

Министерство образования Российской Федерации

---

Томский политехнический университет

А.Н. Гормаков

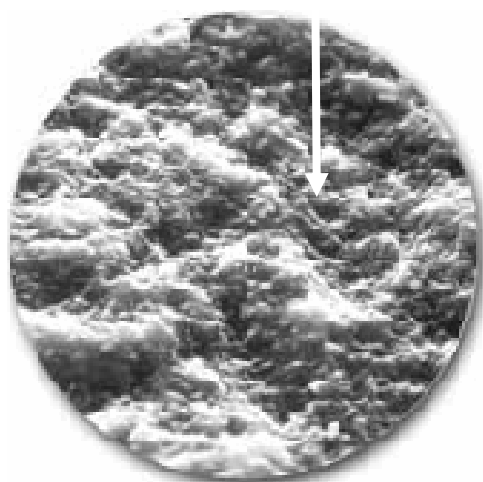
# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Учебно – методическое пособие

Издательство ТПУ  
Томск 2003

**А.Н. Гормаков**

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**



**x5000**

УДК 620.22 (075.8)

ББК 30.3я 73

Г69

**Гормаков А.Н.**

Г69      Материаловедение. Учебно-методическое пособие. –  
Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 120 с.

В пособии рассматриваются классы конструкционных и специальных материалов, в том числе и с особыми упругими, электрическими, тепловыми и магнитными свойствами, основные характеристики механических и физических свойств материалов; влияние структуры, состава, термообработки, роль поверхности; методы повышения стабильности материалов; маркировка материалов. Предназначено для студентов приборостроительных специальностей технических университетов.

УДК 620.22 (075.8)

ББК 30.3я 73

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор ТГУ  
*В.А. Скрипняк*

Начальник отделения, главный технолог  
ГНПЦ “Полюс”, г. Томск

*Г.Л. Осипов*

© Томский политехнический университет, 2003

© Оформление. Издательство ТПУ, 2003

© Гормаков А.Н., 2003

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Надежность и долговечность прибора в значительной степени зависит от качества материалов, из которого изготовлены его детали. Для любой детали приборов, применяемых в системах контроля и управления технологическими процессами в различных отраслях, приборов управления судами, самолетами и другими подвижными объектами, медицинских и других приборов, качество материала – основной показатель.

Предлагаемое учебно-методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям: 551500 – Приборостроение; 553400 – Биомедицинская инженерия; 552200 – Метрология, стандартизация и сертификация; 551900 – Оптотехника.

Требования, предъявляемые Образовательным стандартом ТПУ к содержанию раздела “Материаловедение” дисциплины “Материаловедение и технология конструкционных материалов”:

**Федеральные требования:** строение металлов и сплавов, пластическая деформация, влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла, механические свойства металлов и сплавов, конструкционные материалы, термическая и химико-термическая обработка металлов, конструкционные пластики, композиты, электротехнические материалы.

**Региональные требования:** материалы для приборов, работающих в условиях нефтегазодобывающей, угольной, металлургической промышленности.

**Университетский компонент:** материалы для имплантантов, композиционные материалы для исполнительных органов систем ориентации, материалы для микромеханических гироскопов и акселерометров.

Задачей курса является формирование у студентов знаний и умений, необходимых для правильного выбора и рационального использования различных материалов, применяемых в приборостроении. Изучение дисциплины базируется на знании студентами высшей математики, физики, химии, механики и информатики. Знания, полученные студентами в процессе изучения данной дисциплины, необходимы при изучении дисциплин конструкторско-технологического цикла.

В последнее десятилетие установилась тенденция снижения объема аудиторных занятий и самостоятельной работы студента по естественно-научным, общепрофессиональным и специальным

дисциплинам. Но сокращение объема занятий не должно привести к снижению качества подготовки специалистов. Эта проблема может быть решена путем повышения эффективности аудиторных занятий и самостоятельной работы студентов.

План лабораторных занятий предусматривает выполнение студентами следующих работ:

1. Деформация конструкционных материалов.
2. Методы определения твердости материалов.
3. Триботехнические характеристики материалов.
4. Материалы для магнитных экранов.
5. Электроизоляционные материалы.

В связи с ограниченным объемом аудиторных занятий ряд тем вынесены на самостоятельную проработку (клеи, герметики, лакокрасочные покрытия, резины и др.). Программа самостоятельной познавательной деятельности студента и совместной работы с преподавателем осуществляется по следующим основным направлениям: проработка лекционного материала, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуальных заданий по теме теоретических занятий. Рабочей программой дисциплины предусмотрено два индивидуальных задания:

1. Работа со справочной литературой по материалам. Для выполнения этой работы составлены методические указания.
2. Реферат по конкретным материалам, наиболее характерным для той или иной специальности. В этой работе студент описывает структуру, состав, свойства материала, технологию его получения и переработки в изделия, определяет область его применения, приводит марки и формы поставки этого материала отечественной и зарубежной промышленностью.

В четырех приложениях пособия приведены ряд механических, теплофизических и электрических характеристик некоторых материалов, широко применяемых в приборостроении, и периодическая система элементов Д.И. Менделеева.

Вопросы для самоконтроля и темы рефератов приведены в рабочей программе дисциплины.

Автор выражает глубокую признательность рецензентам за ценные замечания и полезные советы, которые были учтены при доработке рукописи.

А. Гормаков, Томск, май 2003 г.

# Глава I. ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

## 1. Введение

### 1.1. Техническая база приборостроения

Прежде чем приступить к изучению строения, свойств и определенных классов материалов, применяемых в приборостроении, необходимо знать:

1. Что представляют собой современные приборы?
2. Какие физические принципы заложены в конструкции приборов?

Технической базой современного приборостроения (рис. 1.1) являются: точная механика, электротехника, электроника, оптика.

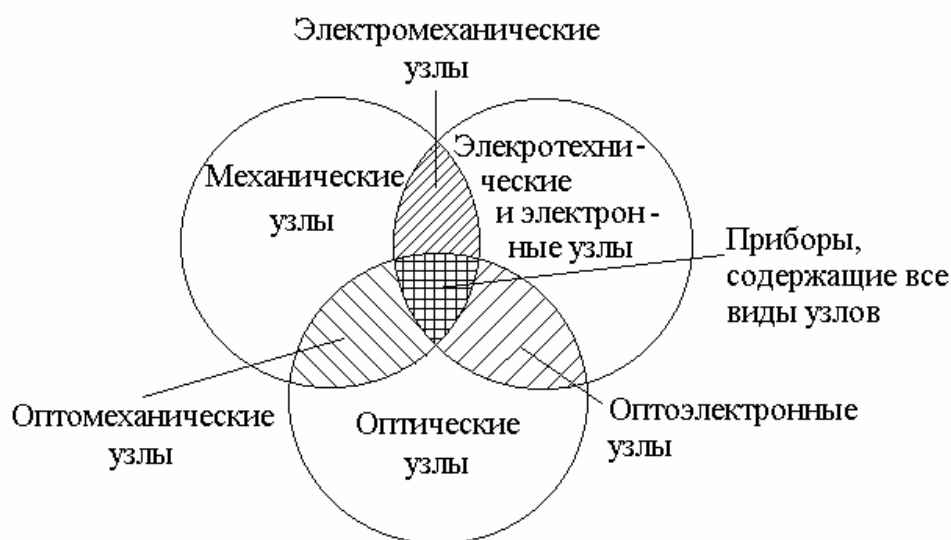


Рис. 1.1. Узлы приборов с различными физическими принципами

### 1.2. Классификация приборов

Все многообразие приборов можно объединить в следующие группы:

