-525	—
	Пек	2,0	1,1-2,1	380-700	-1,3
SiC	На W	3,15	3,1-3,4	420-450	3,8-5,0
	На УВ	3,05	3,45	400-420	—
B	На W	2,49	3,52	400	4,8-5,0
	На УВ	2,52	3,32	380	—
B – SiC	На W	2,50	2,90	400	4,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	2,90	3,9-4,3	380-500	8,5

Сырьем для получения высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон являются такие полимеры с высоким содержанием углерода, как полиакрилонитрил (ПАН), и реже – пек и вискоза. ПАН-волокно выдавливают через малые отверстия и подвергают пиролизу в инертной атмосфере при температуре около 2000°C. Углеродные волокна выпускают в виде нитей, содержащих до 10000 элементарных волокон, диаметр которых составляет около 7 мкм. Модуль и прочность волокна не изменяется при нагреве его до 600°C.

Композиты получают разными методами. К ним относятся пропитка пучка волокон жидкими расплавами алюминия и магния с низкой температурой плавления, плазменное напыление, применение методов горячего прессования, иногда с последующей гидроэкструзией или прокаткой заготовок. При армировании непрерывными волокнами композиций типа «сэндвич», состоящих из чередующихся слоев алюминиевой фольги и волокон, применяют прокатку, горячее прессование, сварку взрывом, диффузионную сварку. Отливку прутков и

труб, армированных высокопрочными волокнами, получают из жидкометаллической фазы. Пучок волокон непрерывно проходит через ванну с расплавом и пропитывается под давлением жидким алюминием, магнием или жидкой смолой в случае изготовления полимерного материала. При выходе из пропиточной ванны волокна соединяются и пропускаются через фильеру, формирующую прутки или трубу. Этот метод обеспечивает максимальное наполнение композита волокнами (до 85%), их однородное распределение в поперечном сечении и непрерывность процесса.

Для многих видов волокон разработаны технологические процессы нанесения покрытий для обеспечения лучшей смачиваемости, окислостойкости и оптимального взаимодействия волокна с матрицей. Борные волокна защищают от реагирования с расплавами титана и алюминия созданием на поверхности диффузионного барьера из карбидов кремния или бора. Волокна бора, защищенные карбидом кремния, называют borsic (борсик). Из-за высокой окислительной способности углеродных волокон на их поверхность наносят специальные покрытия, а процессы переработки осуществляют в защитной атмосфере.

Углеродные волокна имеют отрицательное значение температурного коэффициента линейного расширения, благодаря чему появляется возможность при соответствующей укладке волокон получать  $\alpha$ , близкий к нулю.

Волокна карбида кремния получают методом химического осаждения из паровой фазы на подложку из борного или углеродного волокна. Эти волокна имеют хорошую теплостойкость, стойкость к окислению и мало реагируют с металлом.

### **2.2.3. Слоистые композиционные материалы**

Материалом основы композитов со слоистым строением являются пластмасса, металл или керамика. В качестве наполнителей применяются полимерные волокна, ленты из тканей, трикотажа и других материалов. Хорошо известные ламинаты изготовлены из смол, армированных полимерными волокнами или стеклотканью. Они широко применяются в строительстве, машиностроении, мебельной промышленности, спортивном снаряжении, домашнем хозяйстве.

К этой же группе композитов относятся абляционные материалы для тепловой защиты ракет, изготовленные на базе фенолоформальдегидных смол с углеродным или стекловолокном. В этих материалах часто используется стеклоткань, которая при многослой-

ном нанесении обеспечивает высокие механические свойства изделий, например тонкостенных труб, втулок и др.

Слоистым связующим могут быть алюминиевые, титановые, медные, никелевые и кобальтовые листы и фольги, а слоями, определяющими специальные свойства и применение, – керамика, интерметаллидные соединения или другие металлы.

Слоистые керамические композиты используют в экстремальных условиях. Компонентами этого типа композиционных материалов чаще всего являются керамика, углерод и металлы, например корунд, пиролитический графит, карбиды, оксиды, нитриды в композиции с алюминием, медью, титаном, никелем, кобальтом, танталом, железом.

Такие материалы нашли применение в космических аппаратах для изготовления теплоизоляционных силикатных плиток из корунда, боросиликата, углеродных карборундовых ламинатов.

#### *Свойства и применение композиционных материалов*

Физико-механические свойства основных компонентов КМ на основе алюминиевой матрицы приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13

#### **Свойства компонентов КМ на основе алюминиевой матрицы**

Тип волокна	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma$ , МПа	E, ГПа	$\sigma_B/\gamma$ , км	E/ $\gamma$ , 10 <sup>3</sup> к·м	$\alpha$ , 10 <sup>6</sup> К <sup>-1</sup>	T, °С
Матрица из Al – сплава	2,63-6,8	250-537	69-73	20	2,5	11-13	150
C	2,1-2,3	850/70	360/35	90	20	1,0-3,6	500
B	2,6	1800/330	250/140	70	10	6,0	540
SiC	2,85-2,9	1600/350	230/140	56	7	6,1	300
B·SiC	2,7-2,8	1400/320	220/180	50	–	–	–
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	1200	260/140	34	7	–	–

Примечание: В числителе – продольные значения прочностных характеристик, в знаменателе – поперечные.

Хорошая совместимость матрицы с армирующим элементом, высокие прочностные свойства борного волокна и удовлетворительная пластичность материала матрицы определяют высокие удельные значения прочности и жесткости МКМ (отношение временного сопротивления и модуля упругости к плотности) в сочетании с хорошей технологичностью и конструкционной надежностью.

Для создания металлических КМ с еще более малой плотностью применяется магний. Композиционные материалы на основе магния на 30% легче, чем сплавы алюминия. У металлических КМ на основе магния хорошие удельные свойства, стабильный температурный коэффициент линейного расширения в широком диапазоне температур за счет комбинаций свойств матрицы и волокна и может регулироваться в зависимости от конкретных условий использования. Такие материалы можно получать в форме отливок.

Магний – один из легких металлов, для которого не возникает проблем взаимодействия с углеродными, борными волокнами и волокнами из карбида кремния. Перспективная система углеродные волокна – магний обладает самыми высокими удельными характеристиками:  $E_{уд} \approx 23,5 \cdot 10^3$  к·м,  $\sigma_{уд} \approx 115$  км. Для наиболее высоких рабочих температур в качестве матричного материала применяют керамику. Ее основной недостаток – отсутствие пластичности – в некоторой степени компенсируется армирующими волокнами, тормозящими распространение трещин в керамике.

Некоторые свойства металлических КМ на основе магниевой матрицы приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14

### Свойства металлических КМ на основе магниевой матрицы

Свойства	Магниевые сплавы	Армирующие волокна		
		С	В	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	1,74-1,83	1,9-1,95	2,15	2,5-2,9
$\sigma_B$ , МПа	200-280	825	550	530
E, ГПа	43-45	352	150	210
$\sigma_{кд}$ , К·м	15,5	115	25	20
$E_{уд}$ , 10 <sup>3</sup> К·м	2,5	23	7	8
$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	14-15	–	–	–
T <sub>max</sub> , °С	–	300-320	–	–

Системы углеродные волокна – алюминий и углеродные волокна – магний перспективны для использования в авиационной технике, а также в космосе, благодаря высоким значениям удельной прочности и жесткости, малому температурному коэффициенту линейного расширения и сравнительно высокой теплопроводности.

Металлы с высокой пластичностью и прочностью хорошо совмещаются с высокопрочными и жесткими волокнами с низкой плот-

ностью и пластичностью, образуя КМ с повышенной жесткостью и малой массой. Примером такой комбинации может быть титан, армированный волокнами бора или карбида кремния. Свойства металлических КМ на основе титановой матрицы приведены в таблице 2.15.

Таблица 2.15

### Свойства металлических КМ на основе титановой матрицы

Свойства	Магниевые сплавы	Армирующие волокна		
		В	SiC	В·SiC
$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	4,5	3,3-3,5	3,8-4,0	3,7-3,9
$\sigma_B$ , МПа	500-1200	1500/550	1720/650	1400/550
E, ГПа	113	230	250/200	290/200
$\sigma_{кд}$ , К·М	27	43	46	37
$E_{уд}$ , 10 <sup>3</sup> К·М	2,6	6,5	7,5	7,5
$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	9	–	–	4,5-5,7
T <sub>max</sub> , °С	490	650	700	–

Однако такие системы имеют пониженную усталостную прочность из-за остаточных напряжений и химического взаимодействия между волокнами и матрицей при высоких температурах изготовления. Кроме того, механическая обработка КМ на основе титановой матрицы представляет большие трудности. Недостатком этого вида КМ является также высокая реакционная способность титановой матрицы.

Примечание: В числителе – продольные значения прочностных характеристик, в знаменателе – поперечные.

Прочность и модуль упругости, а также сопротивление материалов удару для однонаправленных композиционных материалов на основе алюминия, магния и титана повышаются по мере увеличения в композиции объемного содержания волокон.

Для очень высоких температур, например в камерах сгорания реактивных двигателей, используются системы, содержащие молибденовую и вольфрамовую проволоку в матрицах из титана и суперсплавов. Наибольшей прочностью при температуре 1093°С обладает проволока из сплава W-Re-Hf-C:  $\sigma_B = 2,2$  ГПа, что в несколько раз больше прочности никелевых или кобальтовых суперсплавов при такой же температуре.

Большие перспективы открываются с развитием процессов объемного армирования металлических КМ. В частности, для металличе-

ских КМ объемное армирование дает существенный выигрыш в ударной вязкости. Система  $Al_2O_3/Al$  трехмерного армирования поглощает почти такую же энергию удара, как и чистый металл. Армирование по толщине, обеспечиваемое трехмерной волокнистой структурой, предотвращает расслоение и ограничивает распространение трещин.

К недостаткам металлических КМ относится их сравнительно высокая стоимость и сложность изготовления. Их стоимость в настоящее время превосходит стоимость полимерных КМ в несколько раз.

Области использования металлических КМ непрерывно расширяются. Помимо улучшения технических характеристик многих ответственных изделий использование металлических КМ способно обеспечить 20-30% экономию массы. Современные Al-Li сплавы имеют этот показатель на уровне 10-15%.

Детали из боралюминия по сравнению с титановыми сплавами дают снижение массы на 30-40% , обеспечивая более высокую длительную и усталостную прочность при нагреве до 500 °С. Еще более эффективно применение боралюминия в ракетно-космической технике.



## ТЕМА 3 НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 3.1. Общая характеристика наноматериалов

Согласно рекомендации 7-й Международной конференции по нанотехнологиям (Висбаден, 2004 г.), выделяют следующие типы наноматериалов:

- нанопористые структуры;
- наночастицы;
- нанотрубки и нановолокна;
- нанодисперсии (коллоиды);
- наноструктурированные поверхности и пленки;
- нанокристаллы и нанокластеры.

Нанокристаллы и нанокластеры представляют собой частицы упорядоченного строения размером от 1 до 5 нм, содержащие до 1000 атомов. Обычно наночастицы имеют диаметр от 5 до 100 нм и состоят из 10<sup>3</sup>-10<sup>6</sup> атомов. Нитевидные и пластинчатые частицы могут содержать гораздо больше атомов и иметь один или даже два линейных размера, превышающих пороговое значение, но их свойства остаются характерными для вещества в нанокристаллическом состоянии. Соотношение линейных размеров наночастиц позволяет рассматривать их как одно-, двух- или трехмерные. Если наночастица имеет сложную форму и строение, то в качестве основного рассматривают не линейный размер частицы в целом, а размер ее структурного элемента. Такие частицы, как правило, называют наноструктурами, причем их линейные размеры могут значительно превышать 100 нм. В зависимости от того, какую преимущественную анизотропию имеют структурные элементы наноструктур, последние также подразделяют на одно-, двух- и трехмерные (нульмерные).

Физико-механические характеристики наноматериалов зависят от их структуры, а также от включений других материалов.

Существуют четыре основных типа структур, которые имеют разный химический состав и распределение фаз: однофазные, статистические многофазные с идентичными и неидентичными поверхностями раздела и матричные многофазные. В зависимости от формы структуры они подразделяются на пластинчатую, столбчатую и содержащую равноосные включения. Классификация консолидированных наноматериалов по составу, распределению и форме структурных составляющих приведена в таблице 3.1.

Эта классификация учитывает возможность неоднородности химического состава, возникающая при их кристаллизации на межкристаллитных границах (идентичные и неидентичные поверхности раздела), поскольку сплавы, в отличие от чистых металлов, кристаллизуются не при одной температуре, а в интервале температур. В действительности количество структур может быть и более широким из-за наличия пористости, трубчатых и луковичных структур, смешанных структур, полимерных составляющих и т.д.

Таблица 3.1

**Классификация консолидированных наноматериалов по составу, распределению и форме структурных составляющих**

Форма	Однофазный состав	Многофазный состав		
		Статистическое распределение		Матричное распределение
		Идентичные границы	Неидентичные границы	
Пластинчатая				
Столбчатая				
Равноосная				

Наиболее распространенными являются одно- и многофазные матричные и статистические объекты, столбчатые и многослойные структуры, которые имеют место в большинстве случаев у пленок.

**3.2. Методы получения**

Основные способы получения консолидированных наноматериалов приведены в таблице 3.2. Такая классификация имеет условный характер, поскольку в ряде случаев возможна комбинация способов, причем каждый из них имеет свои преимущества и недостатки и

имеет строго ограниченную область применения.

Процессы, в результате которых происходит формирование нано- или ультрадисперсной структуры – это кристаллизация, рекристаллизация, фазовые превращения, высокие механические нагрузки, интенсивная пластическая деформация, полная или частичная кристаллизация аморфных структур.

Таблица 3.2

### Методы получения консолидированных наноматериалов

Метод	Вариант метода	Объекты
Порошковая технология	Газофазное осаждение и компактирование (метод Глейтера). Обычное прессование и спекание. Электроразрядное спекание. Горячая обработка давлением (горячее прессование, ковка, экструзия)	Металлы, сплавы, соединения
Интенсивная пластическая деформация	Деформация кручением при высоких давлениях. Равноканальное угловое прессование. Обработка давлением многослойных композитов. Фазовый наклеп.	Металлы и сплавы
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Кристаллизация при обычном давлении. Кристаллизация при повышенном давлении	Аморфные вещества
Технология пленок и покрытий	Химическое осаждение из газовой фазы. Электроосаждение. Золь-гель-технология.	Металлы, сплавы

Выбор метода получения наноматериалов определяется областью их применения, желательным набором свойств конечного продукта. Характеристики получаемого продукта: гранулометрический состав и форма частиц, содержание примесей, величина удельной поверхности – могут колебаться в зависимости от способа получения в весьма широких пределах. Так, нанопорошки могут иметь сферическую, гексагональную, хлопьевидную, игольчатую формы, аморфную или мелкокристаллическую структуру.

Методы изготовления ультрамелкодисперсных материалов разделяются на химические, физические, механические и биологические.

*Химические методы* синтеза включают различные реакции и процессы, в том числе процессы осаждения, термического разложения или пиролиза, газофазных химических реакций восстановления, гидролиза, электроосаждения. Регулирование скоростей образования и роста зародышей новой фазы осуществляется за счет изменения соотношения количества реагентов, степени пересыщения, а также температуры процесса.

Способ осаждения заключается в осаждении различных соединений металлов из растворов их солей с помощью осадителей. Продуктом осаждения являются гидроксиды металлов. В качестве осадителя используются растворы щелочей натрия, калия и другие. Регулируя pH и температуру раствора, создают условия, при которых получаются высокие скорости кристаллизации и образуется высокодисперсный гидроксид. Этим методом можно получать порошки сферической, игольчатой, чешуйчатой или неправильной формы с размером частиц до 100 нм.

Нанопорошки сложного состава получают методом соосаждения. В этом случае в реактор подают одновременно два или более растворов солей металлов и щелочи при заданной температуре и перемешивании. В результате получают гидроксидные соединения нужного состава.

Способ гетерофазного взаимодействия осуществляют путем ступенчатого нагрева солей металлов с раствором щелочи с образованием оксидной суспензии и последующим восстановлением металла. Таким способом получают металлические порошки с размером частиц в пределах 10...100 нм.

Гель-метод заключается в осаждении из водных растворов нерастворимых металлических соединений в виде гелей. Следующая стадия - восстановление металла. Этот способ применяется для получения порошков железа и других металлов.

Способ восстановления и термического разложения – это обычно следующая операция после получения в растворе ультрадисперсных оксидов или гидроксидов с последующим осаждением и сушкой. Используют как газообразные (водород, оксид углерода), так и твердые восстановители. Нанопорошки Fe, W, Ni, Co, Cu и ряда других металлов получают восстановлением их оксидов водородом. В качестве твердых восстановителей используют углерод, металлы или гидриды металлов. Таким способом получают порошки металлов: Mo, Cr, Pt, Ni. Как правило, размер частиц находится в пределах 10...30

нм. Более сильными восстановителями являются гидриды металлов, обычно – гидрид кальция. Он используется для получения порошков Zr, Hf, Ta, Nb.

В ряде случаев порошки получают путем разложения формиатов, карбонатов, карбониллов, оксалатов, ацетатов металлов в результате процессов термической диссоциации или разложения. Так, за счет реакции диссоциации карбониллов металлов получают порошки Ni, Mo, Fe, W, Cr. Путем термического разложения смеси карбониллов на нагретой подложке получают полиметаллические пленки. Ультрадисперсные порошки металлов, оксидов, а также смесей металлов и оксидов получают путем пиролиза формиатов металлов. Таким способом получают порошки металлов, в том числе Mn, Fe, Ca, Zr, Ni, Co их оксидов и металлооксидных смесей.

*Физические методы.* Способы испарения (конденсации) или газофазный синтез получения нанопорошков металлов основаны на испарении металлов, сплавов или оксидов с последующей их конденсацией в реакторе с контролируемой температурной и атмосферой. Фазовые переходы пар-жидкость-твердое тело или пар-твердое тело происходят в объеме реактора или на поверхности охлаждаемой подложки или стенок. Исходное вещество испаряется путем интенсивного нагрева, с помощью газа-носителя подается в реакционное пространство, где резко охлаждается. Нагрев испаряемого вещества осуществляется с помощью плазмы, лазера, электрической дуги, печей сопротивления, индукционным способом, пропусканием электрического тока через проволоку. Испарение и конденсацию производят в вакууме, в инертном газе, в потоке газа и плазмы.

Размер и форма частиц зависят от температуры процесса, состава атмосферы и давления в реакционном пространстве. В атмосфере гелия частицы будут иметь меньший размер, чем в атмосфере аргона – более плотного газа.

Таким методом получают порошки Ni, Mo, Fe, Ti, Al. Размер частиц при этом – десятки нанометров.

Широко распространен способ получения наноматериалов путем электрического взрыва проволок (проводников). В этом случае в реакторе между электродами помещают проволоку металла, из которого намечается получение нанопорошка диаметром 0,1...1,0 мм. На электроды подают импульс тока большой силы (10<sup>4</sup>...10<sup>6</sup> А/мм<sup>2</sup>). При этом происходит мгновенный разогрев и испарение проволок. Пары металла разлетаются, охлаждаются и конденсируются. Процесс

идет в атмосфере аргона или гелия. Наночастицы оседают в реакторе. Таким способом получают металлические (Ni, Co, W, Fe, Mo) и оксидные ( $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ) нанопорошки с крупностью частиц до 100 нм.

*Механические методы.* Измельчение материалов механическим путем реализуется в мельницах различного типа: шаровых, планетарных, центробежных, вибрационных, а также в гироскопических устройствах, атриторах и симолойлерах.

Атриторы и симолойлеры – это высокоэнергетические измельчительные аппараты с неподвижным корпусом-барабаном, имеющим мешалки, передающие движение шарам в барабане. Атриторы имеют вертикальное расположение барабана, симолойлеры – горизонтальное. Измельчение размалываемого материала размалывающими шарами в отличие от других типов измельчающих устройств происходит не за счет удара, а по механизму истирания. Емкость барабанов в установках этого типа достигает 400...600 л.

Механическим путем измельчают металлы, керамику, полимеры, оксиды, хрупкие материалы. Степень измельчения зависит от вида материала. Так, для оксидов вольфрама и молибдена получают крупность частиц порядка 5 нм, для железа – порядка 10...20 нм.

Разновидностью механического измельчения является механосинтез или механическое легирование, когда в процессе измельчения происходит взаимодействие измельчаемых материалов с получением измельченного материала нового состава. Так получают нанопорошки легированных сплавов, интерметаллидов, силицидов и дисперсно-проченных композитов с размером частиц 5...15 нм.

Уникальным достоинством способа является то, что за счет взаимодиффузии в твердом состоянии здесь возможно получение «сплавов» таких элементов, взаимная растворимость которых при использовании жидкофазных методов пренебрежимо мала.

Положительной стороной механических способов измельчения является сравнительная простота установок и технологии, возможность измельчать различные материалы и получать порошки сплавов, а также возможность получать материал в большом количестве.

К недостаткам этих способов относятся: возможность загрязнения измельчаемого порошка истирающими материалами; трудности получения порошка с узким распределением частиц по размерам; сложность регулирования состава продукта в процессе измельчения.

При получении наночастиц любым методом проявляется еще одна их особенность – склонность к образованию объединения частиц. Такие объединения называют агрегатами и агломератами. В результате при определении размеров наночастиц необходимо различать размеры отдельных частиц (кристаллитов) и размеры объединений частиц. Различие между агрегатами и агломератами не является четко определенным. Считается, что в агрегатах кристаллиты более прочно связаны и имеют меньшую межкристаллитную пористость, чем в агломератах.

### 3.3. Механические свойства наноматериалов

Основным элементом структуры консолидированных наноматериалов является зерно или кристаллит, которые являются областями когерентного рассеяния рентгеновских лучей или нейтронов при рентгеноструктурном анализе (РСА).

От размеров зерен и от их соотношения зависят свойства наноматериалов, кроме того, это указывает на способ их получения и влияет на температурную стабильность. Пример распределения зерен по размерам представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3

#### Результаты определения размеров нанозерен Pd и TiN методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа

Параметр	Палладий		Нитрид титана	
	ПЭМ	РСА	ПЭМ	РСА
$L_n$ , нм	9,8+ 1,0	11,0 ±3,0	-6,5	–
$L_s$ , нм	19,0 ±2,0	19,6 ±1,0	10,3 ± 1.0	11,0 ±0,1
$L_v$ , нм	23,2+ 2,0	26,1 + 1,0	11,8+1,0	12,4±0,1
$L_\Gamma$ , нм	8,4 + 0,1	9,5 ±3,0	5,8 + 0,1	8,0 ± 0,2
$\Delta_\Gamma$ , нм	1,88 ±0,02	1,71 ±0,15	1,71 + 0,02	1,42 ±0,02

#### *Влияние размера зерен на свойства наноматериалов*

В наноматериалах имеется возможность многократного увеличения физико-механических характеристик, таких как твердость, прочность, износостойкость и др., которые зависят от размеров зерен, наличия пор и дефектов, которые способствуют зарождению микротрещин.