1. Приборы для обработки и преобразования различной информации: компьютеры, микропроцессорные системы, принтеры, сканеры, плоттеры, и т.д.
2. Приборы для техники связи: телефоны, факсы, пейджеры.
3. Приборы для измерительной техники – измерители массы, силы, давления, скорости, линейных и угловых размеров, температуры, тока, напряжения, мощности и других физических величин.
4. Приборы навигации, ориентации и стабилизации кораблей, самолетов, ракет и других подвижных объектов (гироскопы,

акселерометры, астрономические навигационные приборы и системы),

а также скважинные приборы (инклинометры). В настоящее время наиболее приоритетным направлением является разработка и применение навигационных приборов, работающих с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛО-НААС/ GPS).

5. Приборы для автоматизации технологических и производственных процессов. Чувствительные датчики (сенсоры). Приборы 3 и 5 групп взаимосвязаны, т.к. близки по построению.
6. Геодезические приборы и инструменты: теодолиты, нивелиры, дальномеры и др.
7. Приборы для кинотехники, аудио и видеотехники: магнитофоны, плееры, фотоаппараты, видео и кинокамеры и т.д.
8. Медико-биологические приборы, аппараты, системы и комплексы: искусственные сердце, почка и легкое; томографы; кардиографы, лазеры медицинского назначения, хирургические столы и др.
9. Технические игры: механические, электромеханические и радиоуправляемые игрушки, игровые автоматы и т.п.
10. Бытовые приборы: тостеры, стиральные машины, электрические плиты, микроволновые печи и др.

Во всех перечисленных группах приборов могут быть применены узлы, приведенные на рис. 1.1. В табл.1.1. приведены данные, характеризующие примерное соотношение механических, оптических и электронных узлов в различных типах современных приборов.

Таблица 1.1

**Доля механических (М), оптических (О), электрических и электронных (Э) узлов в современных приборах, %**

Приборные устройства	М	О	Э
Средства связи	15	10	75
Медицинское и лабораторное оборудование	40	20	40
Средства обработки данных	30	10	60

Из структуры современных приборов видно, что для их изготовления необходимы конструкционные материалы, обладающие специальными электрическими, магнитными, теплофизическими, оптическими и другими свойствами. Кроме того, следует учитывать тот факт, что приборы эксплуатируются не только в закрытых отапливаемых по-

мещениях, но и на открытых площадках, на наземных транспортных установках, на самолетах, ракетах, космических аппаратах, на речных и морских судах и подводных лодках, в скважинах на глубинах до 5 км, во всех добывающих и перерабатывающих сырье отраслях промышленности, в машиностроении и т.д. При эксплуатации приборы подвергаются воздействию высоких и низких температур, колебаниям температур, вибрациям, ударам и динамическим перегрузкам, воздействиям высокого и низкого давления, влажности, естественной и искусственной радиации, воздействию магнитных и электромагнитных и электростатических полей. Материалы, применяемые в приборах, должны обеспечить высокую надежность, требуемую точность и долговечность прибора во всех возможных условиях эксплуатации. Для изготовления приборов используются почти все элементы периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

### **1.3. Классификация материалов**

Классификация материалов – система соподчиненных понятий в области материаловедения, используемая для установления связей между группами материалов. Наибольшее значение в технике имеют классификации по структурным и функциональным признакам материалов.

#### **1.3.1. Классификация твердых материалов по структурному признаку**

Главным критерием классификации материалов по структурным признакам является агрегатное состояние, в зависимости от которого их подразделяют на следующие типы: твердые материалы, жидкости, газы, плазма.

С позиции материаловедения наиболее интересна классификация твердых материалов по структурному признаку [4], критерием которого является порядок в расположении частиц. На рис. 1.2 приведена классификация твердых веществ.



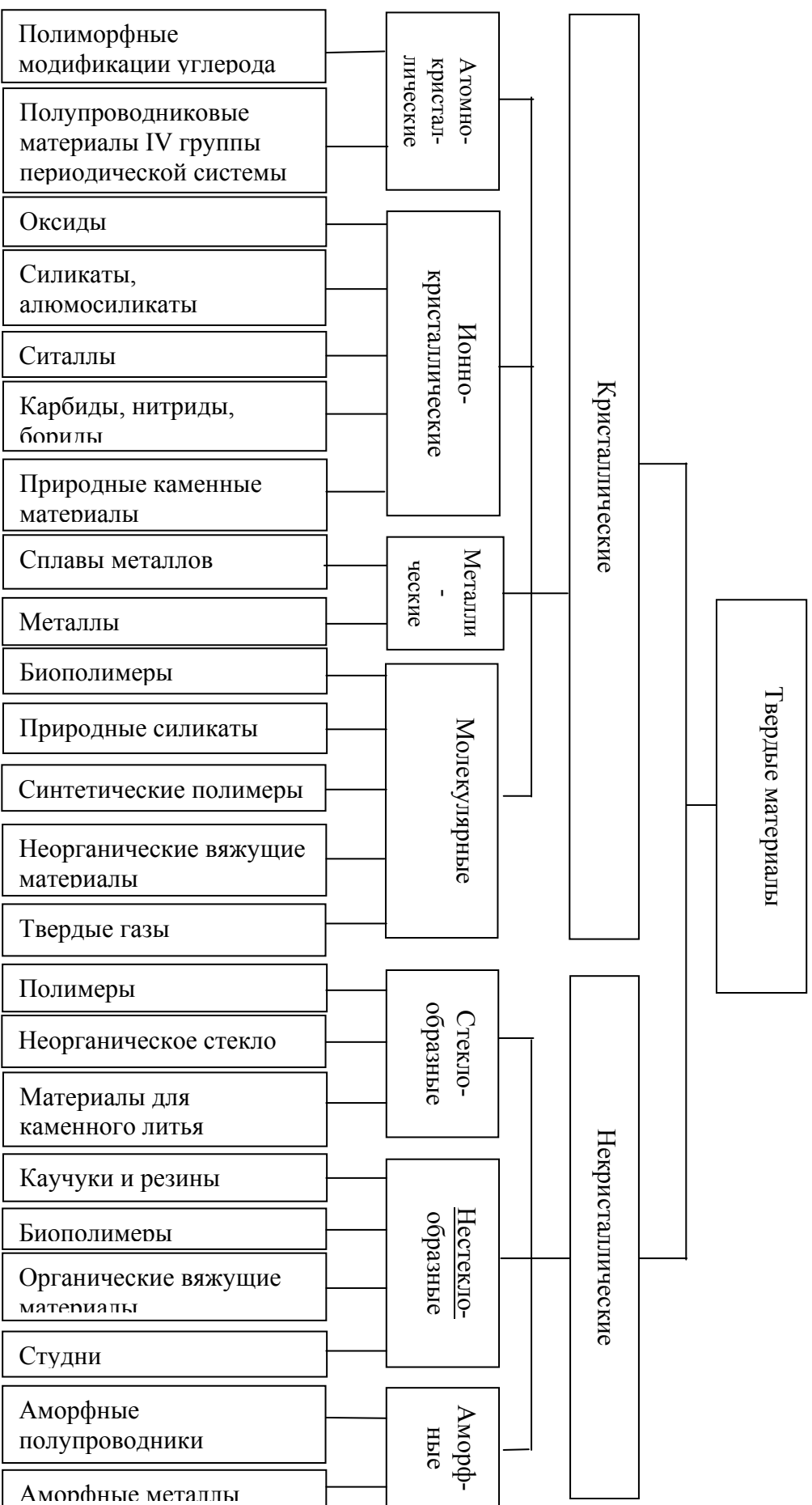


Рис. 1.2. Классификация твердых материалов по структурному признаку

Кристаллические материалы по виду связи между частицами подразделяют на атомные, ионные, металлические и молекулярные. Из атомно-кристаллических материалов, в структуре которых преобладают ковалентные связи, наибольшее значение в технике имеют полиморфные модификации углерода и полупроводниковые материалы на основе элементов IV группы периодической системы элементов. Типичными представителями первых является алмаз – самый твердый материал и графит – наиболее распространенный в земной коре и устойчивая модификация углерода со слоистой структурой. Полупроводниковые кристаллические германий и кремний являются основными материалами полупроводниковой электроники. В обширную совокупность ионно-кристаллических материалов, имеющих кристаллическую структуру с ионным типом связей, входят окислы металлов, которые являются составляющими руд, технологических присадок при плавке металлов, изделий, формируемых методами порошковой металлургии, а также бориды, карбиды, нитриды (соединения металлов с бором, углеродом, азотом), которые используют как компоненты твердых сплавов. Свойствами металлических кристаллов обладают более 80 химических элементов и множество сплавов.

Структура молекулярных кристаллов характерна для многих полимерных материалов, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся звеньев. Это биополимеры – высокомолекулярные природные соединения и их производные; синтетические полимеры, получаемые из простых органических соединений методами полимеризации и поликонденсации; неорганические полимеры, молекулы которых имеют неорганические главные цепи и не содержат органических боковых групп. К числу неорганических полимеров относят силикаты и вяжущие.

Некристаллические твердые материалы разделяют по признакам упорядоченности и стабильности структуры на аморфные, стеклообразные и полуразупорядочные нестеклообразные. Типичными представителями аморфных материалов являются аморфные полупроводники, аморфные металлы и сплавы.

В группу стеклообразных материалов входит ряд органических полимеров (полиметилметакрилат при температурах ниже 105 °С, поливинилхлорид – ниже 82 °С и другие), а также многие неорганические материалы – неорганическое стекло на основе оксидов кремния, бора, алюминия, фосфора и т.п.; многие материалы для каменного литья – базальты и диабазы со стеклообразной структурой,

металлургические шлаки, природные карбонаты с островной и цепочной структурой (доломит, мергель, мрамор и др.).

### **1.3.2. Классификация материалов по назначению**

В связи с конструктивными особенностями приборов наибольший интерес для приборостроителей представляют следующие классы материалов: конструкционные, электротехнические, триботехнические, инструментальные, технологические, медицинского и биологического применений.

Конструкционные – твердые материалы, предназначенные для изготовления деталей, подвергаемых механическому нагружению. К ним относятся: металлы, сплавы, керамика, пластмассы, композитные материалы (композиты). Из них делают валы, оси, корпуса и т.д.

Электротехнические – материалы, характеризующиеся особыми электрическими и магнитными параметрами и предназначенные для изготовления изделий, применяемых для производства, передачи, преобразования электроэнергии.

Триботехнические – материалы, предназначенные для применения в узлах трения с целью регулирования параметров трения и изнашивания, для обеспечения заданной работоспособности и ресурса этих узлов.

Инструментальные – отличаются высокими показателями твердости, износоустойчивости и прочности, они предназначены для изготовления режущего, мерительного, слесарно-монтажного и другого инструмента.

Технологические – это группа вспомогательных материалов, используемых для нормального протекания технологических процессов переработки основных технологических материалов или нормальной работы машин (азот, аргон, спирт, бензин, спирто-бензиновые смеси и другие, которые применяют для промывки деталей).

Материалы для биологического и медицинского применений – материалы для изготовления имплантантов, электродов, деталей и узлов биологических и медицинских аппаратов, материалы для хирургических инструментов и т.д.

## **2. Свойства материалов**

Работоспособность приборов в значительной мере зависит от свойств материалов. Ниже приведены данные структурной

обусловленности механических, тепловых, электрических, магнитных и технологических свойств материалов, приведены параметры свойств, используемые в технике при выборе материалов и прогнозировании работоспособности изделий.

## 2.1. Механические свойства материалов

В процессе работы механизмов приборов детали под действием нагрузок подвергаются деформированию. При определенных условиях деформации могут вызывать существенные нарушения в действии механизмов и даже поломки деталей. Деформацией тела называется изменение его первоначальной формы и размеров, возникающее под

внешним воздействием, в частности под действием внешних сил.

Деформация есть результат изменения межатомных расстояний в материале тела, она всегда сопровождается изменением сил межатомного взаимодействия. Принято различать следующие виды деформаций тела при разных способах нагружения: осевое растяжение и сжатие, изгиб, кручение, сдвиг. Перечисленные виды деформаций называются простыми. На рис. 2.1 приведена схема деформации изгиба консольно заземленной балки под действием нагрузки  $P$ . Величину смещения  $f$  конца балки под нагрузкой принято называть стрелой прогиба. Такой вид деформации в приборах испытывают плоские пружины, оси, зубья зубчатых колес, шестерен и т.д.

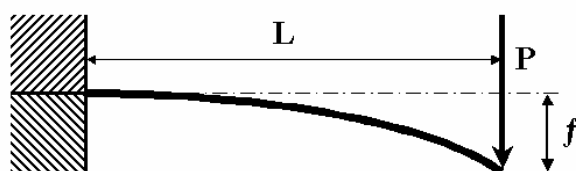


Рис. 2.1. Деформация изгиба консольной балки:  $L$  – длина балки,  $P$  – нагрузка,  $f$  – стрела прогиба балки

Многие детали механических систем под действием силовых нагрузок могут подвергаться одновременно нескольким видам деформаций. Деформацию называют упругой, если она исчезает после снятия нагрузки, или пластической, если она не исчезает (необратима).