С уменьшением размеров зерен твердость увеличивается, а прочность и пластичность существенно снижаются.

*Необычные свойства НСМ и области применений.* К уникальным особенностям НСМ относятся отличия их температур плавления и размеров кристаллических решеток от соответствующих величин в материалах с обычной структурой. С увеличением размера частиц растет их поверхностная энергия. В результате снижается температура плавления частицы.

НСМ могут обладать высокой коррозионной стойкостью. Обычные стали в наноструктурном состоянии имеют более высокие коррозионные свойства, нежели нержавеющие стали. Возможно значительное повышение физических свойств НСМ: наноструктурный нитинол демонстрирует исключительную сверхупругость и эффект памяти формы; в нанокompозите  $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$  наблюдается сочетание высокой термостабильности и электропроводимости; наноструктурные магнитотвердые сплавы систем  $\text{Fe-Nb-B}$ ,  $\text{Co-Pt}$  демонстрируют рекордные магнитные гистерезисные свойства, а магнитомягкие наноматериалы проявляют очень низкую магнитную проницаемость.

Особый интерес представляют механические свойства объемных наноструктурных материалов, в частности появление высокопрочного состояния, низкотемпературной или высокоскоростной сверхпластичности. Реализация этих возможностей имеет непосредственное значение для разработки новых высокопрочных и износостойких материалов, перспективных сверхпластичных сплавов, металлов с высокой усталостной прочностью.

Недавние исследования показали возможности повышения механических свойств в наноструктурных сплавах с метастабильной структурой и фазовым составом. Формирование метастабильных состояний позволяет получить особо прочные материалы после последующих отжигов, что связано не только с наличием очень мелкого зерна, но также со специфической дефектной структурой границ зерен, морфологией вторых фаз, повышенным уровнем внутренних напряжений, кристаллографической текстурой и т.д. В связи с этим становится актуальной задача исследования влияния структурных особенностей наноматериалов на их механическое поведение.

Например, наноструктурная медь, полученная РКУП, в сравнении с хорошо отожженным крупнозернистым состоянием, проявляет два наиболее существенных различия:

а) в несколько раз более высокое значение предела текучести, превышающее 400 МПа;



б) значительно менее выраженное деформационное упрочнение на стадии пластического течения.

В НСМ обнаружен эффект, заключающийся в одновременном увеличении прочности и росте пластичности в металлах после ИПД. Известно, что при обычных обработках чем больше величина деформации, тем прочнее металл, но тем меньше его пластичность. Физическая природа нового явления, названного «парадоксом прочности и пластичности в ИПД материалах», связана с формированием наноструктур и изменением микромеханизмов деформации.

Сочетание прочности и пластичности является необходимым условием для разработки перспективных материалов. В этой связи достижение очень высокой прочности и пластичности в металлах и сплавах, подвергнутых ИПД, открывает пути создания принципиально новых конструкционных материалов, микроструктуры которых являются наноразмерными.

Так, к примеру, наноструктурный титан ВТ1-0 после ИПД имеет прочностные и усталостные свойства, превышающие аналогичные показатели высоколегированного титанового сплава ВТ6. Это открыло путь для создания нового класса конструкционных материалов медицинского назначения с высокими усталостными характеристиками и ударной вязкостью – имплантантов, используемых в травматологии и ортопедии.

Еще один пример – рекордные значения сверхпластичности. Измельчение структуры в Al- и Ti- сплавах, используя ИПД, позволило существенно сместить скоростной интервал проявления сверхпластической деформации в область более высоких скоростей, при этом одновременно снизить температуру деформации. Такие уникальные свойства НСМ позволяют значительно расширить возможности практического применения высокоскоростной и низкотемпературной сверхпластичности для эффективной формовки различных деталей сложной формы. Более того, сверхпластичные НСМ могут использоваться в качестве соединительных слоев для сварки различных материалов в твердом состоянии и разного химического состава.

В объемных ферромагнитных НСМ на порядок возрастает коэрцитивная сила. В НСМ – кремнии и германии – изменяются оптические свойства. Весьма существенно могут изменяться и магнитные свойства (табл.3.4).

### Сопоставление магнитных свойств некоторых массивных и НСМ

Металл	Массив	Наночастицы
Na, K, Rh, Pd	парамагнетик	ферромагнетик
Fe, Co, Ni, Gd, Tb	ферромагнетик	суперпарамагнетик
Cr	антиферромагнетик	нарушенный парамагнетик

Для типичных ферромагнетиков переход в суперпарамагнитное состояние возможен, когда размер частиц становится менее 1...10 нм.

При подшихтовке 0,1...0,5% ультрадисперсного порошка  $Ni$  к обычным порошкам железа и никеля после прессования и спекания пористость порошковых изделий снижается на 4...7% при одновременном снижении температуры спекания на 150...200 °С. Добавка ультрадисперсного порошка состава 0,5Ni + 0,5...1,0%Cu + 3%С к порошку стали ПХ17Н2 позволяет получать порошковую сталь с ударной вязкостью 1,1...1,15 МДж/м<sup>2</sup>, что приближается к уровню литой стали и в 1,5 раза превышает уровень КС для ковanej стали Х17Н2. Пористость стали снижается с 10...11 до 5...6%, твердость растет в 1,5 раза, достигая значения 1,2...1,6 ГПа.

#### 3.4. Применение наноматериалов

Свойства наноматериалов позволяют использовать их в широких областях:

1. Создание новых высокопрочных композиционных материалов на основе нанотрубок, физико-механические характеристики которых будут в десятки раз превышать аналогичные характеристики высокопрочных сталей при меньшей плотности.
2. Высокопрочные покрытия для пар трения, режущего инструмента, превышающие по твердости алмаз.
3. Смазывающе-охлаждающие технологические среды и присадки для пар трения, значительно повышающие эксплуатационные характеристики изделий.
4. Аккумуляторы и батареи нового поколения, обладающие большой емкостью при малых габаритах.
5. Нанодатчики для измерения физических величин со сверхвысокой чувствительностью.
6. Элементы электронных схем для приборов нового поколения.

7. Контрастирующие вещества для магнитно-резонансной томографии и других видов диагностики в биологии и медицине.

8. Создание защитных покрытий поверхностей, невидимых для радаров и других средств обнаружения.

9. Контейнеры для транспортировки лекарств и диагностических датчиков в медицине.

10. Создание сверхпрочных волокон, нитей, канатов, стержней для запуска и удержания на геостационарной орбите спутников и космических станций.

11. Матрицы и дисплеи сверхвысокой четкости и яркости и чувствительности.

Основные области применения наноматериалов – в машиностроении, химической промышленности, электротехнике, энергетике, электронике, информационных и компьютерных технологиях, биологии и медицине, в области охраны окружающей среды, а также в некоторых других областях. Следует принять во внимание условность приведенного выше деления сфер применения; одни и те же материалы могут применяться в разных отраслях, особенно это относится к нанопорошкам, производство которых и получение изделий из которых осуществляется, как правило, разными фирмами. Преобладающим типом нанопорошков являются оксиды ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.), используемые в разных областях.

### **3.5. Конструкционные, инструментальные и триботехнические наноматериалы**

Конструкционные машиностроительные наноматериалы общего назначения применяются пока еще недостаточно широко. Применение порошковых консолидированных наноматериалов ограничено размерами и формой порошковых изделий, низкой текучестью и прессуемостью, легкой окисляемостью и загрязняемостью, а также трудностью сохранения наноструктуры при спекании. Многие порошковые наноматериалы имеют низкие пластические характеристики и остаточную пористость.

Перспективна технология равноканального углового прессования, позволяющая получить высокопрочные и пластичные металлы, сплавы, интерметаллиды, которые находят применение в машиностроении как конструкционные материалы.

Следует отметить, что характеристики прочности и твердости металлических наноматериалов выше, чем для обычных материалов, в 4÷6 раз. Металлические наноматериалы должны эксплуатироваться

преимущественно в условиях сжатия (а не растяжения), что будет затруднять распространение хрупких трещин и позволит повысить допустимый уровень разрушающих напряжений в несколько раз. Для изготовления низко- и высокотемпературных узлов трения могут применяться *керметные нанокompозиты* на основе  $Al_2O_3$  с добавками Fe и FeCr (размер кристаллитов 40-60 нм) изготовленные механохимическим синтезом с последующим горячим изостатическим прессованием.

Как перспективные жаропрочные материалы рассматриваются многофазные оксидные и безоксидные нанокompозиты, которые характеризуются высокой стабильностью механических свойств: при  $20^\circ C$  –  $\sigma_v=1,2 ГПа$ , при  $1200^\circ C$  –  $\sigma_v=1 ГПа$ . Высокая температурная прочность нанокompозитов на основе SiC позволяет использовать их для создания газотурбинной техники.

В инструментальной промышленности, а также в разнообразных областях общего и специального машиностроения следует применять изделия из наноматериалов, используя схему сжимающих напряжений (за исключением ударных и знакопеременных нагрузок), в этом случае допустимо снижение пластических характеристик.

Повышенная твердость компактов и пленок с нанокристаллической структурой влечет за собой увеличение износостойкости режущего инструмента и узлов трения в антифрикционных и фрикционных изделиях. Нанокристаллический материал, гексанит на основе нитрида бора ( $KIC = 15-18 МПа \cdot м^{0,5}$ ), получаемый методом высоких давлений при высоких температурах, используется для чистовой обработки резанием.

Имеются положительные результаты применения инструментальных наноматериалов (твердые сплавы, быстрорежущие стали, инструмент из нанокристаллов алмаза для чистовой обработки, новые сверхтвердые материалы и др.). Добавки нанопорошков карбида вольфрама (5–8 %) к стандартным твердым сплавам повышают однородность структуры и снижают разброс значений прочности.

Нанокристаллические твердые сплавы с высокими показателями твердости ( $HV=22-24 ГПа$ ) и трещиностойкости ( $\sim 10 МПа \cdot м^{1/2}$ ) считаются перспективными для изготовления бурового инструмента.

Для изготовления инденторов в устройствах для измерения твердости и трибологических характеристик твердых материалов, включая наноструктурные пленки, применяют сверхтвердые фуллериты (консолидированные фуллерены C<sub>60</sub>), которые были получены

компактированием при высоких давлениях (9÷13 ГПа) в интервале температур 200-1600°C. Значения твердости этих образцов составляют 100 ГПа (в отдельных случаях до 300 ГПа), а модуль объемной упругости превышает таковой для алмаза и составляет более 500 ГПа.

В качестве износостойких покрытий на металлообрабатывающем инструменте применяются наноструктурные карбидные, нитридные и боридные пленки (TiC, TiN, TiB<sub>2</sub>, Ti(C, N), (Ti, Al)N и др.), что повышает рабочий ресурс инструмента в несколько раз. Положительное влияние однослойного покрытия из карбонитрида титана и многослойного нитридного покрытия (Ti,Al,Y)N/VN демонстрируют следующие данные: (обрабатываемый материал – легированная сталь твердостью 38 HRC; скорость резания 385 м/мин; подача 0,2 мм за 1 оборот): рабочий ресурс резца без покрытия – 7 мин; резца, с покрытием Ti(C, N), – 53 мин; резца, с покрытием (Ti, Al, Y)N/VN, – 141 мин.

Используются также и многослойные покрытия CrN/NbN, которые помимо высокой износостойкости обладают также коррозионной стойкостью, которая позволяет их применять в условиях агрессивных сред.

Для получения износостойких покрытий и восстановления изношенных изделий методом газотермического напыления применяют нанопорошки (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – TiO<sub>2</sub>, WC – Co, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–Ni и др.), что повышает твердость и износостойкость в 1,3 – 2 раза.

Для улучшения технических характеристик машин и различных механизмов применяют полировальные пасты и противоизносные препараты на основе наночастиц (например, на основе бронзы). В зонах трения используются пасты на основе нанопорошков, которые увеличивают ресурс машины и улучшают технико-экономические показатели.

Замена классических металлических материалов на полимеры, армированные наночастицами, позволяет снизить массу, потребление топлива и уменьшить вредные выбросы.

Добавки сажи и серы к резинотехническим и другим пластмассовым изделиям могут быть заменены добавками наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> и т.д., что позволит повысить прочность и износостойкость.

В таблице 3.5 приведены сравнительные данные по свойствам политетрафторэтилена с добавками технического углерода и нанокристаллического алмаза, что позволяет улучшить свойства материалов.

**Характеристики политетрафторэтилена с добавками  
технического углерода и нанокристаллического алмаза**

Добавка	Модуль упругости при сжатии, МПа	Коэффициент трения, $f$	Относительная износостойкость
Отсутствует	4,2	0,21	1
Технический углерод (20%)	11,5	0,32	25
Нанокристаллический алмаз (5 %)	4,5	0,21	70

### 3.6. Пористые наноматериалы и наноматериалы со специальными физико-химическими свойствами

В химической и многих других отраслях промышленности нашли применение наноматериалы в катализаторах, красках, фильтрах, химических источниках энергии и т.д.

Поверхность многих пористых наноструктур сама по себе обладает каталитическими свойствами. Создание высокопористых носителей на основе

ДНК является перспективным направлением для разработки новых фильтрационных, каталитических и композиционных систем.

Значительное внимание уделяется изучению каталитических, сорбирующих и фильтрующих свойств углеродных нанотрубок применительно к очистке газов от труднорастворимых канцерогенных диоксинов.

Нанокристаллический  $TiO_2$  нашел применение в приборах для очистки воздуха от органических загрязнений бытового и промышленного происхождения в различных помещениях: цехах, больницах, бытовках, офисах и т.д.

Для солнечных батарей и светодиодов считают перспективными нанопленки и высокопористые слои из  $TiO_2$  и CdSe.

Разработана широкая гамма пластинчатых и трубчатых фильтрующих элементов из пористой нержавеющей стали со слоем из ультрадисперсного порошка на основе TiN или  $TiO_2$  для изготовления многослойных фильтров тонкой очистки. Тонкость фильтрации для газовых сред таких фильтров может достигать до 10 нм (при перепаде давления 0,1 бар) и для жидких сред – до 10-100 нм (при перепаде давления 2-5 бар).

Разделение водно-масляных эмульсий, очистка сточных вод и жидких радиоактивных отходов, фильтрация продуктов распада клеток, осветление фруктовых соков – далеко не полный перечень областей применения фильтров тонкой очистки.

Перспективно использование фуллеренов и углеродных нанотрубок для водородсорбирующих целей.

Выпускаются нанопорошки соединений лития и олова ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{LiMnO}_2$ ,  $\text{LiVOx}$ ,  $\text{SnO}_2$ ) для электродов литиевых аккумуляторов, используемых в автомобильной, космической и военной технике. Такие важные характеристики батарей, как емкость, срок службы, скорость зарядки и другие, значительно улучшаются при использовании наноматериалов.

Ведутся работы по исследованию возможности использования углеродных нанотрубок в литиевых батареях. Высокие разрядные характеристики ожидаются за счет повышения концентрации лития в нанотрубках по сравнению с графитовыми электродами.

Наноструктурные объекты имеют необычные оптические свойства, что позволяет их использовать в декоративных целях, например при нанесении покрытий на посуду.

Ультрадисперсные порошки Zn, Al,  $\text{TiO}_2$ , ZnO применяются в лакокрасочной промышленности, для изготовления чернил для принтеров для антикоррозионной защиты, в косметике. Для мониторинга окружающей среды используют газовые сенсоры на основе полупроводниковых оксидов ( $\text{SnO}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  и др.).

### **3.7 Наноматериалы со специальными физическими свойствами**

Наноматериалы могут быть использованы для изготовления магнитомягких и магнитотвердых материалов; проводников, полупроводников и диэлектриков; деталей лазерной, измерительной, вычислительной и атомной техники.

#### *Магнитные материалы*

Магнитомягкие материалы с высоким уровнем статических и динамических магнитных свойств изготавливают на основе Fe–Si–B с добавками Nb, Cu, Zr и других переходных металлов. После закалки из расплава эти сплавы аморфны, а рабочие параметры достигаются после частичной кристаллизации при температуре 530-550°C, когда выделяется упорядоченная нано–кристаллическая фаза Fe–Si (18-20) % с размером частиц около 10 нм. Объемная доля наночастиц в аморфной матрице составляет 60-80 %. Сплавы обладают низкой

коэрцитивной силой (5-10 А/м) и высокой начальной магнитной проницаемостью при обычных и высоких частотах при малых потерях (200 кВт/м<sup>3</sup>) на перемагничивание, что обеспечивает их применение в электротехнике и электронике в качестве трансформаторных сердечников, магнитных усилителей и импульсных источников питания, а также в технике магнитной записи и воспроизведения и т.д., обеспечивая значительную миниатюризацию этих устройств и стабильную работу в широком диапазоне частот и температур. Мировой выпуск сплавов оценивается на уровне 1000 т в год.

При изготовлении покрытий головок магнитной записи используют нанокристаллические железные пленки с добавками тугоплавких соединений (ZrN, AlN и др.), полученные магнетронным распылением. Это позволяет повысить рабочие характеристики головок при высокой термической стабильности и износостойкости.

Для изготовления постоянных магнитов небольших размеров используются нанокристаллические магнитотвердые материалы на основе Fe–Nd–B и Fe–Sm–M, получаемые методами механохимического синтеза.

Магнитные наноматериалы, используемые для изготовления устройств хранения и записи информации (головки, носители, диски и т.д.), позволили значительно повысить плотность записи информации и увеличить скорость считывания. Плотность хранения информации ежегодно удваивается.

Магнитные частицы в полимерах и пленках могут быть использованы для создания эффективных нанокомпозитов для записи и хранения информации, что позволяет плотность записи повысить до 50 Гбит/см<sup>2</sup>.

Магнитные свойства ультрадисперсных порошков используются в ферромагнитных жидкостях, применяемых в качестве вакуумных уплотнений, глушителей колебаний и в других областях.

#### *Проводящие материалы и изоляторы*

Сочетание высокой электропроводности и прочности необходимо при создании материалов для крупных магнитных систем с большой напряженностью магнитного поля. Проволочные нанокомпозиты типа Cu–Nb изготавливают путем совместного холодного волочения медных и ниобиевых прутков. В структуре композита Cu–Nb (18 мас. %) поперечный размер ниобиевых волокон составляет около 100 нм; прочность на растяжение достигает 1,25 МПа, а электропроводность составляет около 70% от электропроводности чистой меди. По рабочим парамет-



рам наноконпозиционные провода признаны одними из лучших в мире. Электроконтактные порошковые материалы широко применяются в реле, выключателях, пускателях, контакторах и т.п.). Они обладают малым удельным и контактным сопротивлением, незначительной эрозией, механической прочностью и химической инертностью, высокой теплопроводностью и т.д. Материалы с металлическими наночастицами применяются для изготовления нагревателей, уплотнителей, в измерительной технике, при производстве кабелей, экранов, в медицинских приборах и инструментах. Существенное увеличение электропроводности полимерных материалов достигается при добавлении углеродных нанотрубок.

### **3.8. Новые защитные керамические наноматериалы**

Керамические материалы используются более чем в 150 областях и как конструкционные и в виде покрытий валов, подшипников, пропеллеров, телескопических перископов и т.д. Нанокерамика обладает большей жесткостью по сравнению с обычной и используется везде, где необходима водонепроницаемость и защита от коррозии. Наноструктуры на основе карбида кремния позволяют в несколько раз повысить жесткость материалов по сравнению с обычным SiC. Например, покрытие NanoTuf™ для прозрачных полимерных поверхностей позволяет в несколько раз увеличить прочность пластика. При нанесении покрытия на пластиковую поверхность образуется сверхтвердая пленка, которая не только защищает от биологических и химических агентов, но и от концентрированных ударов, например от попадания пуль.

Разработана специальная «электромеханическая краска», которая позволит менять цвет изделий наподобие хамелеона, а также одновременно предотвращает коррозию и сможет «затягивать» мелкие повреждения на их внешней поверхности. Такая краска состоит из большого количества наномеханизмов, которые позволят выполнять все вышеперечисленные функции. Также с помощью системы оптических матриц, которые будут отдельными наномашинками в «краске», возможно добиться эффекта невидимости машины или самолета. Миниатюрные камеры считывают изображение с одной стороны изделия, передавая его на фотоэлементы на другой стороне, формируя, таким образом, изображение заднего фона спереди.

### **3.9 Нанотрубки-металлурги**

В настоящее время установлено, что нанотрубки могут обрабатывать металлы и другие материалы весьма необычным способом.

В частности, нанотрубки могут обрабатывать нанометровые порции металла технологией холодной обработки, выполняя роль объемного пресса. Например, если многослойную углеродную нанотрубку, содержащую внутри металл (железо, карбид железа или кобальт) подвергнуть воздействию электронного луча с высокой энергией, то можно вытягивать из металлов наноструны.

### **3.10 Медицинские и биологические наноматериалы**

Ученые-медики постоянно изыскивают способы увеличения продолжительности и качества жизни и ведут интенсивные исследования в области биоматериалов вообще и нанобиоматериалов в частности. Основные области применения наноматериалов в медицине, биологии и сельском хозяйстве весьма разнообразны:

- хирургические и стоматологические инструменты;
- диагностика, наномоторы, нанороботы и наносенсоры;
- фармакология, лекарственные препараты и методы их доставки;
- искусственные органы и ткани;
- стимулирующие добавки, удобрения и т.д.;
- защита от биологического и радиологического оружия.

В настоящее время широко используется биологически полностью совместимый с живыми тканями титан, который перспективен в травматологии и стоматологии для изготовления протезов тазобедренных, коленных, челюстных и других суставов, пластин и спиц для костного сращивания, винтов для фиксации позвоночника и т.п. Нелегированный титан обладает невысокими механическими свойствами. Методы интенсивной пластической деформации позволяют существенно измельчить материал до зерен размером 100-200 нм, что в 2-3 раза повышает его механические свойства.

В хирургии, травматологии и стоматологии находят применение материалы с памятью формы, в частности никелид титана TiNi. Рабочие поверхности эндоскопов, фиксаторы и скобы для суставов, экстракторы для извлечения камней из мочеточников – примеры применения материалов с эффектом памяти формы. Восстановление заданной формы этих инструментов осуществляется за счет температуры человеческого организма или при нагреве электрическим током.