### 2.1.1. Прочность материала

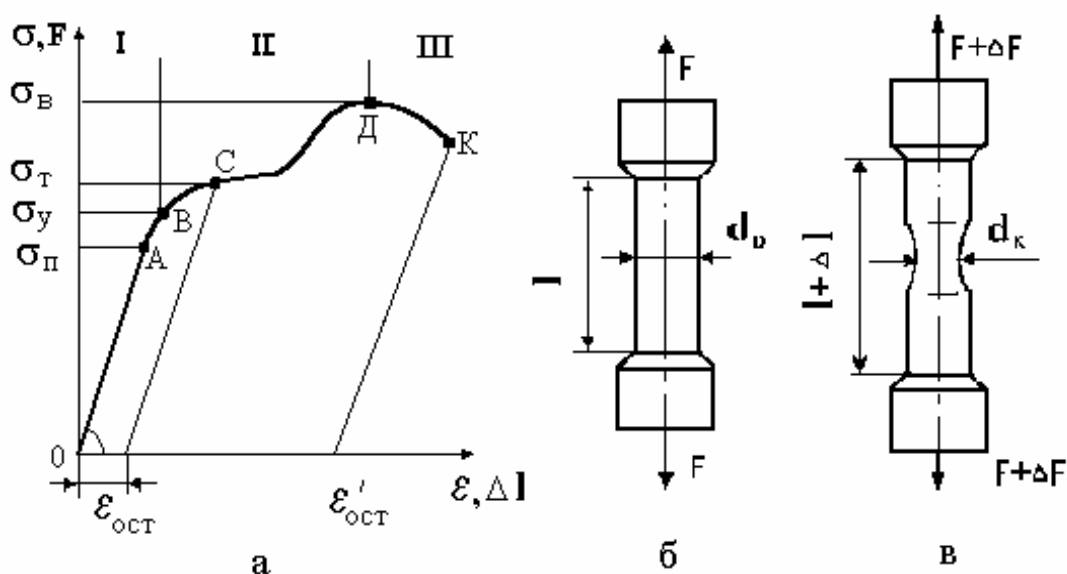
Прочность – свойство материалов сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок. Значения прочности материалов, полученные экспериментально, в 400 – 1000 раз меньше значений теоретической

прочности. Это обусловлено дефектами структуры материалов. Реальные материалы характеризуются технической прочностью, основные характеристики которой удобно рассмотреть с помощью диаграммы растяжения (рис.2.2, а) образца (рис.2.2, б) из пластичного материала.

Механические свойства основных материалов определяют при статических нагрузках. Статическими называют нагрузки, не изменяющиеся или изменяющиеся во времени медленно и плавно. Основными механическими характеристиками металлов и сплавов при статических нагрузках являются временное сопротивление  $\sigma_B$  или предел текучести  $\sigma_T$  ( $\sigma_{0,2}$ ). Временное сопротивление и предел текучести в данном случае – характеристики, являющиеся напряжениями. Напряжение определяется как отношение нагрузки к площади ее приложения

$\sigma = F/S$ , где  $S = \pi d^2/4$  – площадь поперечного сечения образца.

До определенного значения нагрузки образец пропорционально удлиняется, и после снятия нагрузки размер его восстанавливается. Но наступает момент, когда после удлинения образец так и остается



удлиненным.

Рис. 2.2. Зависимость нормального напряжения  $\sigma$  в образце от его относительного удлинения  $\epsilon$  при растяжении (а); размеры и форма образца при нагружении силой  $F$  (б) и при нагружении силой  $F + \Delta F$ , вызывающей текучесть материала (в);  $\Delta l$  – абсолютное удлинение;  $\epsilon$  – относительное удлинение;  $\sigma_{\Pi}$  – предел пропорциональности;  $\sigma_y$  – предел упругости;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $\sigma_B$  – предел прочности (временное сопротивление)

При дальнейшем росте нагрузки от  $F$  до  $F + \Delta F$  и при удлинении образца от  $l$  до  $l + \Delta l$  на его цилиндрической части образуется утонение или шейка (рис. 2.2, в). Принято говорить, что в этом месте материал “течет”. При росте нагрузки диаметр поперечного сечения образца в шейке уменьшается, затем наступает момент (рис. 2.2, а), когда материал разрушается (точка К).

При первоначальном нагружении образца кривая проходит через точки А, В, С (рис. 2.2, а). В случае полной разгрузки образца из пластичного материала, прошедшего зону текучести (точка С), в нем наблюдается остаточная деформация  $\varepsilon_{\text{ост}}$ . При повторном нагружении образца характеристика идет по линии  $O'S$ . Разгрузка после нагружения также идет по линии  $SC'$ ). В результате чего предел пропорциональности повышается. Это явление называется наклепом и используется для увеличения прочности материала.

$\sigma_{\text{п}}$  – предел пропорциональности – напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между напряжением и деформацией достигает некоторого значения, установленного техническими условиями. Эта характеристика является верхней границей области напряжений, где реализуется закон Гука.

$\sigma_{\text{у}}$  – предел упругости – напряжение, при котором остаточные деформации достигают значения, установленного техническими условиями. Обычно допуск на остаточную деформацию составляет  $\varepsilon_{\text{ост}} = 10^{-3} \div 10^{-2} \%$ .

$\sigma_{\text{т}}$  – предел текучести – напряжение, соответствующее нижнему положению площадки текучести на диаграмме (рис. 2.2, а) для материалов, разрушению которых предшествует пластическая деформация. Обычно остаточная деформация не превышает 0,2 %. Тогда условный предел текучести обозначается  $\sigma_{0,2}$ .

$\sigma_{\text{в}}$  – *предел прочности* (временное сопротивление или разрушающее напряжение). Остаточная деформация при разрыве для пластичных материалов  $\varepsilon_{\text{ост}} > 5 \%$ .

На диаграмме (рис. 2.2, а) можно выделить три области: I – область упругой деформации; II – область пластической деформации; III – область развития трещин и разрушения.

Рассмотренная характеристика справедлива для пластинчатых материалов, к которым относятся, например, алюминий, сталь, медь и их сплавы.

Предел прочности  $\sigma_{\text{в}}$  – основная характеристика механических свойств хрупких материалов, т.е. материалов, которые разрушаются при

малых пластических деформациях (рис. 2.3). К хрупким материалам можно отнести чугун, керамику. В точке Д – разрыв материала. Остаточная деформация при разрыве для хрупких материалов  $\varepsilon_{\text{ост}} < 5\%$ .

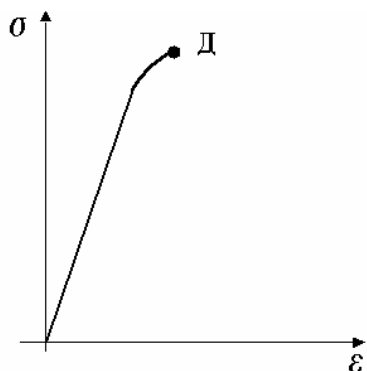


Рис. 2.3. Диаграмма растяжения хрупкого материала

Как отмечалось выше, до точки А диаграммы рис. 2.2, а существует пропорциональная зависимость между напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $\varepsilon = \sigma/E$ , где  $E$  – модуль упругости первого рода или модуль Юнга. Или  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ,  $E = \tan \alpha$ , где  $\alpha$  – угол наклона характеристики. Закон Гука может быть записан в виде  $\Delta l = \frac{F \cdot l_0}{E \cdot S}$ , где  $F$  – нагрузка;  $\Delta l$  – деформация;  $S$  – площадь поперечного сечения;  $E$  – модуль Юнга;  $l_0$  – начальная длина образца.