Биосовместимый и биоактивный материал гидроксиапатит  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  используется в составе полимерных, стеклянных, углеродных и других композитов для изготовления искусственных имплантатов, наполнителей костных дефектов, создания покрытий на

металлических имплантатах, для пломбирования зубов и т.д. В настоящее время практически все или, во всяком случае, многие из природных биоматериалов (например, костные ткани, материалы зубов, кожи и т.п.) по своим физико-химическим и физикомеханическим свойствам пока значительно превосходят их искусственные аналоги, и в этом отношении наноструктурные материалы являются особенно ценными.

Модифицирование поверхности полимеров типа полиэтилен-терефталата и политетрафторэтилена путем ионно-плазменной обработки с формированием наноструктурного рельефа позволяет значительно повысить антимикробную активность, что используется для создания биологически активных систем в биологии, медицине и пищевой промышленности.

Лечебные свойства многих лекарственных препаратов повышаются при уменьшении размеров их частиц до нанометров, а дисперсные системы в виде ультрадисперсных порошков перспективны также для защиты от биологического и радиологического оружия.

Нельзя забывать и о токсическом действии наночастиц на живые организмы. Известно отрицательное влияние частиц кремниевых соединений и бериллия на здоровье человека, а также и других веществ в виде ультрадисперсных порошков, включая углеродные нанотрубки, которые потенциально опасны и требуют осторожного обращения.

Практическое использование имеют полимерные нановолокна диаметром менее 100 нм, из которых изготавливают биоактивные фильтры. Благодаря наличию большого числа гидроксильных групп агрегаты волокон в водных растворах заряжаются положительно и активно сорбируют отрицательно заряженные бактерии, вирусы, неорганические и органические наночастицы, обеспечивая эффективную очистку воды, а также стерилизацию медицинских сывороток и биологических сред.

В медицине применяются биочипы с ДНК-зондами и с белковыми зондами, которые позволяют проводить диагностику болезней на молекулярном уровне, вырабатывая методы лечения с минимальными побочными эффектами. Они изготавливаются путем нанесения содержащих флуоресцентные или иные метки молекул ДНК (или белков) на специальную подложку. С ДНК-технологией и биочипами связано создание искусственных биологических тканей.

## ТЕМА 4 ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Полимерами* называются высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных маломолекулярных звеньев (*мономеров*) одинакового строения. Макромолекулы представляют собой длинные цепи из мономеров, что определяет их большую гибкость. Отдельные атомы в мономерах соединены между собой довольно прочными ковалентными химическими связями. Между макромолекулами полимеров действуют значительно более слабые физические связи. Молекулярная масса их составляет от 5000 до 1 млн. При таких больших размерах макромолекул свойства веществ определяются не только химическим составом этих молекул, но и их взаимным расположением и строением.

Полимеры являются одним из наиболее перспективных классов материалов, используемых человеком. Применение полимерных материалов интенсивно расширяется практически во всех отраслях производства – от классических машиностроения и строительства до современных нанотехнологий.

Исследования последних лет в области полимеров можно разделить на три основных направления. Первое заключается в создании новых методов синтеза полимеров, управления ходом этих реакций с целью формирования полимерных молекул заданного состава и структуры. Второе направление связано с изучением структуры и свойств полимеров и полимерных материалов для оптимальной трансформации их молекулярной структуры в полезные свойства материалов. Третье направление связано с процессами переработки полимеров в изделия, поскольку они являются дополнительными факторами «коррекции» структуры и свойств материалов.

### **4.1 Классификация и основные характеристики полимеров**

Для удобства изучения связи состава, структуры со свойствами полимеров их можно классифицировать по различным признакам (составу, форме макромолекул, фазовому состоянию, полярности, отношению к нагреву). По составу все полимеры подразделяют на *органические, элементоорганические и неорганические*.

*Органические полимеры* составляют наиболее обширную группу соединений. Если основная молекулярная цепь таких соединений образована только углеродными атомами, то они называются карбоцепными полимерами. Органическими полимерами являются смолы и каучуки.

*Элементоорганические соединения* содержат в составе основной цепи неорганические атомы (Si, Ti, Al), сочетающиеся с органическими радикалами (CH<sub>3</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>, CH<sub>2</sub>). Эти радикалы придают материалу прочность и эластичность, а неорганические атомы сообщают повышенную теплостойкость. В природе таких соединений не встречается. Представителями их являются кремнийорганические соединения.

К *неорганическим полимерам* относятся силикатные стекла, керамика, слюда, асбест. В составе этих соединений углеродного скелета нет. Основу неорганических соединений составляют оксиды кремния, алюминия, магния, кальция и др.

По фазовому составу полимеры разделяют на *аморфные и кристаллические*. *Аморфные полимеры* однофазны и построены из цепных молекул, собранных в пачки. Пачка состоит из многих рядов макромолекул, расположенных последовательно друг за другом. Пачки способны перемещаться относительно соседних элементов, так как они являются структурными элементами.

*Кристаллические полимеры* образуются в том случае, если их молекулы достаточно гибкие и имеют регулярную структуру. Тогда при соответствующих условиях возможны фазовый переход внутри пачки и образование пространственных решеток кристаллов.

Все полимеры по отношению к нагреву подразделяют на термопластичные и терморезистивные. Термопластичные полимеры при нагреве размягчаются, даже плавятся, при охлаждении затвердевают. Этот процесс обратим. Структура макромолекул таких полимеров линейная или разветвленная.

*Терморезистивные полимеры* на первой стадии образования имеют линейную структуру и при нагреве размягчаются, затем вследствие протекания химических реакций затвердевают (образуется пространственная структура) и в дальнейшем остаются твердыми. Отвержденное состояние полимера называется термостабильным.

Особенности строения полимеров оказывают большое влияние на их физико-механические и химические свойства. Вследствие высокой молекулярной массы они неспособны переходить в газообразное состояние, при нагреве образуют вязкие жидкости, а термостабильные даже не размягчаются. С повышением молекулярной массы уменьшается растворимость.

Полидисперсность, присущая полимерам, приводит к значительному разбросу показателей при определении физико-механических свойств полимерных материалов. Механические свой-

ства полимеров (упругие, прочностные) зависят от их структуры, физического состояния, температуры и т.п.

Полимеры могут находиться в трех состояниях: *стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем.*

*Стеклообразное состояние* – твердое, аморфное (атомы, входящие в состав молекулярной цепи, совершают колебательное движение около положения равновесия; движения звеньев и перемещения макромолекул не происходит).

*Высокоэластичное состояние* присуще только высокополимерам, характеризуется способностью материала к большим обратимым изменениям формы при небольших нагрузках (колеблются звенья, и макромолекула приобретает способность изгибаться).

Своеобразие свойств полимеров обусловлено их структурой. Различают следующие типы полимерных структур: *линейную, линейно-разветвленную, лестничную и пространственную* с громоздкими молекулярными группами и специфическими геометрическими построениями (рис. 4.1).

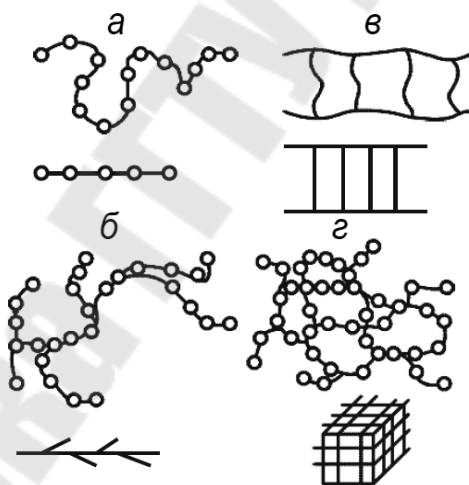


Рис. 4.1. Различные типы структур полимеров:  
а – линейная, б – линейно – разветвленная, в – лестничная,  
з – пространственная сетчатая

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

Большинство полимеров является диэлектриками. Полимеры в основном относятся к немагнитным веществам. Из всех применяемых конструкционных материалов полимеры имеют наименьшую теплопроводность и наибольшие теплоемкости и тепловую усадку. Тепловая усадка полимеров примерно в 10-20 раз больше, чем металлов. Причиной потери герметичности уплотнительными узлами при низких температурах является стеклование резины и резкое различие коэффициентов расширения металла и резины в застеклованном состоянии.

Сравнительные характеристики важнейших полимеров представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

### Характеристики некоторых полимеров

Полимер	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	E, (20°C) ГПа	$\sigma_B$ , МПа	Полное удлинение $\varepsilon$ , %
<i>Термопластичные</i>				
Полиэтилен (малой плотности)	0,92	0,15-0,24	7-17	90-800
Полиэтилен (высокой плотности)	0,96	0,55-1,0	20-37	15-100
Поливинилхлорид	1,39	2,4-3,0	40-60	2-30
Полипропилен	0,9	1,2-1,7	50-70	10-700
Полистирол	1,06	3,0-3,3	35-68	1-2
Полиамид	1,14	2,0-3,5	60-110	60
<i>Термореактивные</i>				
Фенол-формальдегидная смола	1,4	8	35-55	0
Полиэстер	–	1,3-4,5	45-85	0
Эпоксидная смола	1,6	2,1-5,5	40-85	0

### 4.2. Пластические массы

Пластмассы – это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров. Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, составляющих их основу.

Пластмассы состоят из нескольких компонентов: связующего вещества, наполнителя, пластификатора и др. Обязательным компонентом является связующее вещество. Такие простые пластмассы, как полиэтилен, вообще состоят из одного связующего вещества.

*Наполнителями* служат твердые материалы органического и неорганического происхождения. Они придают пластмассам прочность, твердость, теплостойкость, а также некоторые специальные свойства, например антифрикционные или, наоборот, фрикционные. Кроме того, наполнители снимают усадку при прессовании.

*Пластификаторы* представляют собой нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Растворяясь в полимере, пластификаторы повышают его способность к пластической деформации. Их вводят для расширения температурной области высокоэластического состояния, снижают жесткость пластмасс и температуру хрупкости.

В качестве пластификатора применяют сложные эфиры, низкомолекулярные полимеры и др. Пластификаторы должны оставаться стабильными в условиях эксплуатации. Их наличие улучшает морозостойкость и огнестойкость пластмасс.

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

*Стабилизаторы* вводят в пластмассы для повышения долговечности. Светостабилизаторы предотвращают фотоокисление, а антиокислители – термоокислительные реакции.

*Отвердители* изменяют структуру полимеров, влияя на свойства пластмасс. Чаще используют отвердители, ускоряющие полимеризацию. К ним относятся оксиды некоторых металлов.

*Специальные химические добавки* вводят с различными целями; например, сильные органические яды-фунгициды – для предохранения пластмасс от плесени и поедания насекомыми в условиях тропиков.

*Смазывающие вещества* (стеарин, олеиновая кислота) применяют для предотвращения прилипания пластмассы к оборудованию при производстве и эксплуатации изделий.

*Красители и пигменты* придают желаемую окраску пластмассам.

*Для пластмасс характерны следующие свойства:*

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

– высокая коррозионная стойкость. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей. Большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении;



- высокие диэлектрические свойства;
- хорошая окрашиваемость а любые цвета\$
- некоторые пластмассы могут быть изготовлены прозрачными, не уступающими по своим оптическим свойствам стеклам;
- механические свойства широкого диапазона. В зависимости от природы выбранных полимеров и наполнителей пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими. Ряд пластиков по своей механической прочности превосходит чугун и бронзу. При одной и той же массе пластмассовая конструкция может по прочности соответствовать стальной;
- антифрикционные свойства. Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов (оловянистых бронз, баббитов и др.). Например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без смазки;
- высокие теплоизоляционные свойства. Все пластмассы, как правило, плохо проводят теплоту, а теплопроводность таких теплоизоляторов, как пено- и поропласты, почти в 10 раз меньше, чем у обычных пластмасс;
- высокие адгезионные свойства;
- хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки) – литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений в вакууме.

Недостатком большинства пластмасс является их невысокая теплостойкость (до 100-120°C). В настоящее время верхний температурный предел для некоторых видов поднялся до 300-400°C. Пластмассы могут работать при умеренно низких температурах (до -70°C), а в отдельных случаях - при криогенных температурах. Недостатками пластмасс также являются их низкая твердость, склонность к старению, ползучесть, нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам. Однако положительные свойства значительно превосходят их недостатки, что обуславливает высокие темпы роста ежегодного производства пластмасс.

По характеру связующего вещества пластмассы подразделяются на термопластичные (термопласты), получаемые на основе термопластичных полимеров, и терморективные (реактопласты), т. е. неразмягчающиеся.

#### 4.2.1. Термопластичные пластмассы (термопласты)

Широкое применение находят термопластичные пластмассы на основе полиэтилена, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида, фторопластов, полиамидов и других полимеров (таблице 4.2).

*Полиэтилен* имеет линейную структуру макромолекул [-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-] и является продуктом полимеризации этилена. Свойства полиэтилена зависят от условий полимеризации. По способу изготовления различают полиэтилен низкой плотности (0,918-0,930 г/см<sup>3</sup>), получаемый полимеризацией при высоком давлении (ГОСТ 16337-77Е), и полиэтилен высокой плотности (0,946- 0,970 г/см<sup>3</sup>), получаемый полимеризацией при низком давлении (ГОСТ 16338-85Е). Полиэтилен высокой плотности имеет степень кристалличности до 75-95 %.

Чем выше плотность и степень кристалличности полиэтилена, тем выше его прочность, модуль упругости и теплостойкость. Разрушающее напряжение при растяжении полиэтилена низкой плотности составляет 10-17 МПа, полиэтилена высокой плотности – 18-35 МПа. Полиэтилен имеет высокие диэлектрические свойства, практически не поглощает влагу. Он химически стоек к действию кислот, щелочей и растворителей, нетоксичен, легко сваривается, технологичен (поддается экструзии, литью, напылению, заливке т. д.), стоит недорого и сочетает высокую прочность с пластичностью. Недостатком полиэтилена является склонность к старению под действием ультрафиолетовых лучей.

Полиэтилен (ГОСТ 25951-83, ГОСТ 20477-86, ГОСТ 10354-82) выпускается в виде пленок толщиной 0,03-0,30 мм, шириной 1400 мм и длиной 30 м, а также в виде листов толщиной 1-6 мм и шириной до 1400 мм.

Полиэтиленовые трубы могут работать при температурах до -60°С, они не подвержены почвенной коррозии.

Полиэтилен применяют для изоляции электропроводов и кабелей, в качестве упаковочного материала для пищевых продуктов, в качестве заменителя стекла.

Изобретателем полиэтилена считается немецкий инженер Ганс фон Пехманн, который впервые случайно получил этот полимер благодаря инженерам Эрику Фосету и Реджинальду Гибсону. Сначала полиэтилен использовался в производстве телефонного кабеля и лишь в 1950-е годы стал использоваться в пищевой промышленности как упаковка.

## Области применения некоторых термопластических пластмасс

Пластмасса	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Область применения
Полиэтилен высокого давления	-70...+70	Упаковка, ненагруженные детали машин и оборудования, футляры, покрытия, фольги
Полиэтилен низкого давления	-70...+80	То же
Полистирол	-40...+65	Оборудование радиотехники и фотографии, электроизоляция, пенящиеся изоляционные материалы
Поливинилхлорид	-40...+70	Химическое оборудование, трубы, профили, детали машин, элементы насосов и вентиляторов, упаковка, покрытие полов, искусственная кожа, оконные рамы и т.д.
Полиамид	-60...+100	Детали машин, канаты, шнуры, одежда
Полиметилметакрилат (органическое стекло)	-60...+100	Детали освещения и оптики, остекление в самолетостроении, наземном и водном транспорте
Поликарбонаты	-100...+135	Точные детали машин и аппаратуры, радио- и электротехника, фотографические пленки
Полипропилен	-20...+130	Трубы, детали автомобилей, элементы холодильников, емкости, упаковка
Политетрафторэтилен (тефлон)	-269...+260	Химическая, электротехническая, машиностроительная (подшипники) промышленность

Из полиэтилена изготавливают крышки подшипников, уплотнительные прокладки, детали вентиляторов и насосов, гайки, шайбы, полые изделия вместимостью до 200 л, тару для хранения и транспортировки кислот и щелочей.

*Полипропилен* (ТУ 6-05-1105-78) является производным этилена. Макромолекула полипропилена имеет следующую химическую формулу:  $[-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-]$ .

По сравнению с полиэтиленом полипропилен имеет более высокую механическую прочность и жесткость, большую теплостойкость и меньшую склонность к старению. Разрушающее напряжение при растяжении полипропилена достигает 25-40 МПа. Недостатком полипропилена является его невысокая морозостойкость ( $-20^\circ\text{C}$ ).

Детали из полипропилена изготавливают штамповкой, литьем

под давлением, пневматическим и вакуумным прессованием; полиэтилен можно сваривать, напылять на металл, ткань, картон. Он легко подвергается механической обработке на токарных, фрезерных, сверлильных станках. Полипропилен применяют для изготовления антикоррозионной футеровки резервуаров, труб и арматуры трубопроводов, электроизоляционных деталей, а также для изготовления деталей, применяемых при работе в агрессивных средах. Из полипропилена изготавливают корпуса автомобилей и аккумуляторов, прокладки, трубы, фланцы, водонапорную арматуру, пленки, пленочные покрытия бумаги и картона, корпуса воздушных фильтров, конденсаторы, вставки демпфирующих глушителей, зубчатые и червячные колеса, ролики, подшипники скольжения, фильтры масляных и воздушных систем, рабочие детали вентиляторов, насосов, уплотнения, детали приборов и автоматов точной механики, кулачковые механизмы, детали телевизоров, магнитофонов, холодильников, стиральных машин, изоляцию проводов и кабелей. Отходы при производстве полипропилена и отработавшие изделия из него используют для повторной переработки.

*Полистирол* (ГОСТ 20282-86Е) относится к числу наиболее известных и широко применяемых пластмасс. Его макромолекула имеет следующую формулу:  $[-CH_2-CH(C_6H_5)-]_n$ .

Полистирол – твердый, жесткий, бесцветный, прозрачный, аморфный полимер, легко окрашиваемый в различные цвета. Обладает высокой водостойкостью, хорошей химической стойкостью в растворах солей, кислот и щелочей. По сравнению с другими термопластами более стоек к радиации. Недостатками полистирола являются повышенная хрупкость при ударных нагрузках, склонность к старению, невысокая тепло- и морозостойкость. Интервал рабочих температур от  $-40$  до  $+65^{\circ}C$ . Полистирол применяют для изготовления деталей радио- и электроаппаратуры, предметов домашнего обихода, детских игрушек, трубок для изоляции проводов, пленок для изоляции электрических кабелей и конденсаторов, открытых емкостей (лотки, тарелки и др.), прокладок, втулок, светофильтров, крупногабаритных изделий радиотехники (корпуса транзисторных приемников), деталей электропылесосов (колодки, щелевые сопла, прокладки, ручки), мебельной фурнитуры, конструкционных изделий с антистатическими свойствами. Ударопрочным полистиролом (механическая смесь полистирола с каучуком) облицовывают пассажирские вагоны, салоны автобусов и самолетов. Из него изготавливают крупногаба-

ритные детали холодильников, корпуса радиоприемников, телефонных аппаратов и др.

Его применяют для изготовления деталей машин и аппаратов, непосредственно контактирующих с пищевыми продуктами (молоком и молочными продуктами, вином, коньяком, шампанским и др.), а также для тары и упаковки. Его используют для изготовления пористых материалов.

В числе различных синтетических материалов широкое распространение получили так называемые *газонаполненные пластики*. Эти материалы разделяются на *пенопласты* и *поропласты*. У пенопластов микроскопические ячейки, наполненные газом, не сообщаются между собой, и плотность таких материалов, как правило, менее 0,3 г/см<sup>3</sup>. Ячейки у поропластов сообщаются между собой, и их плотность несколько выше. Пенопласты и поропласты выпускаются на основе полистиролов, поливинилхлорида и различных эфирных полимеров.

Пенопласт применяют в качестве теплоизоляционного слоя в конструкциях судовых трюмов, кузовов автофургонов, холодильных камер на объектах мясомолочной и рыбной промышленности.

*Пенополистирол* получают из эмульсионного полимера прессовым и беспрессовым методами. Пенополистирол применяют для теплоизоляции холодильников и торгового оборудования. Для производства изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, используют обычно суспензионный полистирол.

Пенополистиролы могут работать при температурах до 60-75°C. Недостатком пенополистирола является присутствие в нем горючего порообразователя, например изопентана. Уменьшить или вовсе устранить эту опасность удается путем введения антипиренов, например оксида сурьмы.

Пенополистирол применяется в различных отраслях промышленности как термо- и звукоизоляционный материал, в пищевой промышленности – для изоляции трюмов для хранения продуктов питания при температуре от -15 до -35°C. Коэффициент теплопроводности пенополистирола близок к теплопроводности воздуха. Благодаря хорошим амортизационным свойствам и малой плотности пенополистирол используют в качестве упаковочного материала.

*Пластмассы на основе поливинилхлорида* (ГОСТ 5960-72, ГОСТ 9998-80, ГОСТ 16214-86, ГОСТ 16272-79) имеют хорошие электроизоляционные свойства. Они стойки к воздействию химикатов, не поддерживают горения, атмосферо-, водо-, масло- и бензостойки. По-

ливинилхлорид имеет химическую формулу  $[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$ . Непластифицированный поливинилхлорид называется *винипластом*. Винипласты имеют высокую механическую прочность и упругость, но сравнительно малопластичны. Винипласты стойки к воздействию почти всех минеральных кислот, щелочей и растворов солей. Их недостатками являются склонность к ползучести, низкая ударная вязкость, малая теплостойкость, резкая зависимость от температуры.

Винипласт выпускается в виде листов, прутков, труб. Винипластовые детали хорошо механически обрабатываются и хорошо свариваются. Из него изготавливают трубы для транспортировки воды, агрессивных жидкостей и газов, коррозионностойкие емкости, защитные покрытия для электропроводки, детали вентиляционных установок, теплообменников, шланги вакуумпроводов, защитные покрытия для металлических емкостей, изоляцию проводов и кабелей. Поливинилхлорид используют для получения пенопластов, линолеума, искусственной кожи, объемной тары, товаров бытовой химии, вибропоглощающих материалов в машиностроении и на всех видах транспорта, водо-, бензо- и антифризостойких трубок, прокладок и т. д.