### 2.1.2. Твердость материала

Твердость – свойство материалов оказывать сопротивление пластичной деформации при контактом воздействии в поверхностном слое. В зависимости от способа внедрения в образец более твердого тела – индентора, твердость материалов оценивается по различным критериям (рис. 2.4), используя несколько методов. Наибольшее распространение получили три группы методов: вдавливание



индентора, динамические методы, царапание.

В условиях приборостроительного или машиностроительного предприятия чаще всего применяют методы вдавливания индентора. В этой группе методов в качестве индентора могут применяться разные тела (шарик, призма, пирамида).

Название метода	Форма индентора
Метод Бринелля	шарик
Метод Роквелла	конус, шарик
Метод Виккерса	алмазная пирамидка

### Метод Бринелля (ГОСТ 9012 – 59, действует)

Стальной шарик вдавливается в поверхность образца. По диаметру отпечатка судят о твердости HB (рис. 2,5). Рассчитать значение твердости по Бринеллю можно по формулам:

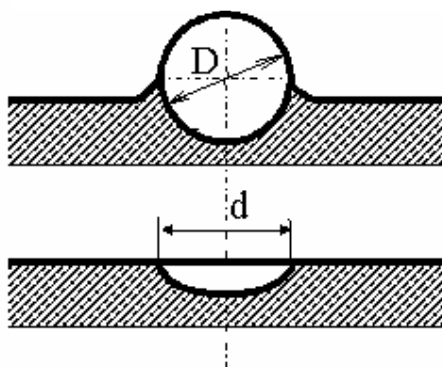


Рис. 2.5. Схема метода Бринелля

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2P}{\pi D \cdot \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)},$$

когда нагрузка  $P$  выражена в Ньютонах, и

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)},$$

когда  $P$  выражена в килограммах.

Диаметр шарика может быть

равным: 2,5 мм; 5мм; 10мм.

Условное обозначение твердости по Бринеллю – HB 170 10 / 3000 / 10.

Это означает, что твердость 170, диаметр шарика 10 мм, нагрузка – 3000 кг, время выдержки – 10 секунд.

### Метод Роквелла (ГОСТ 9013 – 59, действует)



По этому методу определяется глубина вдавливания индентора (рис. 2.6). При нагрузке  $P_0 = 10$  кг измеряют по шкале прибора глубину проникновения индентора –  $h_0$ ; затем прикладывают нагрузку  $P_1 = 50$  кг; измеряют глубину  $h$  при действии суммарной нагрузки  $P = 60$  кг.

Предварительную нагрузку дают для того, чтобы показатели твердости соответствовали структурному состоянию основного тела детали, поскольку свойства поверхности всегда отличаются от свойств сердцевины. Вот почему вычисляют глубину, на которую внедрится наконечник под действием силы  $P_1$ , т.е. на величину  $h - h_0$ . При под-

счете твердости по Роквеллу за единицу берут углубление наконечника после усилия  $P_0$  на величину, равную 0,002 мм. Число твердости по Роквеллу рассчитывается по формуле

$$HR = N - \frac{(h - h_0)}{0,002},$$

где  $N$  – число делений на шкале указателя прибора (твердомера) Роквелла, 0,002 мм – цена деления шкалы прибора.

Для удобства использования замеров твердости разных металлов на приборе имеется три шкалы: А, В и С. В зависимости от формы индентора и значений нагрузок вдавливания к символу HR добавляют буквы А, В или С: HRA – конус, HRC – конус, HRB – шарик. Всего делений  $N$  на шкалах А и С нанесено 100, а число делений  $N$  на шкале

В – 130 (при испытании шариком).

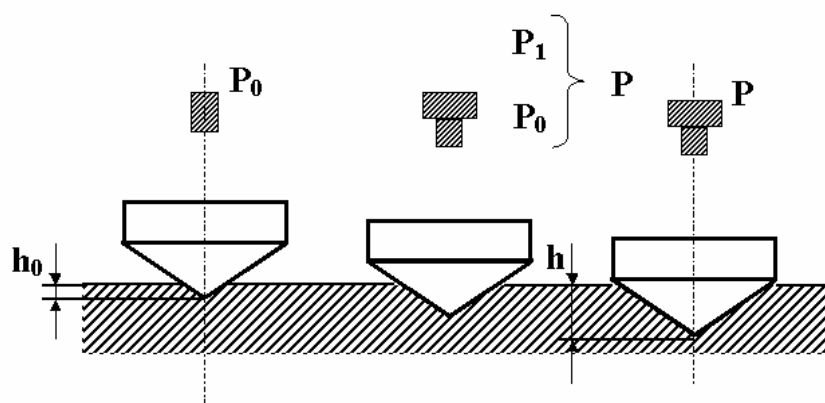
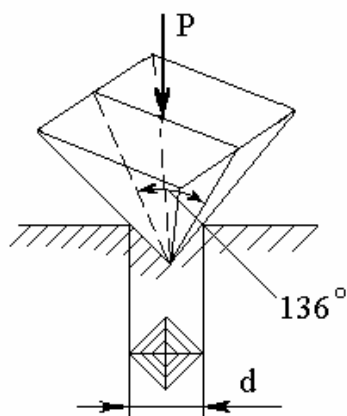


Рис. 2.6. Схема метода Роквелла



## Метод Виккерса

(ГОСТ 2999 – 75, действует)

Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды, в образец под действием нагрузки  $P$  и измерении диагонали отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки.

Рис. 2.7. Схема метода Виккерса

Нагрузка  $P$  может меняться от 9,8 до 980 Н. Значение твердости по Виккерсу может быть рассчитано по формуле  $HV = 0,189 \cdot \frac{P}{d^2}$ ,  $P$  выражена в Н.

### 2.1.3. Динамическая прочность

Динамическая прочность – сопротивление материалов динамическим нагрузкам, т.е. нагрузкам, значение, направление и точка приложения которых быстро изменяются во времени. Под действием динамических нагрузок (удара, взрыва и т.п.) деформирование материалов имеет специфические черты.

Запаздывание текучести – это явление, которое характеризуется тем, что при мгновенном приложении нагрузки, вызывающей текучесть при статическом нагружении, пластическая деформация наступает не сразу, а по истечении некоторого промежутка времени – так называемого периода западания текучести. Если нагрузку снять до этого времени, остаточная деформация не возникает, т.е. материал деформируется упруго.

Вследствие запаздывания текучести пластичные при статическом нагружении материалы могут разрушаться хрупко под действием

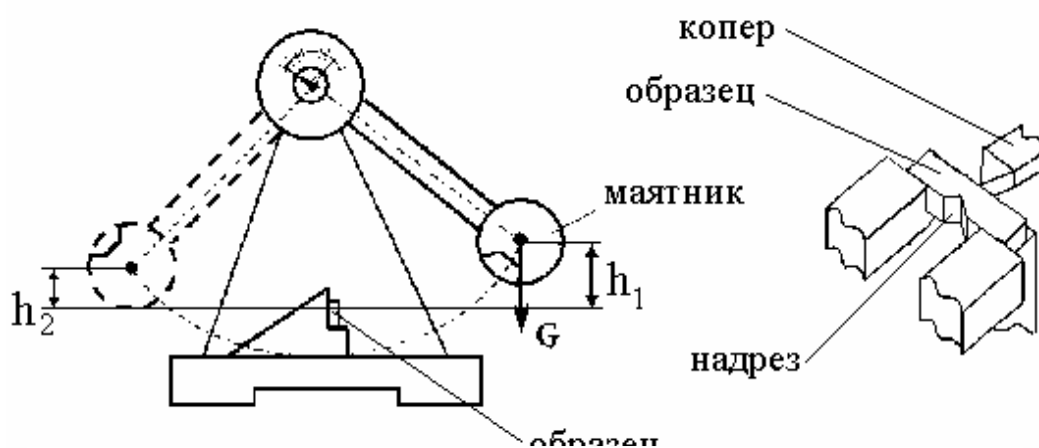


Рис. 2.8. Схема маятникового копра (а), испытания на удар (б)

ударных нагрузок. Для оценки склонности материалов к запаздыванию текучести введена специальная характеристика – ударная вязкость, измеряемая работой разрушения надрезанного образца при ударном изгибе на маятниковом копре (рис. 2.8). Определяется высота подъема маятника до и после удара. В образце заранее делается надрез (концентратор напряжения) различного рода. После удара образец разрушается. Работа, затрачиваемая на разрушение образца  $K = G \cdot (h_1 - h_2)$ , где:  $h_1$  – высота подъема маятника до удара,  $h_2$  – высота подъема после удара. В соответствии с ГОСТ 9454 – 78 и ГОСТ 4647 – 80 образцы имеют надрезы по форме V, U, Т- образные (рис. 2.9).

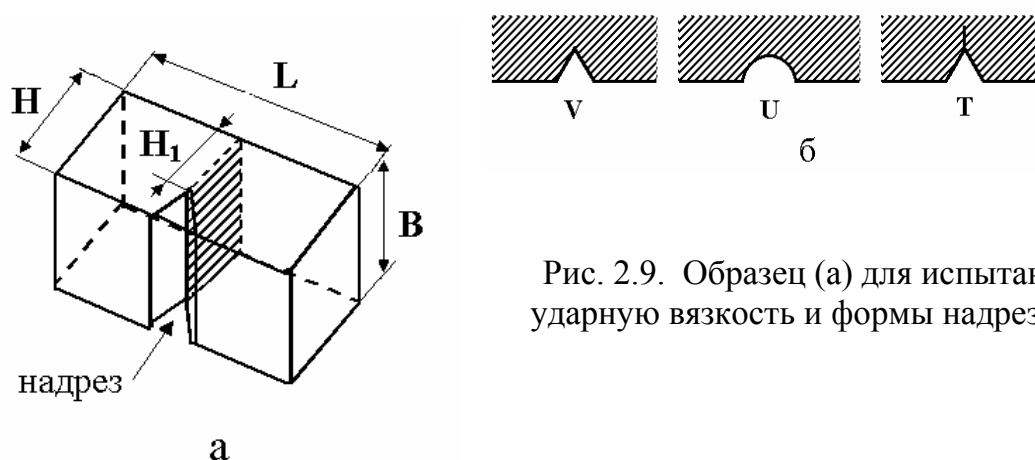


Рис. 2.9. Образец (а) для испытания на ударную вязкость и формы надрезов (б)

Ударная вязкость – полная работа удара, вызвавшего разрушение образца, отнесенная к площади его сечения  $K_C = K/S$ , Дж/м<sup>2</sup>,  $S = H_1 \cdot B$  – площадь поперечного сечения.

#### *Пример обозначения ударной вязкости*

КСТ<sup>+100</sup>150/3/7,5, где Т – вид надреза; +100 – температура, °С; 150 – энергия удара, Дж; 3 – глубина надреза; 7,5 – ширина образца, мм.

Испытание на ударный изгиб при  $t = -100 \dots -269$  °С производят по ГОСТ 22848 – 77.

### **2.1.4. Усталость материала**

Детали механизмов, подвергающиеся длительное время повторно-переменным нагрузкам, в ряде случаев внезапно разрушаются при напряжениях, лежащих ниже предела упругости. Это явление названо усталостью материалов.

Усталость материала – изменение механических и физических свойств металлов под длительным воздействием циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций, приводящее их к разрушению. Циклическими называют нагрузки, повторяющиеся через определенные короткие промежутки времени. Усталостное повреждение материала вначале проявляется в изменении плотности дислокаций и концентрации вакансий, образовании линий скольжения, локальных напряжений, искажении микрогеометрии свободной поверхности образца, изменении плотности. На следующей стадии накопление повреждений оценивают скоростью прорастания микротрещин и уменьшением сопротивления материала статическому нагружению. Свойство материала противостоять усталости называют выносливостью.

### **2.1.5. Триботехнические характеристики материалов**

Триботехнические характеристики материалов содержат информацию об эффективности их применения в узлах трения. До недавнего времени специалисты машиностроения не относили эти характеристики к числу основных механических характеристик материалов. С 50 - х годов прошлого столетия проблемы триботехники, под которой понимают совокупность технических средств, обеспечивающих оптимальное функционирование узлов трения, считают одними из важнейших в машиностроении, и особенно, в приборостроении.

Основные термины триботехники. Внешнее трение – сопротивление относительному перемещению двух соприкасающихся тел в плоскости их касания, сопровождаемому расходом энергии. Изнашивание – процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в изменении размеров и формы тела. Износ – результат изнашивания. Смазывание – действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность изнашивания.

Основные триботехнические характеристики материалов – износостойкость, прирабатываемость и коэффициент трения.

Износостойкость – свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Значение износа выражают в единицах длины, объема или массы. Отношение значения износа  $U$  к интервалу времени  $\tau$ , в течение которого он возник,

представляет собой скорость изнашивания  $V = U/\tau$ . На графике зависимости износа от времени изнашивания (рис.2.10) можно выделить три участка, соответствующие трем стадиям изнашивания: I – начальное изнашивание, наблюдаемое в процессе приработки узлов трения; II – установившееся (нормальное) изнашивание, для которого характерна небольшая и постоянная скорость изнашивания; III – резкое возрастание скорости изнашивания (катастрофическое изнашивание).

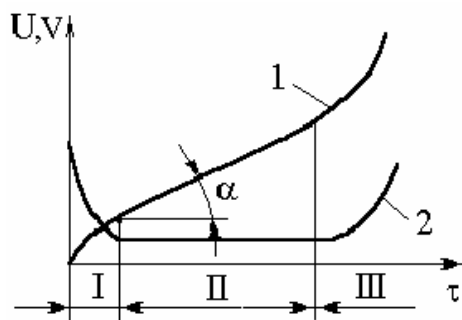


Рис.2.10. Изменение износа  $U$  (1) и скорости изнашивания  $V$  (2) во времени  $\tau$

Прирабатываемость – свойство материала уменьшать силу трения, температуру и интенсивность изнашивания в процессе приработки. Коэффициент трения – отношение силы трения двух тел к нормальной силе, прижимающей эти тела друг к другу.