*Фторопласты* (ГОСТ 21000-81, ГОСТ 10007-80Е, ГОСТ 14906-77, ГОСТ 25428-82) – полимеры фторпроизводных этиленового ряда. Фторопласты имеют прочность при растяжении 15-35 МПа, при изгибе 10-15 МПа; относительное удлинение при разрыве 250-350%.

Наиболее широкое распространение получил фторопласт-4, или поли-тетрафторэтилен (тефлон). Он имеет структурную формулу  $[\text{CF}_2-\text{CF}_2-]_n$ . Характеризуется высокой плотностью (2,1-2,3 г/см<sup>3</sup>), термо- и морозостойкостью. Интервал рабочих температур при эксплуатации изделий из фторопласта-4 составляет от -269 до +260°С. Пленка из него не охрупчивается даже в среде жидкого гелия.

Фторопласты широко применяются в электро- и радиотехнической промышленности, а также для изготовления химически стойких труб, кранов, мембран, насосов, подшипников, деталей медицинской техники, коррозионностойких конструкций, тепло- и морозостойких деталей (штулок, пластин, дисков, прокладок, сальников, клапанов), для облицовки внутренних поверхностей различных криогенных емкостей.

*Полиамиды* (ГОСТ 10589-87, ГОСТ 17648-83) включают группу известных термопластичных пластмасс (таких, как нейлон, капрон и др.). Макромолекула полиамида состоит из амидной  $-\text{NH}-\text{CO}$  и метиленовой  $-\text{CH}_2$  групп и имеет общий вид  $[-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)-]_n$ , где мети-

леновые группы повторяются от 2 до 100 раз. Ориентированные полиамиды характеризуются высокой прочностью на растяжение (более 400 МПа), ударопрочностью, способностью к поглощению вибрационных нагрузок. Они имеют низкий коэффициент трения и могут использоваться в качестве подшипников как без смазки, так и при применении смазочных материалов. Полиамиды используют для изготовления конструкционных и электроизоляционных изделий, эксплуатируемых при температурах от  $-60$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  (зубчатые передачи, уплотнительные устройства, втулки, муфты, подшипники скольжения, лопасти винтов, стойкие к действию щелочей, масел, жиров и углеводородов, технических изделий и товаров культурно-бытового назначения, антифрикционных покрытий металлов).

*Полиуретаны* (ТУ 6-05-221-479-79) – наиболее ценные и широко производимые промышленностью термопластичные полимеры. Полиуретаны содержат уретановую группу  $[-\text{NH}-\text{COO}-]_n$ . Они характеризуются высоким модулем упругости, износостойкостью, вязким коэффициентом трения, стойкостью к вибрациям, атмосферостойкостью, а также стойкостью к воздействию масла и бензина. Изделия из полиуретана можно эксплуатировать при понижении температуры до  $-60 \dots -70^{\circ}\text{C}$ . Волокна из полиуретана малогигроскопичны и имеют высокую химическую стойкость. Их используют для изготовления изоляции, фильтровальных и парашютных тканей.

*Стекло органическое* (плексиглас) (ГОСТ 9784-75Е, ГОСТ 10667-90Е, ГОСТ 15809-70Е, ГОСТ 17622-73Е) получают на основе сложных эфиров и метакриловой кислоты. Обычно применяют полиметилакрилат, имеющий структурную формулу  $[-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)-]_n$ .

Этот термопласт оптически прозрачен (светопрозрачность до 92%), имеет низкую плотность, высокую атмосферостойкость, стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, углеводородного топлива и смазок. Стекло органическое выпускается в виде листов толщиной до 25 мм. Его недостаток – низкая поверхностная твердость.

*Поликарбонат* (ТУ 6-06-68-89, ТУ 6-06-95-90) - термопластичный полимер на основе дифенилпропана, выпускаемый под названием дифлон. Поликарбонат характеризуется низкой водопоглощаемостью и газопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами, высокой жесткостью, теплостойкостью и химической стойкостью, не имеет запаха и вкуса, физиологически безвреден, бесцветен, прозрачен, хорошо окрашивается. Стоек к световому старению и дейст-

вию окислителей даже при нагреве до 120°C. Это один из наиболее ударопрочных термопластов, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала, заменяющего металлы. Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, корпуса, крышки, клапаны и другие детали, сосуды для транспортировки фруктовых соков, молока, вин и т.д. Его можно использовать в криогенной технике для работы в среде жидких газов.

Физико-механические свойства поликарбонатов улучшаются при введении в них армирующих волокон. Хорошо зарекомендовали себя наполненные стекловолокном полипропилен, полистирол и некоторые другие термопласты. Термопласты, армированные стекловолокном, имеют более высокие механические свойства и обеспечивают неизменность формы изделий в условиях повышенных температур. Производство таких термопластичных материалов с каждым годом растет на 25-30%. Они применяются при изготовлении самых различных деталей в электронной и электротехнической промышленности, оптическом и точном приборостроении, автомобилестроении, текстильном машиностроении и т.д.

#### **4.2.2. Терморреактивные пластмассы (реактопласты)**

Основу всякого реактопласта составляет химически затвердевающая терморреактивная смола – связующее вещество. Кроме того, в состав реактопластов входят наполнители, пластификаторы, отвердители, ускорители или замедлители и растворители. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы. В качестве порошковых наполнителей используют молотый кварц, тальк, графит, древесную муку, целлюлозу. К пластмассам с порошковыми наполнителями относятся: *фенопласты* (ГОСТ 5689-79) и *аминопласты* (ГОСТ 9359-80). Из него изготавливают несилловые конструкционные и электроизоляционные детали (рукоятки, детали приборов, кнопки и т. д.), различные вытяжные и формовочные штампы, корпуса сборочных и контрольных приспособлений, литейные модели и другую оснастку.

*Фенопласты* (бакелиты, феноло-формальдегидные смолы) изготавливаются в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.2.



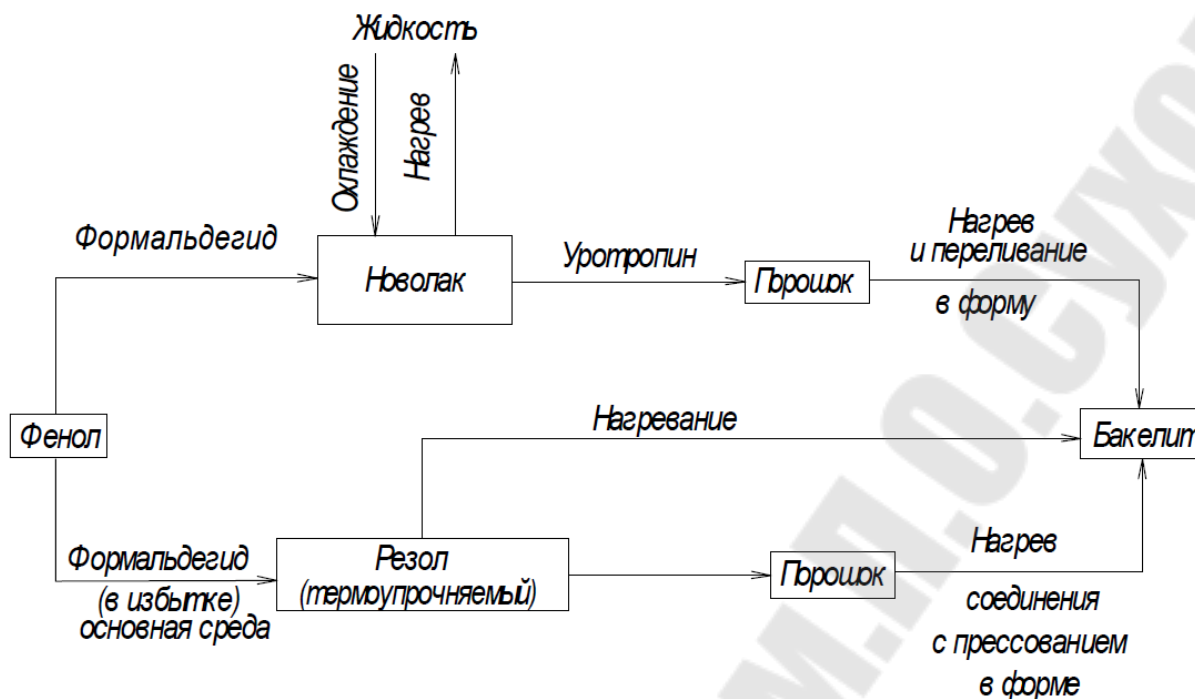


Рис. 4.2. Схема изготовления фенопластов

Фенопласты являются термоупрочняемыми пластмассами. Неупрочненные смолы получают при поликонденсации фенола с формальдегидом. Существует два основных типа феноло-формальдегидных смол: новолаки и резола.

Упрочнение термопластов в основном находится в интервале температур 140-180°C, но благодаря соответствующим добавкам кислот некоторые резола можно отвердить уже при 25°C и выше.

Упрочненные феноло-формальдегидные смолы носят название *бакелитов*. Эта пластмасса хорошо обрабатывается механически инструментами для обработки металла и может подвергаться полированию. Бакелит из новолака имеет большую термостойкость (100-150°C), чем бакелит из резола, но худшие диэлектрические свойства.

Бакелит трудногорюч, а после извлечения из пламени сразу гаснет. Горящий бакелит дает желтый цвет пламени, коптящий в зависимости от вида наполнителя. Остаток, извлеченный из пламени, твердый, разбухший, потрескавшийся и обугленный. В процессе горения выделяются фенол и формальдегид с характерным запахом. Бакелит стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, а также большинства органических растворителей.

Из бакелита изготавливают изделия галантереи (пуговицы, пепельницы), электротехнические элементы (вилки, розетки), корпуса

радио- и телефонных и аппаратов, детали стиральных машин, защитные шлемы, корпуса аккумуляторов, плиты, лаки, клеи.

*Аминопласты* являются термоупрочняемыми пластмассами. К ним относятся карбамидоформальдегидные смолы и меламиноформальдегидные смолы.

Неупрочненная смола получается при поликонденсации формальдегида с карбамидом (смола карбамидоформальдегидная) или меламином (смола меламиноформальдегидная). Эти смолы имеют реактивные группы, которые под влиянием нагрева (или кислотных катализаторов) способны к упрочнению (приобретают пространственную сетчатую структуру).

Упрочненные аминопласты твердые и жесткие. Их можно полировать и механически обрабатывать инструментами по металлу, они имеют хорошие электроизоляционные свойства, легко окрашиваются.

Теплостойкость упрочненных аминопластов около 100-120°C. Упрочненные аминопласты стойки к воздействию воды, кислот (в том числе серной и азотной), щелочей и органических растворителей. Для склеивания аминовых пластмасс можно применять фенолоформальдегидные или карбамидоформальдегидные клеи.

Из аминопластов изготавливают клеи для дерева, электротехнические детали (розетки, выключатели) и галантерею, тонкие покрытия для украшения, лаки (так называемые печные), пенистые материалы.

Реактопласты с волокнистыми наполнителями представляют собой композиции, состоящие из связующего (смолы) и волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (волокниты), асбеста (асбоволокниты), стекловолокна (стекловолокниты).

*Волокниты* применяют для изготовления деталей с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, работающих на изгиб и кручение (втулок, шкивов, маховиков и др.).

*Асбоволокниты* обладают хорошими фрикционными свойствами и теплостойкостью, но по водостойкости и диэлектрической проницаемости уступают пластмассам с порошковым наполнителем.

*Стекловолокниты* негорючи, стойки к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойки, имеют стабильные размеры. Некоторые марки стекловолокнитов применяются для изготовления силовых электротехнических деталей в машиностроении, а также крупногабаритных изделий простых форм (кузовов автомашин, лодок, корпусов приборов и т. п.). Стекловолокниты имеют высокие физико-механические характеристики и применяются для изготовления дета-

лей высокого класса точности и сложной конфигурации. Стекловолокниты могут работать при температурах от  $-60$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ , имеют прочность при разрыве 80-500 МПа.

В качестве связующих смол волокнитов и стекловолокнитов применяются полиэстеровые и эпоксидные смолы.

Механические свойства отвержденного продукта зависят от строения исходной смолы и способа ее отверждения. Изделие может быть гибким, эластичным или твердым и хрупким. Твердые изделия можно подвергать механической обработке инструментами по дереву, а также полировать.

Термическая стойкость под напряжением отвержденных смол лежит в пределах  $55-60^{\circ}\text{C}$ , а без нагрузки превышает  $150^{\circ}\text{C}$ . Отвержденные полиэстеры нерастворимы в органических кислотах, в ацетоне легко растрескиваются.

Из полиэстеров, упроченных стекловолокном, изготавливают спасательные лодки, части автомобилей, мебель, корпуса планеров и вертолетов, гофрированные плиты для крыш, плафоны ламп, мачты для антенн, лыжи и палки, удочки, защитные каски и т.п. В виде текучих смол полиэстеры применяют для заливки частей электронной аппаратуры, мумификации анатомических препаратов, изготовления лаков и т. п.

Пластик на основе бумаги – *гетинакс* (ГОСТ 2718-74) – применяют в качестве электроизоляционного материала, работающего длительно при температурах от  $-65$  до  $+105^{\circ}\text{C}$ , а также как конструкционный и декоративный материал. Гетинаксы широко применяют в электрических машинах, трансформаторах (в качестве высоковольтной изоляции) и других аппаратах, при производстве телефонной аппаратуры, в радиотехнике (для изготовления печатных схем). Из гетинакса изготавливают панели, щитки, прокладки, крышки, шайбы, малонагруженные изделия и т. д.

*Древесно-слоистые пластики* (ДСП) используют при изготовлении мебели, для внутренней облицовки пассажирских поездов, судов, самолетов, при строительстве - в качестве облицовочного материала.

ДСП обладают хорошими антифрикционными свойствами. В некоторых случаях они заменяют высокооловянистую бронзу, баббит, текстолит. Химическая стойкость ДСП не очень высока, но выше, чем у обычной древесины.

Теплостойкость ДСП достигает  $140^{\circ}\text{C}$ . Их недостатком является набухание, обусловленное поглощением воды.

В таблице 4.3 представлены свойства некоторых терморезактивных пластмасс.

Таблица 4.3

**Свойства некоторых терморезактивных пластмасс**

Вид пластмассы	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{\text{РАСТ}}$ , МПа	$\Delta T$ , °С	Области применения
Фенопласт	1,7	30	-60+140	Малонагруженные детали, корпуса
Аминопласт	1,8	80	-60+130	Детали осветительной аппаратуры, электротехнические и электроизоляционные детали, изделия бытового назначения
Волокнит	1,6	50	-60+200	Шкивы, маховики, втулки, диски, кожухи, детали с повышенными антифрикционными свойствами
Текстолит	1,3	95	-40+160	Шестерни, втулки, подшипники скольжения, конструкционные и электроизоляционные детали
Асботекстолит	1,6	90	-60+250	Тормозные и фрикционные устройства, лопатки ротационных бензонасосов, детали теплозащиты и теплоизоляции

Пластики на основе хлопчатобумажных тканей – *текстолиты* (ГОСТ 2910-74) – применяют для изготовления различных конструктивных деталей, электроизоляционного материала, вкладышей подшипников прокатного оборудования, прокладок, герметизирующих фланцевые соединения. Текстолитовые детали могут работать не только в воздушной среде, но и в масле, керосине или бензине и т.д. Текстолит производят в виде листов, плит, стержней и трубок. Температура эксплуатации изделий из текстолита от -60 до +60°С.

*Стеклотекстолитами* (ГОСТ 10292-74Е, ГОСТ 12652-74) называют слоистые пластики на основе тканых стекловолоконистых материалов. Они характеризуются высокой тепло- и хладостойкостью, стойкостью к действию окислителей и других химически активных реагентов, высокими механическими свойствами. Стеклотекстолиты применяют для изготовления крупно-габаритных изделий, радиотехнических и электроизоляционных деталей, длительное время работающих при температуре 200°С и кратковременно – при 250°С. Стеклопластики применяются для изготовления силовых изделий в раз-

личных отраслях техники (несущих деталей летательных аппаратов, кузовов и кабин машин, железнодорожных вагонов, корпусов лодок, судов и т. п.).

### 4.3. Резины

Резинотехнические изделия получают при специальной термической обработке (вулканизации) прессованных деталей из сырой резины, являющейся смесью каучука с серой и другими добавками (табл. 4.4).

Резина состоит из смеси каучука (основа), наполнителя (сажа, оксид кремния, оксид титана, мел, барит, тальк), мягчителя (канифоль, вазелин), противостарителя (парафин, воск) и элементов вулканизации (сера, оксид цинка).

Главным исходным компонентом резины, придающим ей высокие эластические свойства, является каучук. Каучуки бывают натуральные (НК) и синтетические (СК).

Натуральный каучук получают коагуляцией латекса (молочного сока) каучуконосных деревьев, растущих в Бразилии, Юго-Восточной Азии, на Малайском архипелаге. Синтетические каучуки (бутадиеновые, бутадиен-стирольные и др.) получают методами полимеризации.

Каучуки являются полимерами с линейной структурой. При вулканизации они превращаются в высокоэластичные редкосетчатые материалы – резины. Вулканизирующими добавками служат сера и другие вещества. С увеличением содержания вулканизатора (серы) сетчатая структура резины становится более частой и менее эластичной. При максимальном насыщении серой (до 30-50%) получают твердую резину (эбонит), при насыщении серой до 10-15 % – полутвердую резину. Обычно в резине содержится 5-8% S. Для ускорения вулканизации вводят ускорители, например оксид цинка.

Кроме серы в состав резин входят наполнители, пластификаторы, противостарители и красители.

Введение этих компонентов позволяет существенно менять специальные свойства резины, увеличивая ее износо-, морозо-, масло- и бензостойкость. Резиновые изделия часто армируют тканью или металлической сеткой. Для улучшения адгезии металлической арматуры к резине на поверхность металла наносят клеевую пленку.

Таблица 4.4

### Основные типы резин и характеристики каучуков

Вид каучука	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\delta$ после разрыва, %	$\Delta T$ , °С
<i>Общего назначения</i>					
Натуральный (НК)	0,91	29	650	32	-50+130
Бутадиеновый синтетический (СКБ)	0,91	17	470	60	-50+130
Изопреновый синтетический (СКИ)	0,91	30	700	28	-50+130
<i>Специального назначения (бензомаслостойкая, теплостойкая, теплохимическистойкая, морозостойкая)</i>					
Бутадиеннитрильный (СКН)	0,96	26	600	20	-40+170
Силоксановый (СКТ)	1,85	6	250	4	-70+300
Фторкаучук (СКФ)	1,85	17	200	8	-40+300
Бутадиенметилстирольный (СКМС) и бутадиенстирольный (СКС)	0,94	31	800	16	-80+130

Резина имеет высокие эластические свойства, высокую упругость и сопротивляемость разрыву. Кроме того, резина обладает малой плотностью, высокой стойкостью против истирания, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами.

Совокупность химических, физических и механических свойств позволяет использовать резиновые материалы для амортизации, демпфирования, уплотнения, герметизации, химической защиты деталей машин, при производстве тары для хранения масла и горючего, различных трубопроводов (шлангов), для изготовления покрышек и камер колес автотранспорта, декоративных изделий и т. д. В зависимости от условий эксплуатации различают резины *общего и специального назначения*. Резины общего назначения применяют для изготовления камер и шин, ремней, транспортных лент, рукавов, изоляции кабелей и проводов, производства товаров народного потребления и др. Из резин специального назначения различают *бензомаслостойкие, морозостойкие, теплостойкие, стойкие к действию агрессивных сред*. Нижней границей рабочих температур резин специального на-

значения является температура до  $-80^{\circ}\text{C}$ , резин общего назначения – до  $-35-50^{\circ}\text{C}$ .

На рисунке 4.3. показаны резинометаллические детали.

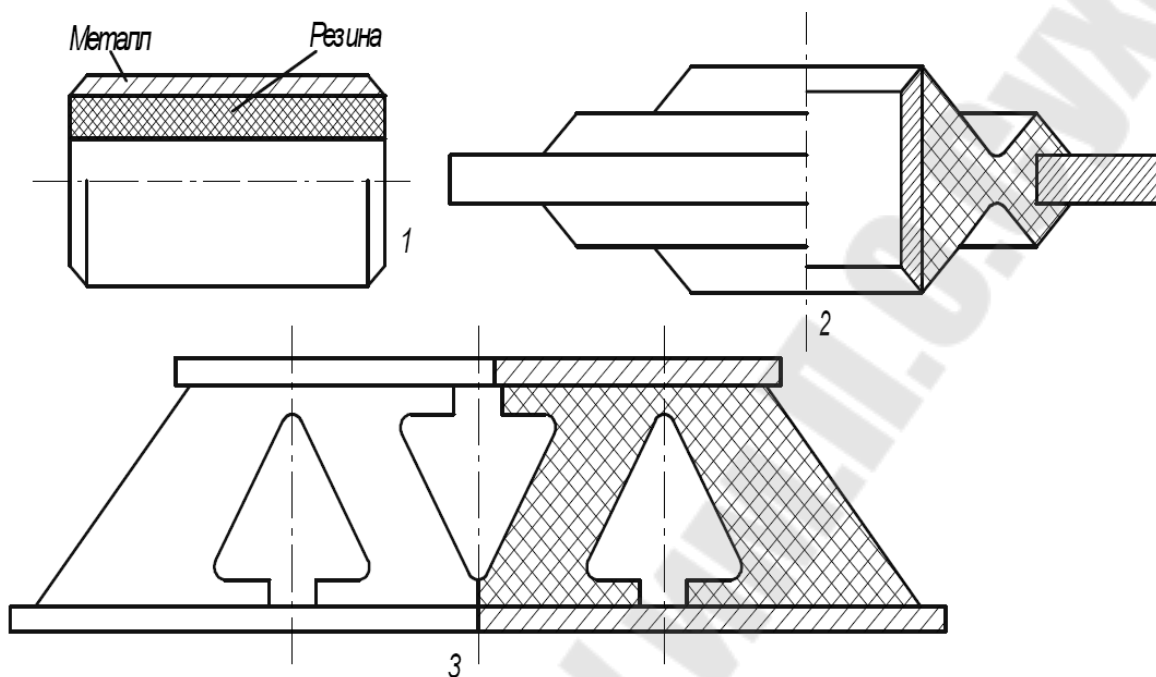


Рис. 4.3. Резинометаллические детали:  
1 – подшипник, 2 – пластинчатый амортизатор,  
3 – амортизатор «ферма»

В последнее время остро стоит вопрос об очистке территории наших городов от свалок старой резиновой продукции, которая в ходе длительного, иногда в течение десятков лет, хранения выделяет в атмосферу и в почву значительное количество вредных химических соединений.