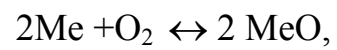
### 2.1.5. Сопротивление материалов коррозии

Процессу коррозии наиболее подвержены металлы и сплавы, что объясняется их большой химической активностью и высокой электропроводностью.

Коррозией металлов называют самопроизвольное разрушение металлических материалов вследствие химического и электрохимического взаимодействия их с окружающей средой. При этом часто металлы покрываются продуктами коррозии (ржавеют). В результате воздействия внешней среды механические свойства металлов резко ухудшаются, иногда даже при отсутствии изменения внешнего вида поверхности. Различают химическую коррозию, протекающую при воздействии на металл газов (газовая коррозия) и диэлектриков (нефть и ее производные), и электрохимическую коррозию, вызываемую действием электролитов: кислот, щелочей и солей.

*Химическая коррозия* протекает в сухих газах или жидких электролитах. В большинстве случаев это сухой воздух, углекислый

газ, сухой водяной пар и чистый кислород. При химической коррозии поверхность металла окисляется



где Me – металл, O – кислород.

В результате реакции образуется окисел. В полезных ископаемых металлы находятся, как правило, в виде окислов (кроме золота). Металлургия затрачивает значительное количество энергии для раскисления металлов и получения пригодных для промышленности металлических материалов. А при коррозии протекают обратные процессы. Причем окисел – термодинамически значительно более устойчивая система. Таким образом, коррозия является естественным процессом, поскольку каждое вещество стремится к исходному состоянию как к более стабильному с энергетической точки зрения.

Например, процесс коррозии железа, находящегося в стали, можно записать следующим образом



Как видим, в реакции принимают участие кислород воздуха и влага. Окислы железа имеют бурый цвет. Алюминий, окисляясь, образует соединение  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Продукты коррозии алюминиевых сплавов имеют беловато-серый порошкообразный вид.

Электрохимическая коррозия развивается во влажной атмосфере, морской и речной воде. При этом жидкость выполняет роль электролита. К электрохимической коррозии относятся также атмосферная и почвенная коррозия. Механизм электрохимической коррозии сводится к следующему. Если в электролит поместить два соприкасающихся различных металла, то образуется гальванический элемент. При этом металл который легче отдает электроны, служит анодом, а другой – катодом. В процессе работы гальванического элемента анод разрушается.

Электрохимическая коррозия может протекать в атмосфере, поскольку в ней всегда содержится влага. Такой вид электрохимической коррозии называется атмосферной. На интенсивность коррозии влияет температура. Чем она выше, тем скорость коррозии больше. Наиболее сильную коррозию вызывает тропический климат. Сильно загрязненная многочисленными выбросами промышленных предприятий (сернистым газом, хлоридами, аммиаком, оксидами азота и др.) атмосфера становится коррозионно-агрессивной средой. Большое значение имеет состояние поверхности металла. При более грубой обработке скопление влаги увеличивается, создаются благоприятные условия для образования микрогальванических коррозионных элементов.

Коррозионное повреждение различных участков материала может быть неодинаковым. По характеру разрушения материалов различают равномерную и местную коррозию. Последняя возникает

из-за химической или физической неоднородности среды и материала на отдельных участках поверхности детали. Разновидностями местной коррозии является питтинговая, межкристаллитная, щелевая и контактная коррозии. Очаги питтинговой коррозии в начальной стадии имеют вид точек, а в развитом состоянии – коррозионных язв. Межкристаллитная коррозия локализована на границах микроструктурных зерен материала. Вследствие разрушения связей между зернами резко снижается прочность материала. Склонность материалов к этому виду коррозии, как правило, появляется в результате нагревания, вызывающего микроструктурные превращения по границам зерен. Межкристаллитную коррозию металлов, происходящую вблизи сварных швов, называют ножевой. К местной коррозии также относят коррозионно-механические повреждения металлов.

Сопротивление материалов коррозии характеризуется с помощью параметра коррозионной стойкости – величины, обратной технической скорости коррозии материала в данной коррозионной системе.



## **2.2. Теплофизические характеристики материалов**

Параметры, отражающие изменение свойств материалов в зависимости от их температуры, являются одними из важнейших характеристик материалов. Так прецизионные (высокоточные) гироскопические приборы [8], работающие при температурных колебаниях, могут быть получены только из материалов, имеющих малый и близкий по значению коэффициент температурного линейного расширения. В противном случае произойдет разбалансировка подвижных частей и, как следствие, потеря точности. Для нормальной работы электронных устройств необходимо отводить тепло от теплонапряженных элементов (полупроводниковых интегральных микросхем, транзисторов, микросборок и др.).

Основными теплофизическими характеристиками материалов являются жаростойкость, жаропрочность, хладноломкость, тепловое расширение, теплоемкость, теплопроводность.

### **2.2.1. Жаростойкость**

Жаростойкость – свойство материала сопротивляться химическому разрушению поверхности под действием сред при повышенной температуре. В качестве характеристики жаростойкости легкоплавких материалов используют температуру размягчения.

Для пластмасс ее определяют по способу Мартенса (ГОСТ 21341 – 75) как температуру, при которой образец, нагреваемый с установленной скоростью, под действием постоянного изгибающего момента деформируется на заданную величину. Для легкоплавких кристаллических материалов, подобных воскам, характеристикой жаростойкости является температура плавления.

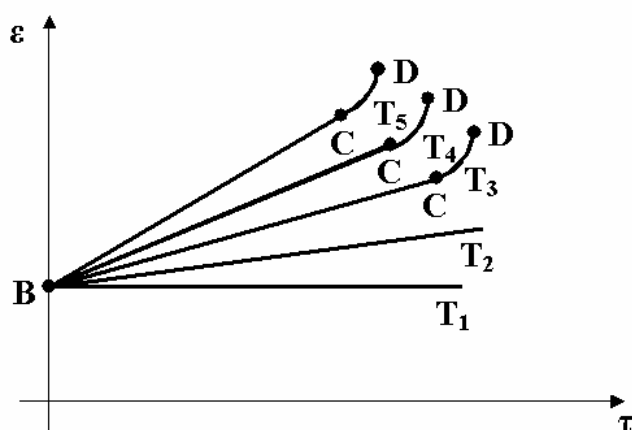
Характеристикой для газов (паров) является температура вспышки – температура, при которой пары жидкости образуют смесь с воздухом, вспыхивающую при контакте с источником зажигания, например, с газовой горелкой. Температуру, при которой материал воспламеняется и после удаления газовой горелки продолжает гореть не менее 5 с, считают температурой вспышки.