На автопредприятиях страны, шиноремонтных заводах, в портах находятся десятки миллионов вышедших из строя автомобильных шин. Их утилизация практически не осуществляется, поскольку при сжигании в атмосферу выделяется значительное количество экологически вредных веществ, а стоимость механической утилизации весьма высока. В то же время продукт вторичной переработки шин – резиновая крошка различной дисперсности применяется в различных отраслях техники: при строительстве дорог, в качестве тепло- и звукоизоляторов и т. д. Особенно широко резиновая крошка используется в странах Западной Европы и Юго-Восточной Азии, где она производится в основном методом механического измельчения.

#### 4.4. Клеящие материалы

Клеями называют сложные вещества на основе полимеров, способные при затвердевании образовывать прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам. По сравнению с другими видами соединений (клепкой, сваркой, механическим креплением) клеевые соединения имеют ряд преимуществ. Клеи позволяют соединять разнородные материалы (металл, керамику, пластмассу, дерево) в различных сочетаниях. Клеевые швы атмосферостойкие, не подвержены коррозии, позволяют обеспечивать герметичность соединений. Масса конструкции при клеевой сборке почти не увеличивается, отсутствуют снижающие прочность и являющиеся концентраторами напряжений отверстия под болты, заклепки, гвозди. Во многих случаях клеевое соединение металлических и неметаллических материалов является единственно возможным решением, обеспечивающим высокую прочность конструкции. Клеи могут выдерживать высокие и низкие температуры, сохраняя достаточную прочность соединения. Свойства клеевых соединений представлены в таблице 4.5.

Недостатки клеевых соединений – сравнительно невысокая теплостойкость при длительной эксплуатации и низкая прочность при несимметричном нагружении и неравномерном отрыве.

Клеи выпускаются в виде пленок, паст и жидкостей. По назначению клеи можно разделить на группы.

Таблица 4.5

Свойства клеевого соединения

Рабочая температура, °С	Температура отверждения, °С	$\tau_B$ , МПа	$S_{CT}$ , Н/м
-60+80	120	40-60	6-10
-130+250	175-200	25-40	2-5

*Высокопрочные пленочные клеи* конструкционного назначения для склеивания силовых сотовых и слоистых конструкций из металлов и полимерных композиционных материалов (ПКМ). Такие клеи позволяют создавать высокопрочные соединения с эластичным клеевым швом, обладающим стойкостью к распространению усталостной трещины, к воздействию агрессивных сред. Используются в авиации, космонавтике и других отраслях машиностроения.

Высокая прочность таких клеев позволяет использовать их в качестве полимерной матрицы при создании препрегов на основе стек-



ло-, угле- и ор- ганонаполнителей. В результате за одну технологическую операцию можно изготавливать готовые сотовые изделия из ПКМ, что сокращает время их производства в два-три раза по сравнению с обычной технологией.

*Высокопрочные пастообразные клеи* холодного отверждения с регулируемым уровнем прочности и эластичности для склеивания металлов и различных неметаллических материалов в клеевых и комбинированных (клееклепаных, клеерезьбовых и др.) соединениях, работающих в интервале температур от  $-60$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ .

Прочность таких клеевых соединений на сдвиг составляет 25-35 МПа, относительное удлинение при сдвиге – от 50 до 125%. Клеевые соединения обладают эластичностью, высокой механической прочностью, водо- и тропикостойкостью.

*Жидкие клеи* горячего отверждения применяют для склеивания и выполнения клеесварных соединений металлов методом контактной точечной сварки по слою неотвержденного клея или последующей заливкой в межшовное пространство в изделиях, длительно работающих при температурах от  $-60$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . После воздействия на клеевые соединения условий тропического климата, в течение 10 лет их физико-механические свойства не изменяются.

При использовании этих клеев статическая прочность клеесварных соединений равна 1000-1500 кг.

*Клеи, обладающие специальными свойствами* и используемые при изготовлении приборов и систем управления. Этот вид клеев состоит из четырех групп.

К первой группе относятся электропроводные клеи для скрепления радиоэлементов. Они не содержат драгоценных металлов и обладают высокой электропроводностью ( $\rho=10^{-4}\dots 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ ).

Клеевые соединения выдерживают температуру от  $-60$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ , а их прочность зависит от количества наполнителя и составляет при испытании на сдвиг от 5 до 10 МПа.

Во вторую группу входят теплопроводные клеи, предназначенные для изготовления приборной техники имеющие наряду с высокими электроизоляционными свойствами теплопроводность  $\lambda = 2,5\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

К третьей группе относятся вакуум-плотные клеи, обеспечивающие герметичность соединений в вакууме  $1,33\cdot 10^{-6}\text{ Па}$  и обладающие работоспособностью при температурах от  $-60$  до  $+140^{\circ}\text{C}$ .

Четвертая группа включает оптически прозрачные клеи с коэффициентом преломления от 1,4 до 1,46 для оптической техники, соединения световодов в линиях оптической связи.

Работоспособность клеевых соединений зависит, прежде всего, от процессов адгезии и когезии. Адгезия характеризует прочность сцепления клеевой пленки со склеиваемой поверхностью, когезия – прочность собственно клеевого слоя.

Для приготовления клеев используют термопластичные или термореактивные полимеры. Клеи на основе термопластичных полимеров дают менее прочные соединения и используются ограниченно, обычно для склеивания материалов, не подвергающихся тепловому воздействию (бумаги, картона, тканей). С повышением температуры клеевой слой размягчается, и склеенные поверхности разъединяются. Клеи на основе термореактивных полимеров, содержащие также отвердители и ускорители процессов отверждения, наполнители и пластификаторы, дают более прочные соединения. Клеи этой группы могут быть холодного и горячего отверждения. Клеи холодного отверждения смешиваются с отвердителями и ускорителями непосредственно перед процессом склеивания. Клеи горячего отверждения приготавливаются на заводе-изготовителе, поставляются потребителю в готовом виде и могут храниться несколько месяцев.

К группе клеев на основе термореактивных смол относятся фенолоформальдегидные клеи. При наличии в их составе ускорителей процесса (например, сульфоконтакта) эти клеи отверждаются даже при комнатной температуре за несколько часов. К таким клеевым составам относятся клеи Б-3, Ф-9 и др. В тех случаях, когда применение ускорителя, обладающего кислотными свойствами, может привести к частичной деструкции склеиваемого материала (например, древесины, фанеры), рекомендуется вместо фенолоформальдегидного клея применять резорциноформальдегидный клей, например ФР-12.

Для склеивания изделий из древесины, работающих в условиях умеренной влажности, применяют клеи на основе водных растворов мочевиноформальдегидных смол, например клей КМ-12. В качестве ускорителей в этих клеях холодного отверждения используются хлорид аммония или хлорид цинка, а также слабые органические кислоты. Фенолоформальдегидные клеевые соединения водостойки.

На базе феноло-формальдегидных смол создана гамма универсальных клеев. В их число входят следующие: клей БФ (фенолоформальдегидная смола, модифицированная бутваром); клей ВК-32-

ЭМ (продукт взаимодействия феноло-формальдегидной и эпоксидной смол); клей ВК-32-200 (фенолоформальдегидная смола и синтетический каучук); клей ВС-350 (фенолоформальдегидная смола, полиацеталь, полисилоксан) и др.

Из перечисленных групп клеев наибольшую прочность склейки до температур 140-150°C обеспечивают фенолоформальдегидно-эпоксидные клеи.

Наиболее теплостойкими и достаточно прочными являются соединения, обеспечиваемые клеями ВК-32-250, ВС-350. Эти соединения могут длительное время работать при температурах 250-300°C.

Из клеев на основе терморезистивных полимеров наиболее широкое применение находят клеи на основе эпоксидных смол. Их применяют для склеивания различных металлов, металлических и неметаллических материалов. Клеи на эпоксидной основе могут работать в широком температурном интервале. Отдельные марки таких клеев выдерживают воздействие температур от -253 до +800 ... +1000°C. Клеи на эпоксидной основе длительно сохраняют прочность в условиях эксплуатации, обеспечивают вакуумную плотность соединений и стойкость к циклическому температурному воздействию. Их существенными преимуществами являются низкая (до 2 %) усадка при отверждении, высокая адгезия к большинству конструкционных материалов и небольшой объем газовыделений в вакууме. Эти свойства позволяют широко использовать клеи на основе эпоксидных смол при склеивании холодильного и криогенного оборудования. Эпоксидные клеи холодного отверждения применяют для склеивания древесины, многих пластмасс, керамики и резины с металлом.

Эпоксидные клеи горячего отверждения применяют для склеивания металлических конструкций и изделий из стеклопластика.

Эпоксидные клеи с наполнителем применяют в качестве шпатлевки, устраняющей дефекты металлического литья, а также неровности металлических, керамических и деревянных изделий.

По внешнему виду клеи обычно могут быть в жидком состоянии, в виде паст или пленок (фольг), часто армированных полиамидной тканью или другим синтетическим материалом.

По внешнему виду клеи бывают жидкими, пастообразными, пленочными. Широкое распространение получили пленочные клеи на эпоксидной основе, использование которых позволяет получать не только прочные клеевые соединения, но и дает существенные технологические преимущества. При применении пленочных клеев часто

используют армирующие материалы – полиамидные, стеклянные и другие синтетические ткани.

Кроме клеев на эпоксидной основе, широко используют кремнийорганические, алюмохромфосфатные клеевые композиции, а также полиуретановые (ПУ-2; ВК-20), резиновые и некоторые другие клеи. Полиуретановая клеевая пленка газонепроницаемая, масло-, бензо- и водостойкая. Она обладает высокой адгезией и морозостойкостью, поэтому полиуретановые клеи используются также в качестве герметиков.

Для склеивания резиновых изделий между собой, а также металла с резиной применяются резиновые (каучуковые) клеи 88, Б-10, КР-5-18, лейконат. Резиновый клей удобен для употребления тем, что он вулканизируется на холоде и это клеевое соединение обладает удовлетворительной прочностью и мало набухает в масле и бензине.

К числу наиболее распространенных герметиков для металлических изделий относится тиоколовый каучук (тиокол). Он вулканизируется при комнатной температуре. Вулканизатором в большинстве случаев является пероксид марганца, а активатором – дифенилгуанидин. Отвержденная пленка масло-, водо- и бензостойкая, выдерживает длительное время при контакте с кислородом воздуха и сохраняет высокую прочность при температуре до 130°C.

Существенным недостатком тиоколового каучука является его низкая адгезия к металлу, поэтому при его использовании требуется создавать подложку для резинового клея. Этот недостаток отсутствует у жидкого тиокола (герметик ВТУР), в состав которого входит диизоцианат.

Для герметизации отсеков ракет, самолетов и другой техники, работающей при температурах 150-250°C и не соприкасающейся с маслами и топливом, применяются полисилоксаны с отвердителями, обеспечивающими их отверждение при комнатной температуре (кремний- и оловоорганические соединения). Существенным недостатком этих герметиков является малая адгезия к металлу, даже в случае нанесения специального подслоя.

Для отсеков, работающих при 150-250°C и соприкасающихся с маслом и топливом, применяются фторорганические герметики. Полисилоксановые и фторорганические герметизирующие пленки не разрушаются при длительном воздействии на них кислорода и озона; они сохраняют эластичность при низких температурах (до -60°C); имеют высокую водостойкость.

Технологически удобны для использования в качестве герметика растворы феноло-формальдегидных смол, совмещенных с нитрильным каучуком, например ВГК-18. Этот герметик не требуется вулканизировать: он обладает удовлетворительной адгезией к металлическим поверхностям, а герметизирующая пленка сохраняет прочность до 100°C, обеспечивает достаточную прочность и обладает масло- и бензостойкостью.

На основе жидких полиуретановых, карбоксилатных, фторированных каучуков разработан способ герметизации вакуумированных узлов (пропускных) в криогенных условиях. В радиотехнике применяют галлиевые клеи (клеи-припой). Соединение, полученное с помощью такого клея, имеет хорошую тепло- и электропроводность, достаточно высокую прочность и эксплуатационную стабильность в интервале температур от -196 до +800°C. Склеиваемые поверхности должны быть механически очищены, например наждачной бумагой, пескоструйной обработкой, и обезжирены (спиртом, ацетоном). Толщина пленки клея должна составлять 0,1-0,6 мм. Меньшая толщина грозит нарушением сплошности пленки, большая – уменьшает прочность соединения.

## ТЕМА 5 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Методы порошковой металлургии позволяют создавать принципиально новые материалы, которые сложно или даже невозможно получить другими способами. С помощью этих методов можно получить многослойные композиции, различные комбинации металлических и неметаллических компонентов, пористые материалы с широким диапазоном контролируемой пористости, изделия из тугоплавких металлов и т.д. Порошковая металлургия дает возможность свести к минимуму отходы металла в стружку, упростить технологию изготовления деталей и снизить трудоемкость их производства.

*Технологический процесс изготовления изделий из порошков* включает получение порошков, подготовку шихты, формование, спекание, горячее прессование и штамповку. Иногда применяют дополнительную обработку, состоящую из пропитки деталей смазками, термической и химико-термической обработки, калибровки и обработки резанием.

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

Металлические порошки получают физико-механическими и химико-металлургическими способами. В основе физико-механических способов получения порошков лежат методы механического измельчения металлов в твердом и жидком состояниях. К ним относятся дробление и размол стружки в мельницах, распыление расплавленного металла струей сжатого воздуха, газа или жидкости, грануляция при литье расплавленного металла в жидкость и пр.

К химико-металлургическим способам относятся способы восстановления металлов из оксидов, электролитическое осаждение металлов из водных растворов солей, термическая диссоциация карбонильных соединений металлов.

При формовании заготовок из порошков определенного химического состава прессованием им придают форму и размеры готовых деталей, после чего направляют на спекание. При спекании непрочные прессованные заготовки превращаются в прочное спеченное тело со свойствами, приближающимися к свойствам беспористого компактного материала. Температура спекания деталей из конструкционных материалов на основе железа с добавками графита, никеля и дру-

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

Термической обработке порошковых деталей присущи некоторые специфические особенности. Пористость повышает окисляемость порошковых материалов, вследствие чего их нагрев целесообразно проводить в защитной атмосфере. Поры, заполненные газом, снижают теплопроводность, что ухудшает прокаливаемость пористых материалов по сравнению с компактными.

Для пористых деталей целесообразно применение закалки с резким охлаждением в струе воды или с энергичным перемешиванием для ускорения срыва паровой рубашки, затрудняющей охлаждение. После закалки детали должны обязательно просушиваться до полного удаления влаги из пор.

В ряде случаев дополнительно проводят химико-термическую обработку деталей из порошковых материалов. Цементацию и нитроцементацию применяют для повышения твердости и износостойкости поверхностного слоя. Азотирование позволяет получать высокую твердость, усталостную прочность и коррозионную стойкость деталей.

Сульфидирование применяется с целью уменьшения коэффициента трения для повышения износостойкости и твердости железных и железграфитовых изделий. Наиболее простой способ сульфидирования – пропитка серой путем погружения пористых изделий в расплавленную серу при 140-160°C (выдержка 10-15 мин) с последующим нагревом до 400-500°C в герметизированной печи с азотводородной атмосферой.

Оксидирование обработкой паром применяется для повышения износостойкости и коррозионной стойкости порошковых деталей на железной основе. Обычно используется обработка паром при 550°C в течение 1 ч с последующим охлаждением в масле. При взаимодействии паров воды с железом на поверхности деталей и на поверхности открытых пор образуется прочная коррозионная пленка.

### 5.1. Конструкционные порошковые материалы

Конструкционные детали являются наиболее распространенным видом продукции порошковой металлургии. Учитывая почти полное отсутствие отходов, они имеют минимальную стоимость и трудоемкость. Различают конструкционные *порошковые материалы общего назначения*, заменяющие обычные углеродистые и легированные стали, чугуны и цветные металлы, и материалы, *обладающие специальными свойствами* – высокой износостойкостью, твердостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, специфическими магнитными и электрическими характеристиками. В зависимости от условий нагружения различают мало-, средне- и тяжело нагруженные детали, которые, в свою очередь, делятся на тяжело нагруженные статическими и динамическими усилиями.

Чем выше требования по прочности, тем меньше должна быть пористость металла. Порошковые детали делятся на четыре группы по плотности (пористости).

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

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

С увеличением плотности одновременно возрастают пластичность и ударная вязкость. Изменяя пористость, можно регулировать плотность и механические свойства, подбирать материалы с заданным уровнем свойств для конкретных условий работы изделий.

Порошковые стали по механическим свойствам могут не уступать литым и кованым сталям соответствующего состава. Так, мартенситностареющие стали, благодаря возможности повышения содержания титана до 2-3%, имеют  $\sigma$  до 2000 МПа.

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



Перспективно использование порошков титана и его сплавов для изготовления тяжело нагруженных деталей. Высокие механические свойства порошковых изделий на основе титана ( $\sigma_{в} = 650\text{--}900$  МПа,  $\gamma = 8\text{--}16\%$ ) позволили применить их для изготовления шатунов автомобильных двигателей. Это дало возможность существенно уменьшить массу, снизить инерционные силы и повысить мощность двигателя. Из порошков титана организовано серийное производство таких деталей, как втулки, крышки, трубы для химического и пищевого машиностроения, приборостроения и др.

#### **5.1.1. Порошковые материалы на основе железа**

83% общего объема производства составляют порошки на основе железа. Из них 80% расходуется на производство изделий, 20% - на обмазку электродов для сварки.

Технологии железных порошков:

– восстановление (из руды, прокатной окалины, железорудного концентрата); марки порошков – ПЖВ3.315.15, NC100.24, ПЖВ2.160.24;

– распыление чугуна сжатым воздухом; марки порошка – ПЖРВ3.200.26, ПЖРВ4.200.26, ПЖРВ2.200.26;

– распыление стали водой высокого давления; порошки марок WPL200, ПЖР3.200.28, ASC100.29, ABC100.30.

*Гомогенно легированные порошки*, получаемые распылением, применяют для изготовления тяжело нагруженных деталей методом горячей штамповки. Ввиду низкой уплотняемости и прочности поковок порошки этого типа редко используют для получения деталей методом прессования с последующим спеканием. Потребление таких порошков за рубежом составляет ~5,5 тыс. т/год, что связано с их высокой стоимостью. Наибольший спрос на *гомогенно легированные порошки* конструкционных сталей отмечается в США, где метод горячейковки пористых заготовок получил широкое распространение в автомобильной промышленности.

Большинство промышленных процессов получения гомогенно легированных порошков основано на использовании в качестве распыляющей среды воды высокого давления.

*Частично легированные порошки* предназначены для изготовления конструкционных средненагруженных деталей традиционным и наиболее широко используемым методом порошковой металлургии: прессованием деталей необходимой конфигурации с последующим спеканием. Частично легированные порошки сохраняют хорошую

технологичность исходного железного порошка (высокую уплотняемость и прочность прессовок) и не склонны к макросегрегации легирующих добавок в процессе транспортировки и переработки, что обеспечивает получение высокоточных порошковых изделий со стабильными размерами и эксплуатационными свойствами в условиях крупносерийного производства.

В связи с высокой технологичностью частичнолегированных порошков их потребление непрерывно растет. Проводятся работы по расширению их марочного состава. В качестве легирующих добавок в них вводят никель, медь, молибден и фосфор.

Существенным резервом повышения эксплуатационных характеристики порошковых деталей из частичнолегированных порошков являются термическая и химико-термическая обработки. Так, применение закалки и отпуска приводит к повышению прочности в 1,5...2 раза при сохранении удовлетворительного уровня пластичности и ударной вязкости.

Перспективное направление в порошковой металлургии – разработка азотсодержащих коррозионностойких сталей. Преимуществом этих материалов является легирование азотом, что позволяет снизить содержание металлических легирующих элементов. Азот в качестве упрочнителя сталей и сплавов эффективен как в твердом растворе, так и в виде нитридов.

*Порошковые стали.* Основные направления улучшения эксплуатационных характеристик деталей из порошковых сталей – повышение плотности изделий за счет легирования металлической матрицы, термообработка.

Каждый из этих методов имеет недостатки:

– в промышленных условиях недостижимы высокие давления прессования;

– использование легирующих добавок часто приводит к снижению точности конечных размеров изделий и увеличению стоимости продукции;

– термообработка не нашла широкого распространения из-за несовпадения оптимальных режимов для традиционных и порошковых сталей и невысокой ее эффективности при повышенной пористости.

В принятых методах повышения плотности на практике используют два подхода: механический и химический. Наиболее просто повысить давление прессования, но в промышленности оно ограничено и не превышает 800 МПа, при этом плотность составляет порядка

7,1 г/см<sup>3</sup>. Порошки улучшенной прессуемости, например, марки ABC100.30, не нашли широкого применения из-за высокой стоимости. Себестоимость продукции, изготовленной по технологии, включающей допрессовку, увеличивается примерно на 40%. Однако при получении изделий с повышенной прочностью двойное прессование и спекание оправдывают себя.

### **5.2. Антифрикционные порошковые материалы**

Для изготовления подшипников скольжения, уплотнений, подпятников наряду с литыми сплавами (бронзы, баббиты и чугуны) используют антифрикционные материалы, изготовленные методом порошковой металлургии. Они создаются на основе меди или железа и содержат вещества типа твердых смазок (графит, сульфиды и др.), что обеспечивает им заданные механические и эксплуатационные свойства.

Антифрикционные порошковые материалы характеризуются низким коэффициентом трения, хорошей износостойкостью, способностью легко прирабатываться к валу и выдерживать значительные нагрузки. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными антифрикционными материалами. Их износостойкость в несколько раз выше, чем у бронз и баббитов. Они работают при более высоких скоростях и давлениях. Наличие в структуре пористости, регулируемой в широких пределах (до 35 %), позволяет их предварительно пропитывать смазочными маслами. Во время работы по мере нагревания масло, удерживаемое в порах и мельчайших каналах материала капиллярными силами, постепенно вытесняется наружу и образует смазочную пленку на рабочей поверхности. При остановке и последующем охлаждении подшипника масло частично всасывается обратно в поры. Поэтому пористые подшипники могут работать длительное время без дополнительной смазки. Эффект самосмазываемости в пропитанных маслом пористых подшипниках без подвода смазки извне может сохраняться в течение 3000-5000 ч.

Композиционные антифрикционные порошковые материалы позволяют иметь равномерно распределенные включения из веществ, играющих роль твердой смазки. К таким веществам относятся графит, сульфиды, пластмассы и некоторые другие соединения. Такие материалы имеют сравнительно низкий коэффициент трения при работе без жидкой смазки (в режиме сухого трения). Сочетание повышенных антифрикционных свойств твердых смазок и пластмасс со свойствами металлов позволяет получать материалы, способные работать в воде,

агрессивных жидкостях, бензине, различных газовых средах, в вакууме, а также в условиях высоких и низких температур.

Порошковые антифрикционные материалы могут представлять собой каркасные конструкции, в которых каркас выполнен из прочного материала, а промежутки заполнены более мягким материалом. Можно, наоборот, иметь мягкую матрицу с равномерно распределенными твердыми включениями разной степени дисперсности, повышающими работоспособность подшипников. Эти особенности позволяют осуществлять направленное регулирование свойств порошковых антифрикционных материалов применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Внедрение порошковых подшипников скольжения повышает надежность и долговечность работающего оборудования, снижает трудоемкость процесса их изготовления, позволяет уменьшить отходы металла в стружку, обеспечивает экономию дефицитных цветных металлов и сплавов.

### **5.3. Фрикционные порошковые материалы**

Порошковые фрикционные материалы предназначены для работы в различных тормозных и передаточных узлах автомобилей, гусеничных машин, дорожных и строительных механизмов, самолетов, станков, прессов и т.п. Фрикционные элементы из порошковых материалов изготавливают в виде дисков, секторных накладок и колодок различной конфигурации. Применяют порошковые фрикционные материалы на основе меди и на основе железа.

Все фрикционные материалы в зависимости от условий работы делятся на 2 группы:

- материалы, работающие в условиях сухого трения;
- материалы, работающие в масле.

Порошковые материалы на основе оловянистых и алюминиевых бронз, содержащие свинец, графит и железо, предназначены преимущественно для работы в условиях трения со среднеуглеродистыми сталями с твердостью HRC 40-45 при давлении до 35 МПа и скорости скольжения до 50 м/с. При меньших давлениях и скоростях до 5 м/с используют металлопластмассовые материалы.

Порошковые материалы на основе железа, содержащие добавки меди, графита, оксида кремния, асбеста, сульфата бария, предназначены для работы в условиях сухого трения при давлениях до 300 МПа и скоростях до 60 м/с в паре с чугуном либо легированной сталью в

тормозных устройствах различной конструкции – дисковых, колодочных, ленточных тормозах.

В сравнении с асбофрикционными материалами порошковые материалы обладают более высокими значениями термо- и износостойкости (в 2-4 раза), а в некоторых случаях, например при работе с легированным чугуном, и более высоким (на 15-25 %) коэффициентом трения.

#### **5.4. Пористые фильтрующие элементы**

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

При создании современной техники необходимо стремиться к использованию легких материалов, обладающих высокими физико-механическими характеристиками. Материаловеды всего мира пытаются найти вторую, третью структуры вещества, позволяющие известным материалам придать новые свойства.

В настоящее время одним из перспективных направлений материаловедения является создание *пористых металлических и неметаллических материалов*.

Область их использования весьма широка: эти материалы при малом удельном весе обладают высокой жесткостью, прочностью и высокими демпфирующими способностями; обладая развитой внутренней поверхностью, они могут быть использованы для выполнения и интенсификации различных физико-химических и электрохимических процессов, создания фильтров и др.

Развитая внутренняя поверхность пористых материалов позволяет осуществлять с высокой интенсивностью процессы, обычная скорость протекания которых мала. Использование пористых материалов для жидкости и газа позволяет уменьшить ограничения, связанные с низкой диффузией реагентов. В системах с проточными пористыми электродами без применения специальных селективных мембран и диафрагм могут быть разделены электродные продукты, продукты абсорбции и десорбции путем отсасывания их через поры. Пористые материалы обеспечивают проведение физико-химических процессов в невесомости. Выполнение охлаждения стенок ракетных

двигателей из пористых материалов, по которым в пограничный слой потока горячего газа подается охладитель, является одним из перспективных и наиболее эффективных способов гидродинамической защиты. Из пористых материалов выполняются автомобильные бамперы, которые при столкновении с препятствием способны разрушаясь гасить энергию удара. При заполнении топливных баков пористым материалом полезный объем бака снижается на 5...7%, но в случае аварии такая конструкция не позволяет произойти взрыву топлива, а способствует его постепенному медленному выгоранию.

Металлические пористые материалы изготавливаются спеканием в водородной среде свободно насыпанного в форму металлического порошка (свободное спекание); спеканием в водородной среде нанесенного на сетчатую или перфорированную ленту водного шлама из металлического порошка (шламовое спекание); спеканием в водородной среде металлического порошка, уплотненного между валками, с порообразующим агентом или без него (валковое спекание); прессованием металлического порошка с порообразующим агентом с последующим их спеканием в водородной среде. Свободное спекание дает высокую пористость 50...90%, однако получаемые при этом пористые материалы недостаточно прочны и обладают значительным электрическим сопротивлением. Использование в качестве каркаса перфорированных пластинок или сеток увеличивает прочность, укрепляет связи частиц порошка и ослабляет внутреннее сопротивление. Шламовое спекание применяется для нанесения пористой массы на гладкие пластины, в этом случае порошок сохраняется в виде суспензии и может использоваться пороноситель. Валковое спекание служит для получения требуемых изделий в больших количествах, на пористость в значительной степени оказывает влияние диаметр и скорость валков; при равномерном распределении порошка между валками получают изделия с однородным распределением пор при пористости 60%. Прессование из порошка с добавкой порообразующих агентов в специальных формах и последующее спекание в водородной или другой нейтральной среде используется при изготовлении топливных элементов, абсорберов, десорберов и др.

Высокопористые порошковые металлические материалы благодаря жесткому пространственному каркасу имеют более высокую прочность. Они выдерживают резкие колебания температур, легко обрабатываются, свариваются и паяются, обеспечивают необходимую коррозионную стойкость, жаростойкость, теплопроводность. Вслед-

ствии высокой пористости они имеют хорошую проницаемость для жидкостей и газов при достаточно тонкой фильтрации (до 30 мкм). Эти материалы легко регенерируются и при этом почти полностью восстанавливают свои первоначальные свойства. Они не засоряют фильтрующиеся жидкости или газы материалами фильтра.

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

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

Применение порошковых материалов позволяет увеличить срок службы насосов, двигателей и других агрегатов, работающих на очищенных жидкостях. С их помощью повышается эффективность химических процессов и улучшается качество вакуумной продукции, создаются предпосылки для получения материалов с новыми свойствами.

## ТЕМА 6 СИНТЕТИЧЕСКИЕ СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

### 6.1. Синтетические сверхтвердые материалы

К сверхтвердым материалам (СТМ) относятся четыре вещества: *кубический алмаз, гексагональный алмаз или лонсдейлит, кубическая и вюрцитоподобная модификации нитрида бора.*

*Алмаз.* Поликристаллические материалы на основе алмаза по физико-механическим свойствам существенно отличаются от монокристаллов. Для них характерна изотропия свойств, высокая износостойкость, поликристаллы значительно превосходят монокристаллы по трещиностойкости (ударной вязкости).

Поликристаллические СТМ (ПСТМ) на основе алмаза делятся на 4 групп:

– СТМ, получаемые при высоких давлениях и температурах путем превращения графита в алмаз в присутствии специально вводимых металлов или сплавов-катализаторов. К этой группе относятся поликристаллы типа «баллас» (АСБ) и «карбонадо» (АСПК). Синтетические балласы и карбонадо имеют природные поликристаллические аналоги;

– ПСТМ, получаемые путем спекания алмазных порошков в условиях высоких статических давлений и температур. При реализации этого метода получают поликристаллы с повышенной термостойкостью. Однако этот метод требует для своей реализации значительно более высоких давлений;

– ПСТМ, получаемые при высоких статических давлениях и температурах на подложке или в обойме из твердого сплава или стали;

– ПСТМ, получаемые методом спекания алмазных порошков при более низких давлениях (до 1,9 ГПа) в присутствии связующего материала.

Поликристаллы представляют собой композиционный материал, состоящий из зерен алмазной фазы, металлокерамической связки и остаточного непрореагированного графита. Состав связки определяется сплавом-катализатором. Поскольку поликристаллический алмаз представляет собой композиционный материал, то его механические свойства зависят от свойств алмазного наполнителя, прочностных свойств металлокерамической связки и процессов взаимодействия на границе алмаз-связка.



Синтез карбонадо проводят в камерах высокого давления типа «тороид» при давлении 8 ГПа из графита МГОСЧ. Температура синтеза составляет 1800...2000 °С, масса получаемых поликристаллов – 0,8...1,0 карат. В качестве катализаторов используют сплавы на основе никеля. Полученные поликристаллы дробят, рассеивают на фракции, проводят классификацию на вибростоле, химическую обработку и испытание на прочность по ГОСТ 9206-80.

Инструменты из карбонадо применяются в станкостроении, автомобильном и сельскохозяйственном машиностроении, авиастроении, для лезвийной обработки цветных металлов, титановых сплавов, выглаживания сырых и закаленных сталей. Из балласа и карбонадо изготавливают абразивный инструмент и абразивную пасту, волокнистые резцы, выглаживатели.

Спеканием смеси микропорошков синтетических и природных алмазов получают плотные поликристаллические образования алмаза в виде цилиндров диаметром 3...4,5 мм и высотой 4 мм с мелкозернистой структурой – СВ и дисмит. Их временное сопротивление при одноосном растяжении достигает 5000 МПа. Алмазы марки СВ предназначены для буровых коронок и долот, а также пил, применяемых при резке неметаллических материалов. Дисмит применяют для изготовления горнобурового инструмента, а также режущего инструмента (резцов, сверл и др.), используемого при обработке цветных металлов и сплавов, пластмасс, стеклопластиков.

Наиболее значительной областью применения разработанных видов поликристаллов является их использование для изготовления волокон, в том числе для замены натуральных алмазов, а также изготовление проводок с диаметром отверстия 3...8 мм для волочильных проволочных станков и станков для изготовления металлокорда.

Еще одним направлением применения разработанных алмазных поликристаллов является изготовление из них струеформируемых сопел и насадок, которые используются для газо- и жидкостноабразивной резки и обработки различных материалов (металлы, керамика, различные горные породы и т.п.). Обработка изделий происходит за счет воздействия абразивных частиц (кварцевый песок), которые с большой скоростью подаются через сопло в газовой или жидкостной струе. С помощью подобных установок возможна:

– резка различных материалов при заготовительных операциях, в особенности там, где огневая резка принципиально не применяется (резка органосодержащих композиционных материалов, например,

для утилизации военной техники), либо там, где нагрев разрезаемого материала нежелателен;

– очистка внутренних поверхностей трубопроводов различных теплообменных систем от отложений, поскольку возможно использование длинномерных гибких питающих шлангов малого диаметра (катеторов);

– вероятно использования подобных устройств в двигателях коррекции орбиты в ракетной технике.

*Кубический нитрид бора* получают только синтетическим путем из гексагональной модификации и применяют главным образом для изготовления абразивного инструмента. По твердости кубический нитрид бора уступает только алмазу, но существенно превосходит его по теплостойкости. Кроме того, он значительно менее адгезионно и химически активен по отношению к материалам на основе железа, никеля и кобальта. В США кубический нитрид бора выпускают под названием боразон, в России и Украине – эльбор и кубонит со следующей маркировкой: ЛО и КО – эльбор и кубонит обычной прочности, ЛР и КР 0 то же повышенной прочности. Разновидности поликристаллического материала (созданы на основе эльбора, кубонита, вюрцитоподобного и гексагонального нитрида бора) - эльбор-Р, гексамит-Р, исмит, ПНТБ, композит-05 и другие производят в виде пластин различной формы и цилиндрических вставок массой от 0,5 до нескольких каратов. Из них изготавливают металлорежущий инструмент, применяемых при обработке труднообрабатываемых закаленных сталей, чугунов и сплавов с твердостью  $> 40$  HRC. Стойкость такого инструмента в 10...20 раз больше стойкости твердосплавного, повышение производительности в 2...4 раза.

*Твердые сплавы* делят на четыре группы:

– вольфрамо-кобальтовые (WC+Co), титановольфрамокобальтовые (TiC+WC + Co),

– титановольфрамотанталовые (TiC+WC+TaC+Co)

– безвольфрамовые (БВТС).

По величине зерна карбида вольфрама вольфрамокобальтовые сплавы подразделяют на особомелкозернистые (ОМ, зерно  $< 1-2$  мкм), мелкозернистые (М, зерно около 1 мкм), среднезернистые (С, зерно 1-2 мкм), крупнозернистые (В, зерно 2-5 мкм).

Вольфрамокобальтовые сплавы (ВК) входят в группу резания К и М. Титановольфрамокобальтовые сплавы (ТК) предназначены для инструмента при обработке резанием сталей с образованием стацио-

нарных типов стружек – сливной и элементной, кроме того, из этих сплавов изготавливают волокна. Титанотанталовольфрамовые сплавы (ТТК) входят в группы резания Р, М, К. Безвольфрамовые твердые сплавы состоят из карбидов, карбонитридов, нитридов тантала и связующей фазы на основе никеля.

Спеченные твердые сплавы широко применяются в ОМД. Кроме фильера и волокна для волочения проволоки, они используются для пуансонов и режущих кромок матриц (операции вырубки-пробивки). Обработка сплавов ведется пастой Гойя (алмазный порошок с пластичной связкой), а также порошком нитрида бора.

Параметры наиболее используемых в странах СНГ твердых сплавов приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

### Химический состав и свойства некоторых твердых сплавов

Твердый сплав	Содержание, %				$\sigma_{Вmin}$ , МПа,	$\gamma$ , г/м <sup>3</sup>	HRA, не менее
	WC	TiC	TaC	Co			
ВК3	97	-	-	3	1176	15,0-15,3	89,0
ВК6	94	-	-	6	1519	14,6-15,0	88,5
ВК8	92	-	-	8	1666	14,4-14,8	87,5
ВК10	90	-	-	10	1764	14,2-14,6	87,0
ВК15	83	-	2	15	1700	13,8	86,0
Т30К4	66	30	-	4	980	9,5-9,8	92,0
Т15К6	79	15	-	6	1176	11,1-11,6	90,0
Т14К8	78	14	-	8	1274	11,2-11,6	89,5
Т5К10	85	6	-	9	1421	12,4-13,1	88,5
ТТ7К12	81	4	3	12	1660	13,0-13,3	87,0
Т8К7	85	8	-	7	1550	12,0-13,0	91,0
МС 101	-	-	-	-	500	6,27-6,48	92,5
МС 111	-	-	-	-	1150	10,22-10,38	92,0
МС 121	-	-	-	-	1200	11,60-11,79	91,5
МС 137	-	-	-	-	1400	11,68-11,84	91,5
МС 131	-	-	-	-	1400	11,35-11,51	91,5
МС 146	-	-	-	-	1800	13,04-13,20	90,0

## 6.2. Покрытия для инструментов из СТМ

### 6.2.1. Металлические и композиционные покрытия

Ранее в отечественной и зарубежной практике инструмент изготавливался преимущественно из порошков СТМ без металлических по-

крытий. В 1965 г. были разработаны технологический процесс и оборудование для химического метода металлизации порошков алмаза. Затем в 1969 г. был создан электролитический метод нанесения металлических покрытий с наложением ультразвуковых колебаний, применяемый до настоящего времени. В результате износостойкость инструмента при обработке твердого сплава повысилась в 2 раза по сравнению с работой кругом из алмазов без покрытия, а при шлифовании твердого сплава совместно со сталью – в 5-7 раз.

Металлизированные порошки СТМ применяются при изготовлении инструмента всех видов и типоразмеров на металлических, металлокерамических и твердосплавных связках. Металлизации подвергаются блочные высокопрочные и термостойкие марки алмазов – АС15, АС20, АС32, АС40, АС65, АС80, АС50Т, АС65Т, АС82Т, АС105Т, АС132Т, а также КНБ марок

КР, ЛКВ и КТ (кибор). С 1983 г. при изготовлении инструмента используется новый технологический процесс для нанесения металлических покрытий методом ионно-плазменного напыления. Адгезия полученных с использованием магнетронов покрытий к поверхности СТМ значительно выше, чем у покрытий, полученных термовакuumным методом. Кроме того, в ионных покрытиях возникают напряжения сжатия, а в покрытиях, полученных испарением, – напряжения растяжения. Сжатие может достигать  $109 \text{ Н/м}^2$  для молибдена и вольфрама, что способствует лучшему удержанию зерен в инструменте, создает предпосылки для широкого использования данного метода нанесения покрытий на высокопрочные и термостойкие порошки алмазов и КНБ, предназначенных для изготовления инструмента, работающего в особо тяжелых условиях: при бурении и камнеобработке. В 1971 г. были созданы композиционные покрытия, включающие кроме металлической составляющей мелкозернистые порошки графита, гексагонального нитрида бора, дисульфида молибдена и некоторых карбидов тугоплавких металлов. Такие покрытия рекомендуются для сухого шлифования хрупких материалов. Введение антифрикционных добавок и твердых смазок способствует улучшению условий шлифования благодаря снижению тепловыделения в зоне обработки.

В композиционных покрытиях сочетаются свойства материалов покрытия, абразивного порошка и твердой фазы включения, что повышает их физико-механические характеристики и улучшает шлифующую способность инструмента. Порошки СТМ с композицион-

ными покрытиями применяются для изготовления инструмента всех видов и типоразмеров на органических связках. Покрытия наносятся в инертной среде и вакууме из расплава на сравнительно хрупкие порошки алмазов марок АС2, АС4, АС6 зернистостью 28/20 и крупнее неправильной формы с шероховатой поверхностью, применяемых в инструменте на органических связках.

При торцевом шлифовании твердого сплава Т15К6 кругом 12А2 125х5х3 АС2 80/63 – Б1-100 % из алмазов с композиционным покрытием на основе сплава Cu–Sn–Ti при глубине 0,02 мм/дв. ход температура резания снижается по сравнению с металлическим покрытием только сплавом Cu–Sn–Ti на 150°С; при 0,04 мм/дв. ход – на 200-250°С, что весьма важно при шлифовании без охлаждения, так как температура резания в кругах из алмазов, металлизированных этим сплавом, при глубине 0,04 мм/дв. ход достигает 600°С и более. При этом кроме механических видов износа может происходить частичное окисление алмазов и термическое разрушение (деструкция) органической связки, что приводит к преждевременному износу алмазного инструмента. Введение твердых смазок позволяет в 1,5 раза снизить усилия резания. Эффективная мощность шлифования также снижается.

Порошки СТМ с металлическим и композиционным покрытиями предназначены для изготовления инструмента на органических и металлических связках всех видов и типоразмеров на традиционном оборудовании и по существующим технологическим процессам. Особенностью процесса изготовления является уменьшение объема рабочего слоя связки или наполнителя на величину объема металла, вводимого в круг и равномерно распределенного на зернах СТМ. В настоящее время практически весь инструмент изготавливается из порошков СТМ с покрытиями и широко используется при обработке твердых сплавов, твердых сплавов совместно со сталью, при бурении, камнеобработке, обработке стекла, кремния и корунда, фарфора, ферритов, износостойких покрытий и других материалов.

Таким образом, выбор метода и материала покрытий обусловлен физико-механическими свойствами существующих марок сверхтвердых и связующих материалов, а также условиями изготовления инструмента. Установлено, что нанесение покрытий существенно повышает свойства СТМ (разрушающую нагрузку и порог окисления зерен СТМ, смачивание и пропитку зерен связующими материалами, удержание зерен и теплоотвод). В результате существенно улучшаются

физико-механические свойства связок, повышается работоспособность инструмента.

### **6.2.2. Неметаллические покрытия**

Инструмент из металлизированных алмазов успешно применяется при обработке твердых и относительно хрупких материалов, например при обработке твердого сплава, стекла, керамики, гранита и др. При обработке данным инструментом вязких материалов, особенно без применения СОТС (например, железоуглеродистых сплавов или твердого сплава совместно со сталью при наличии между ними вязкого припоя), по сравнению с непокрытыми зернами уменьшается производительность обработки, зачастую повышается температура в зоне резания и, как следствие, образуются прижоги и другие дефекты на обработанной поверхности.

КНБ, благодаря высокой термической устойчивости и химической инертности к железоуглеродистым сплавам, широко применяется при обработке различного вида сталей и, прежде всего, быстрорежущих. Инструмент из металлизированных порошков КНБ при обработке таких материалов имеет высокую износостойкость, однако при этом на обработанной поверхности могут образовываться прижоги, особенно при работе инструмента без применения СОТС. Поэтому покрытия, наносимые на зерна алмаза и КНБ, должны обеспечивать не только высокую износостойкость инструмента, изготовленного на их основе, но и высокое качество обработанной поверхности, а также повышать производительность шлифования при обработке вязких материалов. Для этого инструмент не должен засаливаться, должен работать в режиме самозатачивания, обеспечивать высокую мощность шлифования, определяемую фрикционными свойствами системы режущий инструмент – обрабатываемый материал. Этим требованиям удовлетворяет инструмент, изготовленный из порошков СТМ, с неметаллическими покрытиями на основе натриево-боросиликатных стекол.

При работе инструмента в зоне резания, как правило, развиваются достаточно высокие температуры, превышающие температуру трансформации стекла ( $T_g$ ). Благодаря этому слой стекла, находящийся в контакте с обрабатываемым материалом, будет размягчаться. Размягченное стекло, являясь хорошей смазкой, способствует снижению температуры и мощности шлифования при обработке вязких материалов, а это, в свою очередь, повышает качество шлифуемой поверхности. Кроме того, стекла, в отличие от металлов, имеют невысо-

кую адгезию к металлам, что препятствует схватыванию инструмента с обрабатываемым материалом.

На основании проведенных исследований по смачиваемости и взаимодействию расплавов стекол с алмазом и КНБ выбраны составы стекол для покрытия порошков СТМ. Разработан способ нанесения стеклопокрытий на порошки СТМ из жидкой фазы. Он прост в исполнении, не требует сложного оборудования, защитных газовых сред или вакуума. По этому способу получают агрегаты, состоящие из 5-20 зерен СТМ, покрытых и связанных между собой адгезионно-активным стеклом.

Использование порошков алмаза и КНБ со стеклопокрытиями позволяет придать инструменту новые положительные качества и, в первую очередь, снизить относительный расход абразива, а также температуру в зоне резания, мощность шлифования.

Промышленные испытания работоспособности кругов в промышленных условиях показали, что круги из алмазов и КНБ со стеклопокрытием на органических и металлических связках могут эффективно использоваться в технологических процессах абразивной обработки цельнотвердосплавного и напайного твердосплавного инструментов, а также многолезвийных инструментов из быстрорежущих сталей при работе с охлаждением и без него. Применение алмазов и КНБ со стеклопокрытием позволяет повысить работоспособность абразивного инструмента по сравнению с СТМ без покрытия и покрытых металлами за счет снижения относительного расхода СТМ, повышения производительности шлифования, уменьшения прижогов на обрабатываемой поверхности, снижения мощности шлифования.

## ТЕМА 7 МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ

### 7.1. Классификация процессов нанесения металлических покрытий

В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам деталей, различают три вида покрытий:

– защитные покрытия, назначением которых является защита от коррозии деталей в различных агрессивных средах, в том числе при высоких температурах;

– защитно-декоративные покрытия, служащие для декоративной отделки деталей с одновременной защитой их от коррозии;

– специальные покрытия, применяемые с целью придания поверхности специальных свойств (износостойкости, твердости, электроизоляционный, магнитных свойств и др.), а также восстановления изношенных деталей.

При выборе покрытий следует учитывать назначение и материал покрываемой детали, условия ее эксплуатации, свойства покрытия и способ его нанесения, допустимость контактов сопрягаемого металла и покрытия, а также экономическую целесообразность его применения.

Поверхность основного металла, на которую предполагается нанесение покрытий, должна пройти специальную подготовку. При нанесении гальванических покрытий, в соответствии с ГОСТ 9.301-78, шероховатость поверхности основного металла должна быть не более  $R_z=40$  мкм под защитные покрытия;  $R_n=2,5$  мкм под защитно-декоративные;  $R_a < 40$  мкм под специальные покрытия в зависимости от функционального назначения. На поверхности деталей не допускается закатанная окалина, расслоение и трещины, выявившиеся после травления, шлифовки и полировки, поры и раковины.

Поверхность детали должна быть очищена от травильного шлака, продуктов коррозии и других загрязнений.

Перед эмалированием и нанесением органических покрытий поверхность металла должна быть очищена, обезжирена и подвергнута предварительной химической обработке.

Для всех видов покрытий установлены требования к их внешнему виду и специальным свойствам. Как правило, устанавливаются требования к толщине, пористости и прочности сцепления с основным материалом.



В процессе эксплуатации изделия не должно быть локального отслоения покрытия. Поэтому важнейшим требованием является надежное сцепление покрытия с основным материалом детали.

При оценке сцепления покрытия с листовым металлом используют пробу на загиб и глубокую вытяжку (рис. 7.1). Для оценки сопротивления покрытия коррозии обычно применяют испытания, при которых коррозионная нагрузка на деталь близка к условиям ее эксплуатации. Эффективность сопротивления коррозии определяется по растворению покрытия и взвешиванию.

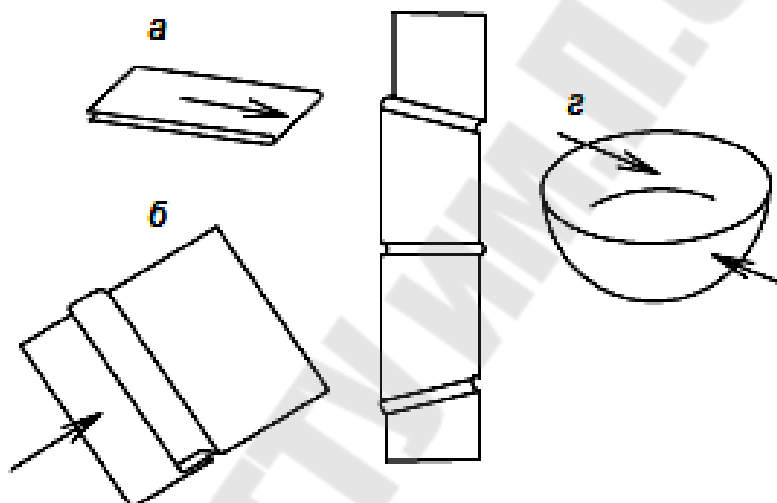


Рис. 7.1. Способы испытания деформируемости тонкого листа с цинковым и алюминиевым покрытием:

а – плотный загиб; б – вальцовка;  
в – профилирование; г – втягивание колпачка

Для надежной защиты деформируемых поверхностей покрытия, прежде всего на органической основе, должны обладать эластичностью и трещиностойкостью. Под *трещиностойкостью* понимается способность покрытия в подложке растягиваться над ней, сохраняя при этом защитные свойства.

Покрытие взаимодействует с поверхностным слоем материала основы. Поэтому для получения качественного покрытия важную роль играет обработка поверхности. Как отмечалось ранее, для предварительной обработки поверхности используют механические и химические методы очистки: струйную обработку, обезжиривание, травление и др.

Классификация процессов нанесения металлических покрытий приведена на рисунке 7.2.

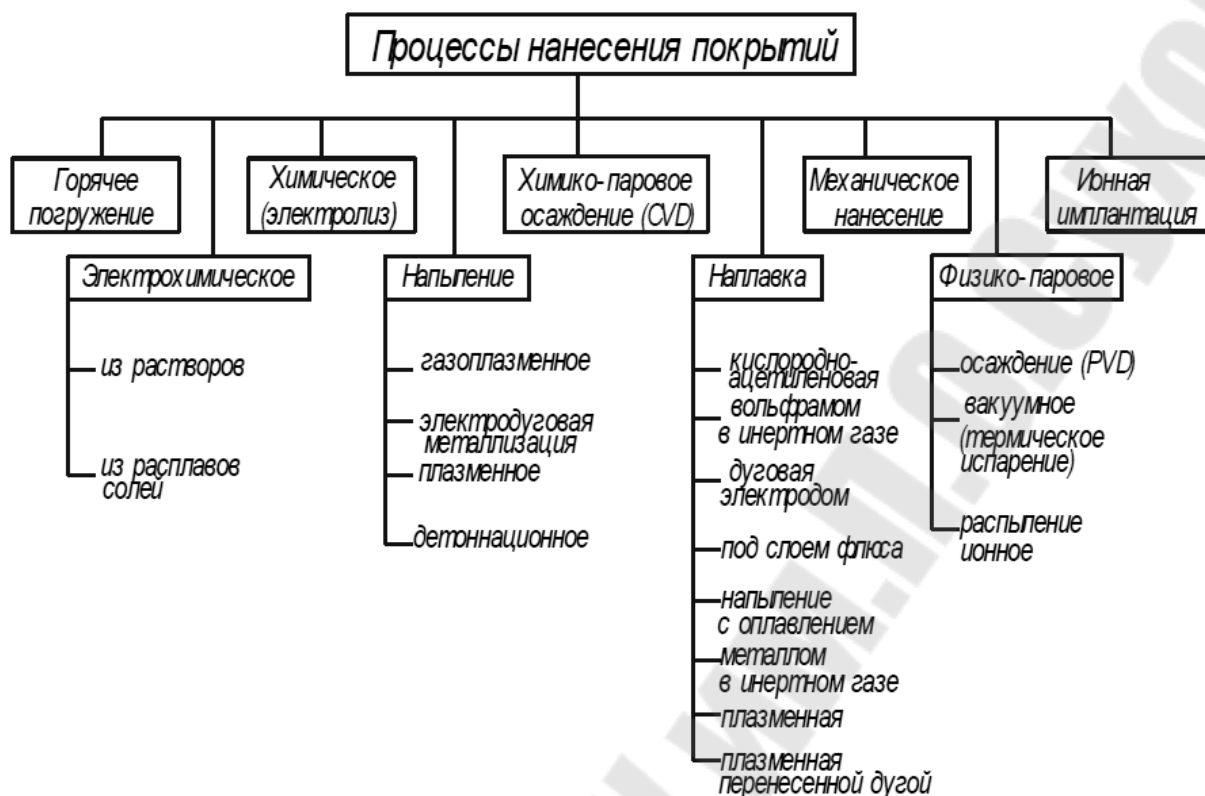


Рис. 7.2. Классификация процессов нанесения покрытий

*Горячее погружение в расплав* – один из самых старых методов нанесения покрытий. Металлы ванны имеют низкую температуру плавления – это цинк, олово, алюминий. Они обеспечивают защиту основного металла от коррозии.

*Напыление* осуществляется мелкими частицами материала, образующимися при пропускании проволоки или порошка через кислородноацетиленовое пламя, с последующим осаждением на холодную основу. Для нагрева можно использовать электродуговую или плазменную металлизацию. Это способствует улучшению адгезии и снижению пористости покрытия.

*Наплавка* осуществляется сплавлением осаждаемого материала с поверхностным слоем основы. Наплавка широко применяется для ремонта отдельных деталей, поврежденных или износившихся в процессе эксплуатации. Для нанесения покрытий методом наплавки могут использоваться все основные сварочные процессы: газопламенный, электродуговой, плазменный, электроннолучевой и др.

*Электрохимическое осаждение* металлов из растворов солей обычно применяется для получения гальванических покрытий из хрома и никеля толщиной 0,12-0,60 мм.

Электролитическое нанесение покрытий из сплавов Ni-P и Ni-B осуществляется вследствие химического взаимодействия. В этом случае покрытия формируются по всей поверхности деталей с одинаковой скоростью толщиной до 0,12 мм, тогда как гальванические покрытия, прежде всего формируются на выступающих местах – кромках, ребрах, гранях.

Химико-паровое осаждение, или процесс CVD (chemical vapour deposition), является процессом, в котором устойчивые продукты реакции зарождаются и растут на подложке в среде с протекающими в ней химическими реакциями (диссоциация, восстановление и др.). Благодаря высокой температуре на поверхности образуются очень тонкие слои, например карбида или нитрида титана. CVD-процесс используется для нанесения покрытий на инструмент и штампы.

Физическое осаждение из паровой фазы (physical vapour deposition, PVD) протекает в несколько стадий:

- 1) нагрев материала в вакууме до испарения;
- 2) перенос паров от источника к подложке;
- 3) конденсация паров на основе – подложке.

Метод PVD обладает высокой гибкостью, и с его помощью можно наносить любые металлы, сплавы, оксиды, карбиды и нитриды. Например, его с успехом применяют для нанесения износостойкой пленки TiN на стальной инструмент. Достоинством метода PVD является высокая чистота поверхности и превосходная связь с основой.

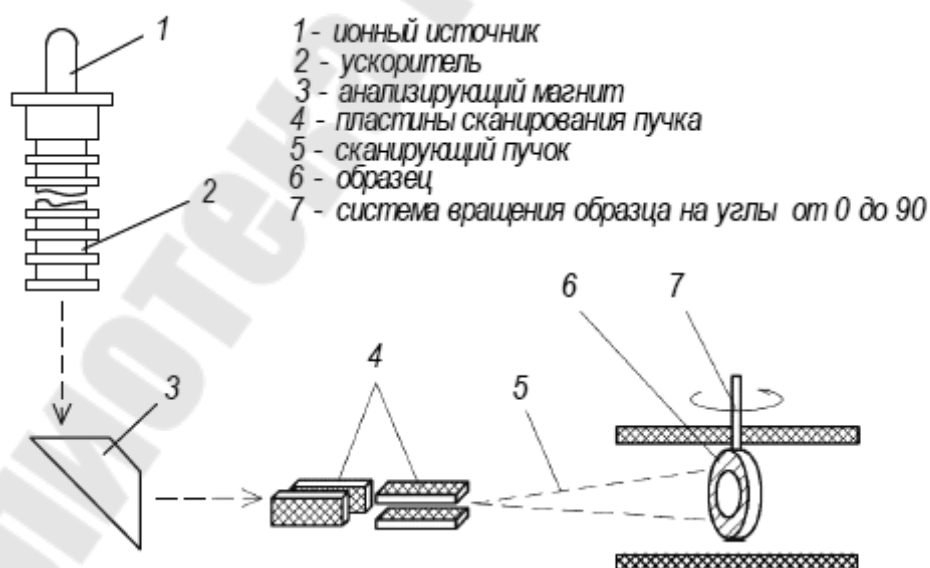


Рис. 7.3. Схема применения 400 кВ ускорителя Ван-де-Графа для ионной имплантации

*Механическое нанесение покрытий* используют для получения цинковых, кадмиевых и оловокадмиевых покрытий – детали перемещают в сосудах с соответствующими тонкими металлическими порошками, активаторами и стеклянными шариками.

*Ионная имплантация* (рис. 7.3) предусматривает ионизацию атомов с последующим ускорением ионов в электрическом поле в вакууме. Ионы тормозятся при соударении с мишенью и распределяются по глубине мишени. Хотя глубина проникновения ионов обычно не превышает 0,1-0,2 мкм, свойства металла могут меняться существенно.

## **7.2. Металлические покрытия**

### **7.2.1. Цинковые покрытия**

Среди методов, улучшающих антикоррозионные свойства, оцинкование занимает первое место. Ежегодно в мире оцинковывается около 25 млн. т стали. Основными методами для нанесения цинковых покрытий на сталь являются электролитический и погружение в расплав (огневое или горячее оцинкование).

Хотя в качестве материала основы можно использовать любые марки, для оцинкования обычно применяют углеродистые и низколегированные стали. Цинковые покрытия характеризуются коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в пресной воде и в закрытых помещениях с умеренной влажностью.

Цинковые покрытия имеют удовлетворительную поверхностную твердость, износо- и водостойкость, прочность на изгиб. Долговечность оцинкованных труб зависит от толщины покрытия. Для серийно выпускаемых труб на 1 м<sup>2</sup> расходуется 400 г цинка, толщина покрытия составляет 43-46 мкм. Отечественная промышленность выпускает оцинкованные водогазопроводные трубы диаметром 10-159 мм, длиной до 8 м.

Скорость коррозии оцинкованных труб в 3-4 раза ниже, чем у стальных труб без покрытия в одних и тех же агрессивных средах. Для повышения коррозионной стойкости оцинкованных листов в состав цинкового покрытия вводят медь (0,08-0,82 %) и алюминий (до 1 %). Коррозионная стойкость листов с электролитическим покрытием ниже, чем горячеоцинкованных. Для повышения коррозионной стойкости оцинкованного листа его дополнительно покрывают лакокрасочным или цветным полимерным покрытием.

Цинковые покрытия применяют для защиты от коррозии запорной арматуры и подземных трубопроводов сточной воды и воды, используемой для технических целей.

Соединения цинка токсичны и при нагреве неустойчивы в кислотах. Цинковые покрытия не применяют для защиты от коррозии деталей, находящихся в непосредственном контакте с пищевыми продуктами.

### **7.2.2. Алюминиевые покрытия**

Для стальных деталей с алюминиевым покрытием характерно сочетание высокой прочности и коррозионной стойкости. Нанесение покрытий производят путем горячего алюминирования в расплавах (алитирование), плакированием стальных листов и напылением в вакууме. Среди способов покрытия стальных листов алюминием наибольшее распространение имеет горячее алюминирование.

Коррозионная стойкость стальных деталей с алюминиевым покрытием обусловлена высокими защитными свойствами образующейся на поверхности пленки  $Al_2O_3$  толщиной менее 0,1 мкм. Этот оксидный слой отличается высокой плотностью и при повреждении быстро образуется заново.

В случае необходимости повышения прочностных свойств вместо углеродистых конструкционных сталей используют микролегированные стали с добавками Nb или Ti.

Микролегирующие элементы придают стали более высокую жаропрочность, поэтому такие стали можно использовать для нагружения при высоких температурах, тем более что алюминий в качестве покрытия имеет хорошую стойкость к окислению.

Алюминиевые покрытия устойчивы в водных растворах агрессивных пищевых сред и органических кислот. Нетоксичность, инертность ко многим средам, хорошие грунтовочные свойства для последующего нанесения полимерных и стеклоэмалевых покрытий обуславливают достаточно широкое применение алюминиевых покрытий в разных отраслях машиностроения.

### **7.2.3. Оловянные и хромсодержащие покрытия**

Покрытие оловом производят методами погружения в расплав и электролитическим осаждением. При погружении стальных и чугунных изделий в расплав на поверхности образуется тонкий слой соединения  $FeSn_2$ , над которым после вытягивания из расплава затвердевает более толстый слой олова.

Более широко используют метод электролитического лужения. Листовой прокат, полученный этим методом, толщиной менее 0,5 мм, называют белой жостью. Толщина оловянных покрытий составляет 30-35 мкм.

В качестве заменителя белой жести применяется холоднокатанный тончайший лист, который покрыт электролитически нанесенным покрытием оксида хрома.

Оловянные покрытия широко применяются в различных отраслях техники, прежде всего в пищевой и мясомолочной промышленности, особенно для защиты от коррозии различных стальных емкостей типа баков, цистерн, фляг. Оловом защищают не только стальные, но и медные емкости.

Электролитически хромированную жечь используют вместо белой жести при изготовлении упаковочной тары для консервов (овощных, молочных, мясных, рыбных), а также фруктовых соков, пива, безалкогольных напитков, при производстве крышек для стеклотары и колпачков для бутылок, тары для упаковки сухих пищевых продуктов.

#### **7.2.4. Покрытия плакированием**

При плакировании происходит послойное соединение стали с одним или многими металлами с образованием многослойного материала. При плакировании к материалу основы не предъявляется особых требований, он используется с теми же свойствами, которые нужны для эксплуатации. Для получения бездефектного соединения требуется очистка поверхности и создание заданной шероховатости. Плакирование осуществляется разными методами. Используют процессы горячей и холодной прокатки, метод двухслойного литья заготовок, плакирование взрывом и наплавку плакирующего слоя.

В качестве материала для плакирования низколегированных сталей применяют коррозионностойкие ферритные или аустенитные стали, медь и никель или их сплавы, а также алюминий, титан, ниобий или молибден. При плакировании коррозионностойкую сталью предварительно создают гальваническое никелевое покрытие. Этим устраняется окисление горячей стали перед прокаткой и одновременно интенсифицируются процессы диффузионного сваривания, необходимые для сцепления материалов.

Биметаллы являются не только заменителями однородных дорогостоящих материалов. Во многих случаях благодаря сочетанию свойств своих компонентов они имеют более благоприятные показатели, чем однородные дорогостоящие материалы сами по себе.

Плакированные изделия отличаются более высокой прочностью. При использовании в качестве основного материала сталей с высоким пределом текучести может быть снижена масса изделия и получена

дополнительная экономия металла по сравнению с требуемым количеством при изготовлении тех же изделий целиком из нержавеющей сталей.

### **7.2.5. Осаждение в вакууме или из газовой фазы**

Ранее отмечалось, что в основе технологии напыления металлических сплавов в вакууме лежит принцип испарения за счет нагрева и понижения давления и конденсация на материале основы с получением заданного слоя. Высокий вакуум благоприятствует процессу испарения. Для эффективного протекания процесса конденсации изделие, на которое наносится покрытие, должно интенсивно охлаждаться.

При осаждении металлов из газовой фазы на стальную поверхность используют свойство некоторых металлов легко образовывать летучие галогениды, которые вступают в реакцию с железом на стальной поверхности. При этом металл покрытия становится свободным и может диффундировать в глубь стальной детали. Наряду с алюминием для осаждения из газовой фазы используется также хром и кремний.

Высокое содержание хрома на поверхности (до 25%) придает материалу отличную стойкость против окисления и коррозии.

## **7.3. Неметаллические покрытия**

### **7.3.1. Неорганические покрытия и способы их нанесения**

К неорганическим неметаллическим материалам, применяемым для защиты от коррозии металлических поверхностей, относятся эмали, стекло и цемент.

*Эмалью* называют стекловидную застывшую массу, полученную в результате полного или частичного расплавления и состоящую в основном из и других оксидов. На изделие эмаль наносят одним или несколькими слоями.

Различают два основных способа эмалирования. Наряду с эмалированием, при котором изделие покрывают грунтовкой и покровными эмалями и при этом дважды обжигаются, широко используется в последние годы однослойное прямое эмалирование, при котором слой эмали (0,2-0,3 мм) может быть уменьшен наполовину. При специальном эмалировании, применяемом в химическом и пищевом машиностроении, обычно наносится многослойная эмаль.

Перед нанесением эмали поверхность стальной детали должна быть обезжирена и протравлена. При этом удаляется некоторое количество металла и поверхность листа становится шероховатой, что способствует адгезии эмалевого покрытия.

С целью снижения пористости при обжиге за счет образования  $\text{CO}_2$  для эмалирования применяют низкоуглеродистые стали.

Стеклоэмалевое покрытие обладает не только высокой химической стойкостью, износостойкостью, но и обеспечивает незначительное налипание остатков продукта, благодаря чему аппаратура легко моется. Покрытие имеет высокую адгезию к металлу. Общая толщина эмалевого покрытия 0,8-1,0 мм.

При эксплуатации эмалированной аппаратуры не допускается превышать давление или резко повышать его даже в пределах рабочего давления, резко нагревать и заполнять переохлажденным продуктом или водой, производить местные термические и механические воздействия, оставлять аппараты открытыми, использовать в качестве моющих и дезинфицирующих средств щелочные растворы.

Недостатки стеклоэмалевых покрытий: чувствительность к ударам, резкой смене температуры, местным перегревам, воздействию щелочей.

Высокую долговечность водопроводных труб обеспечивают цементные покрытия. Для покрытий используется портландцемент с наполнителем в виде мелкого песка.

### **7.3.2. Органические полимерные покрытия и способы их нанесения**

Рассмотренные выше методы защиты металлов от коррозии более дороги, менее эффективны, и возможности их ограничены. Поэтому использование органических покрытий по-прежнему остается важным средством борьбы с коррозией.

Полимерные покрытия не только защищают металлы от воздействия агрессивных сред, но и повышают их износостойкость, снижая прилипаемость различных веществ к рабочим поверхностям, позволяют экономить цветные металлы и другие дефицитные материалы.

К полимерным покрытиям предъявляются высокие требования. Покрытия должны иметь хорошую адгезию к защищаемой поверхности, беспористость, эластичность, механическую прочность, теплоустойчивость, быть инертными к средам, с которыми они находятся в контакте.

Ни один из известных полимеров не сможет полностью удовлетворить всем перечисленным требованиям. Материалы, обладающие достаточной химической стойкостью, как правило, имеют недостаточную адгезию к защищаемому металлу. Полимерные покрытия с хорошей адгезией к защищаемой поверхности часто легко разруша-



ются от химического и механического воздействия агрессивных сред. Лишь эпоксидные и некоторые другие полимеры удачно сочетают высокую адгезию к металлу с удовлетворительной химической стойкостью.

В различных областях промышленности для защиты внутренних поверхностей аппаратов, трубопроводов и арматуры применяются винилхлоридные, фторопластовые, пентапластовые, полиолефиновые, полиуретановые, феноло-формальдегидные, кремнийорганические, каучуковые, эпоксидные и другие покрытия.

В отличие от коррозионной стойкости металлов, характеризующей потерей массы, химическая стойкость полимерных материалов численно обычно не выражается. О химической стойкости полимерных покрытий судят по степени набухания и разрушения пленки, потере эластичности, изменению цвета и т.д.

#### *Полиамидные покрытия*

К полиамам относятся капрон и капролон. Покрытия из полиамидов обладают высокими антифрикционными характеристиками. По износостойкости при сухом и жидкостном трении полиамиды превосходят не только другие классы полимеров, но и многие металлы, применяющиеся в антифрикционных целях. Низкий коэффициент трения при высоких нагрузках позволяет использовать полиамиды в тяжело нагруженных узлах трения, о чем свидетельствуют значения коэффициентов трения покрытий из полиамидов при трении со смазкой по стали. Недостатком полиамидных покрытий является склонность к старению и значительное водопоглощение. С повышением температуры гигроскопичность возрастает.

Полиамидные покрытия наносят на поверхность изделий напылением порошков, литьем под давлением, а также из растворов.

Следует отметить низкую стойкость полиамидов к окислению, что препятствует длительной эксплуатации полиамидных покрытий на воздухе при температурах выше 60-100°C. В целях повышения термостабильности полиамидов применяют различные стабилизирующие добавки органического и минерального происхождения.

Для улучшения адгезионных и когезионных свойств, повышения эксплуатационных характеристик в покрытия из полиамидов вводят различные наполнители. Введение небольших количеств оксидов титана, меди, железа, свинца и алюминия способствует росту прочности и твердости, несущей способности и износостойкости покрытий при незначительном изменении коэффициента трения. Повышение

теплостойкости и несущей способности подшипников с полиамидными покрытиями достигается введением порошков металлов (алюминия, свинца, бронзы и др.). Снижению коэффициента трения также способствует добавка фто-ропласта-4, дисульфида молибдена, графита.

Модифицированные покрытия на основе полиамидных слоев применяют для изготовления таких, деталей как шестерни, подшипники и т.д.

Полиамидные смолы используют для получения защитных покрытий, а полиамидные порошки – для нанесения тонкого антифрикционного износостойкого покрытия.

#### *Поливинилхлоридные покрытия (ПВХ)*

Благодаря низкой стоимости сырья, высокой химической стойкости, хорошим физико-механическим и удовлетворительным электрическим свойствам ПВХ является самым распространенным материалом, применяющимся для создания защитно-декоративных, химически стойких и электроизоляционных покрытий.

В состав поливинилхлоридных композиций, предназначенных для покрытий, помимо пластификаторов, входят стабилизаторы, наполнители, смазки, пигменты и другие добавки, концентрация и природа которых оказывают существенное влияние на свойства покрытий.

Материалом для покрытий в основном служит пластифицированный поливинилхлорид, реже используется непластифицированный ПВХ, типичным представителем которого является винипласт. Листовой и пленочный винипласт применяется в химической промышленности для футеровки металлической аппаратуры и трубопроводов, эксплуатирующихся в агрессивных средах.

Пластифицированный поливинилхлорид обычно наносят на поверхность обрабатываемых деталей в виде порошка или пленки.

Высокая химическая стойкость поливинилхлорида позволяет успешно использовать покрытия на его основе в агрессивных средах.

Поливинилхлорид является основным компонентом для изготовления лакокрасочных материалов. Путем обработки ПВХ получают винипласт, листы которого легко поддаются механической обработке и хорошо свариваются. Это позволяет использовать их для нанесения сплошного покрытия на фундаменты, цокольные части и другие конструкции. Поливинилхлоридный пластикат применяют как обкладочный материал для защиты аппаратуры от коррозии, уст-

ройств полов в помещениях, где требуется герметичность. Для устройства химически стойких полов, а также для гидроизоляции используют поливинилхлоридную пленку.

#### *Фторопластовые покрытия*

Для изготовления различных деталей и для защитных покрытий применяются фторопласт-4 и фторопласт-3.

Фторопластовые покрытия исключительно устойчивы к агрессивным средам и в этом отношении превосходят даже благородные металлы и сплавы. На покрытия из фторопласта-4 не действуют окислительные среды, включая и царскую водку, кипящие щелочи, растворы солей. Фторопластовые покрытия вполне устойчивы по отношению к жирам, маслам, влаге, кислотам и т.д.

Покрытия из фторопластов применяют для защиты различных технологических емкостей.

Кремнийорганические полимеры отличаются многими ценными свойствами, из которых наиболее характерны термостойкость, а также стойкость к воздействию целого ряда химических агентов и растворителей. По термостойкости они значительно превосходят органические полимеры.

Кремнийорганические полимеры сравнительно инертны по отношению к большинству реагентов за исключением сильных оснований и концентрированных кислот. Разбавленные сильные кислоты и щелочи, а также слабые кислоты и основания оказывают на них незначительное действие.

К недостаткам кремнийорганических полимеров следует отнести их невысокую химическую стойкость к действию органических растворителей и окислительных сред.

Эпоксидные смолы в своем составе имеют реакционноспособные эпоксидные и гидроксильные группы, способные вступать в химические реакции с различными веществами с образованием более сложных соединений. При введении в них отвердителей холодного или горячего отверждения такие смолы способны переходить в неплавкое и нерастворимое состояние. В качестве отвердителей могут применяться органические и неорганические кислоты, ангидриды кислот, амины и амиды, а также синтетические смолы.

Свои ценные физико-механические свойства эпоксидные смолы приобретают при взаимодействии с отвердителями. Отвердители аминного типа выполняют функции сшивающих реагентов. Реакционноспособные группы отвердителей взаимодействуют с эпоксидны-

ми или гидроксильными группами смолы. Скорость процесса отверждения зависит от температуры. Некоторые отвердители реагируют со смолой при комнатной температуре, другие – лишь при нагревании. Наиболее полное отверждение полиаминами достигается при температуре выше 100°C. Долговечность материалов, полученных отверждением при комнатной температуре, ограничена. Материалы, полученные отверждением эпоксидной смолы при нагревании, более долговечны.

На основе эпоксидных смол изготавливают лакокрасочные материалы, применяемые для защитных покрытий.

Покрытия на основе эпоксидных смол с такими наполнителями, как уголь, графит, кремнезем, кварцевая мука, измельченный мрамор, в пищевой промышленности использовать нельзя по санитарным нормам.

Для защиты сепараторов перспективны комплексные покрытия, состоящие из одного слоя грунта, двух слоев эмали и одного слоя лака на основе эпоксидной смолы. Отвержденное покрытие промывается раствором уксусной кислоты, затем раствором соды и ополаскивается водой. Полимерные покрытия на основе виниловых, каучуковых и эпоксидных смол применяются для защиты сепараторов, в которых технологические процессы протекают под избыточным давлением.

Для защиты некоторых железобетонных (бетонных) внутренних поверхностей стационарных баков используют эпоксидное покрытие, состоящее из 82% смолы, 13% этилового спирта и 5% полиэтиленполиамина. Покрытие затвердевает при комнатной температуре, но для ускорения процесса повышают температуру до 70°C. Перед нанесением покрытия железобетонная поверхность обязательно должна быть хорошо очищена, просушена и прогрета электрообогревателем любого типа. Покрытие четырехслойное, общей толщиной до 0,6-0,8 мм. Эпоксидные смолы также используют для защиты внутренней поверхности железных чанов и цистерн.

Для защиты железобетонных емкостей, применяемых для хранения пищевых продуктов, используют трехслойное эпоксидное покрытие: первый слой грунта и два покровных слоя. Сушка каждого слоя осуществляется в воздушно-сухих условиях в течение 24 ч с последующей сушкой всех трех слоев в течение 28 суток. Высушенное покрытие промывают раствором соды с последующим ополаскиванием.

### *Резиновые покрытия*

В качестве материалов для покрытий применяются резины на основе натурального и синтетических каучуков. В состав композиций входят стабилизаторы, вулканизирующие агенты и другие добавки. В процессе вулканизации образуется трехмерная структура, обеспечивающая покрытиям хорошие механические свойства.

Для футеровки изделий простой формы используют листовые материалы из сырой резины с последующей вулканизацией на подложке. Для защиты изделий сложной конфигурации находят применение жидкие материалы в виде дисперсий или растворов.

Высокой эластичностью и хорошими адгезионными свойствами обладают покрытия из резин на основе натурального каучука, которые используются для защиты от минеральных кислот и щелочей.

Мягкие резины в основном применяются для покрытия различных аппаратов, деталей, цистерн, труб. Они представляют собой полимерные композиции сложного состава на основе эластомеров линейного или разветвленного строения (каучуков) в виде латексов или клеев.

Например, для футеровки емкостей внутреннюю поверхность подвергают дробеструйной обработке и оклеивают листовой смесью резины с фенолоформальдегидной смолой. После этого поверхность облицовывают кислотоупорной плиткой на диабазовой замазке.

Разработку теплостойких резин ведут с учетом специфики свойств агрессивных сред. Наибольший интерес представляют жидкие силоксановые каучуки, которые обладают высокой теплостойкостью (до 250°C) и нетоксичны.

Благодаря высокой сопротивляемости истиранию резины применяют для аппаратов, работающих с жидкостями, содержащими взвешенные вещества (насосы, трубопроводы). Иногда применяют твердые резины - эбониты. Эбониты по сравнению с резинами имеют более высокую химическую стойкость.

#### **7.3.3. Защитные технологические покрытия**

Для защиты от окисления при высоком нагреве различных сортов сталей, жаропрочных, титановых, никелевых и других сплавов созданы защитные технологические покрытия, которые работают в интервале температур 950-1700°C. Эти покрытия экологически чистые, экономичны и просты в использовании, обладают хорошими смазочными характеристиками и могут быть использованы при обработке методами пластической деформации сталей и сплавов.

При штамповке заготовок из титановых сплавов применяют покрытия ЭВТ-24, ЭВТ-25, которые защищают металл от окисления, улучшают процесс заполнения формы, уменьшают глубину газонасыщенного слоя, повышают стойкость штампов в полтора-три раза.

Покрытия ЭВТ-35, ЭВТ-57, ЭВТ-88М используют в изотермической штамповке титановых и никелевых жаропрочных сплавов при изготовлении точных заготовок сложного профиля, при этом коэффициент использования материала повышается на 20-30% и увеличивается стойкость штампов. При этом сокращаются припуски на механическую обработку, и снижается трудоемкость изготовления деталей.

Покрытия ЭВТ-67, ЭВТ-78М, ЭВТ-100 позволяют защищать поверхности заготовок из тугоплавких сплавов от окисления.

Применение защитных технологических покрытий позволяет экономить металл и снижать себестоимость изготовления деталей.

#### **7.3.4. Теплозащитные покрытия**

При изготовлении космических ракет и кораблей, самолетов и ракет военного назначения используются специальные материалы для тепловой защиты жилых отсеков и аппаратуры управления. Трагический запуск корабля многоразового использования Columbia, показал, что нарушение герметичности клеевого шва в защитной облицовке приводит к разрушению всего корабля. Тепловая защита изолирует обшивку летательного аппарата от плотных слоев атмосферы, которые при торможении нагреваются до 1200- 1300° С. Она состоит из плиток, выполненных из волокнистого керамического материала. Материал плиток может выдерживать многократное тепловое воздействие в интервале температур от -150 до +1300° С, обладает низкой плотностью и теплопроводностью, выдерживает значительные нагрузки от тепловых деформаций и вибраций. После каждого полета заменяется около сотни поврежденных плиток системы тепловой защиты, которые имеют трещины, выкрошивания, прижоги. В защитной облицовке космического корабля Discovery перед полетом были заменены 1900 плиток.

Волокнистые материалы на основе  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  эффективно используются в качестве высокотемпературных жидкостных и газовых фильтров, катализаторов, а также армирующих наполнителей деталей двигателей внутреннего сгорания.

Основными недостатками таких волокнистых материалов являются низкие удельная прочность, возможность эрозии и истирания. Поэтому для повышения эффективности их применения необходимы поверхностные покрытия.

### **7.3.5. Терморегулирующие покрытия**

Разработан эффективный способ получения высокотемпературных терморегулирующих покрытий, называемый «золь-гель»-технология, в основе которой лежат химические процессы синтеза алкоксипроизводных металлов и неметаллов (Si, Al, B, Zr, Hf, Y и др.) с последующим гидролизом, конденсацией и гелеобразованием. Такая технология осуществляется при комнатной температуре, позволяет получать однородные покрытия, которые наносятся на рабочие поверхности кистью, пульверизатором, шпателем, методом окунания, и управлять их свойствами. На основе «золь-гель»-технологии разработаны высокотемпературные терморегулирующие покрытия с рабочей температурой до 1500°C для защиты поверхности огнеупорных футеровок и волокнистых теплоизоляционных материалов от агрессивных горячих газовых потоков и термоударов. Толщина покрытия составляет 0,05-2 мм, излучаемая способность 0,5–0,95, расход покрытия 0,15–0,4 кг/м<sup>2</sup>.

При использовании покрытий поверхность волокнистых теплоизоляционных материалов упрочняется в два раза, значительно снижается эрозионное разрушение из-за воздействия газовых потоков и агрессивных сред, на 30–50% увеличивается срок службы, на 20–30% снижается энергоемкость за счет снижения тепловых потерь, повышается температура эксплуатации изделий. Терморегулирующие покрытия используются в изделиях аэрокосмической техники, энергетическом и химическом машиностроении.

### **7.3.6. Лакокрасочные покрытия**

Лакокрасочные материалы – это составы, наносимые на защищаемую поверхность тонкими слоями и образующие после высыхания и отверждения твердую, плотную и прочно сцепленную с поверхностью пленку. Они состоят из основных материалов (связующие – пленкообразующие вещества, пигменты, наполнители) и вспомогательных (пластификаторы, отвердители, растворители и др.).

Пленкообразование при формировании лакокрасочного покрытия происходит следующими способами: испарением растворителей (например, для поливинилхлоридных покрытий); взаимодействием с отверждающими агентами (для эпоксидных покрытий); поликонденсацией (для фенольных покрытий); окислением (для маслосодержащих покрытий); расплавлением и напылением (для полиэтилена и др.).

Системой лакокрасочного покрытия называют сочетание слоев лакокрасочных материалов, последовательно нанесенных на защищаемую поверхность.

Толщина покрытия зависит от типа и свойства наносимого лакокрасочного материала, его вязкости, процесса нанесения, степени агрессивности среды и других условий эксплуатации, свойств металла и степени сложности его поверхности, возможности нанесения определенным способом и назначения.

Обычно толщина однослойной пленки правильно нанесенной эмали при 18-22°C составляет 25-30 мкм, нагретой – до 40-60°C составляет 15-20 мкм.

Для жестких условий эксплуатации значение минимальной общей толщины эпоксидного и винилового покрытий принимается равной 250-300 мкм, алкидного и полиуретанового – 200-250, кремнийорганического – 80-120 мкм. Для мягких условий толщина может быть уменьшена на 10-12%.

Лакокрасочным материалам присущи определенные физические (плотность, теплопроводность, атмосферостойкость и др.), механические (прочность, твердость, эластичность, истираемость и др.), химические (кислото-щелочестойкость, токсичность и др.) свойства.

Все лакокрасочные материалы по своему виду (грунтовки, эмали, краски, лаки) в зависимости от рода основного пленкообразующего вещества подразделяются:

а) по составу на группы:

- КО кремнийорганические
- ХС сополимерно-винилхлоридные
- ЭП эпоксидные
- ПФ пентафталевые;

б) по преимущественному назначению:

- 1 атмосферостойкие
- 2 ограниченно атмосферостойкие
- 3 консервационные
- 4 водостойкие
- 5 специальные
- 6 маслбензостойкие
- 7 химически стойкие
- 8 термостойкие
- 9 электроизоляционные
- 10 грунтовки
- 00 шпатлевки.

*Грунтовки* – это пигментированные растворы пленкообразователей в органических растворителях. Они служат для создания на за-



щищаемой поверхности антикоррозионного слоя и обеспечения высокой прочности сцепления как с поверхностью, так и с последующими покрывными слоями. В системе поверхность – грунтовка – покрывной состав (эмаль) грунтовка выполняет роль «химического мостика».

*Эмали* (покрывные слои) – это пигментированные и наполненные лаки, предназначены для обеспечения защиты металла от коррозии совместно с грунтовками и придания объекту требуемого декоративного вида. Как правило, их наносят на предварительно загрунтованные поверхности.

В различных отраслях пищевой промышленности лакокрасочные композиции часто изготавливают на месте на основе таких связующих, как эпоксидные, кремнийорганические, полиуретановые, сополимервинилхлоридные и других смол. В них добавляют пигменты и наполнители, а также вспомогательные материалы (пластификаторы, растворители, разбавители, отвердители). Все компоненты перемешивают, перетирают и фильтруют до получения готовых к употреблению составов.

*Пигменты* – это тонкоизмельченные цветные природные и синтетические неорганические оксиды, соли металлов, органические или металлические вещества (порошки), не растворимые в дисперсных средах, воде и способные создавать с пленкообразующим покрытием защитное покрытие. Многие пигменты обладают высокими противокоррозионными свойствами. Они предназначены для получения окрашенных покрытий и обеспечивают твердость, снижают набухание пленки в воде.

*Наполнители* – это дисперсные неорганические природные или синтетические вещества, не растворимые в растворителях, воде и дисперсионных средах. Они предназначены для повышения адгезии, модуля упругости, твердости, прочности, тепло-, огне-, кислото-, щелоче- и атмосферостойкости покрытий, снижения стоимости покрытия, придания композиции требуемой теплопроводности, снижения температурного коэффициента расширения покрытий до значений, характерных для металлов. Их добавляют до 25% от количества вводимых пигментов.

*Пластификаторы* – это низколетучие растворители, изменяющие вязкость системы и повышающие эластичность, предназначены для облегчения условий пленкообразования, повышения стойкости к растрескиванию при цикле нагрев – охлаждение, регулирования таких

физико-механических свойств, как хрупкость, повышение удлинения, сопротивление удару, эластичность.

*Растворители (разбавители)* – это органические жидкости, одноконтонентные растворители или их смеси. Они предназначены для разведения лакокрасочных материалов до рабочей вязкости и улучшения их технологических свойств.

Растворители должны иметь хорошую растворяющую способность, оптимальную температуру кипения и минимальную токсичность.

*Отвердители* – это химические соединения, добавляемые в состав только определенных лакокрасочных материалов (эпоксидных, уретановых и др.) для их отверждения.

*Износостойкие покрытия.* Одним из необходимых условий при выборе материалов для покрытий является высокая износостойкость защитных покрытий.

Полимерные покрытия являются эффективным средством для повышения износостойкости. Долговечность покрытий зависит от плотности материалов, из которых они изготовлены, их адгезионной способности к подложке, трибометрических свойств, равномерности распределения в них модификаторов и наполнителей.

Большинство полимерных материалов характеризуется высокой износостойкостью. Использование тонких полимерных слоев в сочетании с теплостойкостью металлического основания позволяет создавать надежно работающие износостойкие покрытия.

С повышением молекулярной массы и регулярности макромолекул в ряду одного типа полимера износостойкость покрытий увеличивается. Свойства износостойких покрытий во многом определяются составом композиции, изменяя который, можно регулировать износостойкие характеристики в широких пределах и получать покрытия различного назначения как с низким, так и с высоким коэффициентом трения.

Чаще других полимеров для износостойких покрытий используются полиуретаны, пентапласт, политетрафторэтилены, полиамиды, эпоксидные композиции.

Хорошо противостоят абразивному износу, например, трубы, покрытые изнутри полиуретаном.

Покрытия на основе ненаполненных полиуретановых эластомеров по стойкости к абразивной эрозии превосходят ряд марок нержавеющей сталей.

Одним из перспективных износостойких материалов является поливинилденфторид (ПВДФ). Он применяется как в качестве покрытий и футеровок элементов насосных агрегатов, так и для изготовления насосов для перекачивания агрессивных сред.

Одним из рациональных способов повышения износостойкости покрытий является модифицирование полимерных композиций неорганическими и минеральными наполнителями, например, дисульфидом молибдена, тальком, аморфным бором, корундом, оксидом цинка, карбидом кремния и др.

Сжижению износа покрытий способствует наполнение полимерных композиций стекловолокном, графитом, цементом, асбестом, маршаллитом, повышающими прочность, теплостойкость и другие характеристики полимеров.

## Литература

1. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы. / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. - М.: Академия, 2007 – 179 с.
2. Арзамасов, Б.Н. Материаловедение. / Б.Н. Арзамасов. – М.: Машиностроение, 1986 г. - 384 с.
3. Геллер, Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1989. – 456 с.
4. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. / Ю.И. Головин. – М.: Машиностроение, 2007. – 496 с.
5. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. / А.И. Гусев. - М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
6. Дальский, А.М. Технология конструкционных материалов. / А.М. Дальский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. - 448 с.
7. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию. / пер. с яп. под ред. Л.Н. Патрикеева. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2005. – 134 с.
8. Карабасов, Ю.С. Новые материалы./ Ю.С. Карабасов [и др.]- М. : МИСиС, 2002.- 736 с.
9. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение: Учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухина.-3-е изд.- М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 678 с.
10. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / под ред. М. Роко; пер. с англ. под ред. Р.А. Андриевского. - М.: Мир, 2002. – 292 с.
11. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии / пер. с англ. под ред. Ю.И. Головина. М.: Техносфера, 2004. – 328 с.
12. Рогов, В. А., Современные машиностроительные материалы и заготовки. / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. - М. : Академия, 2007 – 450 с.
13. Рогов, В. А. Современные машиностроительные материалы и заготовки: учебное пособие для студентов вузов. / В.А.Рогов, Г.Г.Поздняк.- М.: Издательский центр «Академия», 2008.- 330 с.
14. Солнцев, Ю. П. Специальные материалы в машиностроении: учебник для вузов / Ю. П. Солнцев. – СПб., 2004. – 640 с.
15. Суздаев, И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздаев. - М. : КомКнига, 2006. – 592 с.
16. Компьютерные презентации кафедры “МиТОМ”.

# **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**Пособие**

**для магистрантов специальности 7-06-0714-01  
«Инновационные технологии в металлургии»  
дневной и заочной форм обучения**

**Составитель Астапенко Игорь Васильевич**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 12.10.23.

Пер. № 57Е.  
<http://www.gstu.by>