### **2.2.2. Жаропрочность**

Жаропрочность – способность материалов длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при высоких температурах. Жаропрочность характеризуется комплексом свойств, включающих длительную прочность и сопротивление материала ползучести [4]. Оценка жаропрочности важна для материалов,

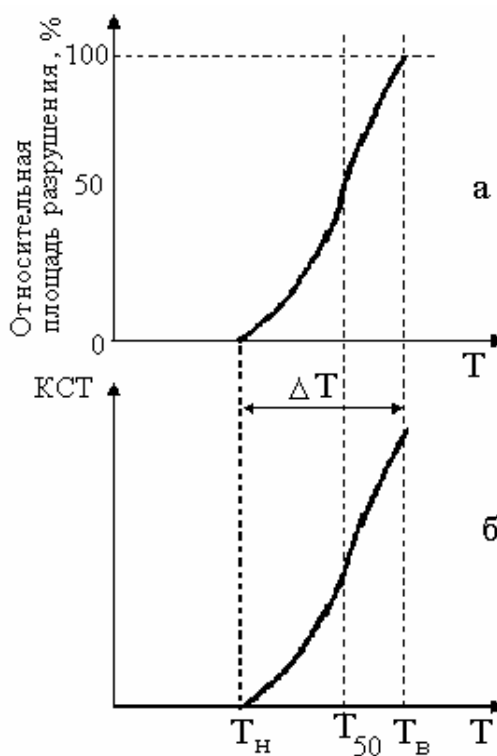
эксплуатируемых при  $T > 0,3 T_{\text{пл}}$  ( $T_{\text{пл}}$  – температура плавления). Такие условия имеют место в двигателях внутреннего сгорания, паросиловых установках, металлургических печах и т.д. В результате длительного нагружения при высоких температурах в материалах развиваются процессы ползучести (рис. 2.11). При повышении температуры в образцах с одинаковыми напряжениями заметно сокращается продолжительность стадии с установившейся ползучестью ВС и ускоряется разрушение (D).

Рис. 2.11. Зависимость ползучести параметров от температуры при постоянном напряжении  $\tau$ .  
 $T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5$



Хладноломкость – возрастание хрупкости материалов при понижении температуры. Склонность материала к хрупкому разрушению определяют по результатам ударных испытаний образцов с надрезом при понижении температуры.

Рис. 2.12. Зависимость относительной площади вязкого разрушения в изломе образцов (а) ударной вязкости (КСТ) материала (б) от температуры:  $\Delta T$  – порог хладноломкости; КСТ – коэффициент ударной вязкости;  $W$  – работа развития трещины



На рис. 2.12 видно, что при температурах ниже  $T_b$  (граничное значение температуры вязкого разрушения) наступает переход от вязкого разрушения к хрупкому и наблюдается резкое снижение ударной вязкости образцов. При температуре  $T_n$  КСТ = 0, т.е. для разрушения образцов не требуется энергии удара.  $T \geq T_b$  – граница вязкого разрушения – структура излома волокнистая, матовая.

Порог хладноломкости – интервал температур  $\Delta T = T_b - T_n$ , в котором происходит переход от вязкого разрушения к хрупкому разрушению образцов. Иногда его характеризуют температурой  $T_{50}$ , при которой величина КСТ снижается наполовину, а в изломе образцов наблюдается равенство площадей, соответствующих хрупкому и вязкому разрушению.

### 2.2. 3. Тепловое расширение материалов

Тепловое расширение материалов регистрируют по изменению размеров и формы образцов при изменении температуры. У газов оно обусловлено увеличением кинетической энергии частиц при нагревании, у жидкостей и твердых материалов связано с несимметричностью тепловых колебаний атомов, благодаря чему межатомные расстояния с ростом температуры увеличиваются.

*Количественно тепловое расширение материалов характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения:*

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \left( \frac{\Delta V}{\Delta T} \right)_{\xi},$$

*а твердых материалов и температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР):*

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \left( \frac{\Delta l}{\Delta T} \right)_{\xi},$$

где  $\Delta V$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta T$  изменения объема, линейного размера и температуры, соответственно. Индекс  $\xi$  обозначает условия теплового расширения (обычно – при постоянном давлении). Значения ТКЛР ( $\alpha$ ) для некоторых материалов для интервала температур  $0 \dots 100$  °С приведены в табл. 2.2.

Важность учета ТКЛР можно уяснить на следующем примере. При изготовлении гермовводов, применяемых для передачи электроэнергии на границе двух сред (воздух – вакуум), очень важно обеспечить герметичность. Если взять в качестве материала токопроводящего стержня, например, алюминий, то при остывании расплавленного стекла в форме при изготовлении гермоввода (рис.

2.13) в нем могут возникать трещины, которые станут каналом разгерметизации. Для исключения брака при производстве гермовводов необходимо подобрать материалы с близким ТКЛР. Наиболее близким стеклу по ТКЛР материалом является платино-иридиевый сплав. Следует иметь в виду, что не все марки стекол имеют с платино-иридиевым сплавом близкий к ТКЛР. На практике для изготовления герметичных токовводов применяют стекло СЧ9 – 2 и сплав 29НК (Н29К18 ковар).

Таблица 2.2  
Значения ТКЛР ( $\alpha$ ) для  
некоторых веществ

Материал	$\alpha \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Инвар	1,5
Фарфор	3,0
Платина	9,0
Сталь	11,7
Никель	13,0
Золото	14,2
Нихром	18
Латунь	18,4
Алюминий	23,8
Полистирол	75
Полиэтилен	200
Стекло	8,1
Платино-иридиевый сплав	8,3

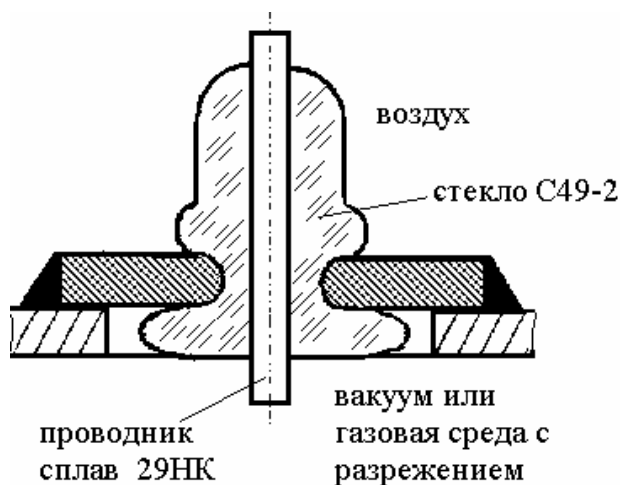


Рис. 2.13. Гермоввод

#### 2.2.4. Теплоемкость

Теплоемкость – отношение количества теплоты  $Q$ , полученной телом при бесконечно малом изменении его состояния в каком-либо процессе, к вызванному последним приращению температуры.

$$C = \frac{dQ}{dT}.$$

Удельная теплоемкость – отношение теплоемкости к массе (Дж/кг).

### 2.2.5. Теплопроводность

Теплопроводность – перенос энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц. Эта величина обуславливает выравнивание температуры тела в отсутствии макроскопического перемещения его участков. Для изотропных материалов справедлив закон Фурье, согласно которому вектор плотности теплового потока  $q$  пропорционален и противоположен по направлению градиенту температуры  $T$ :  $q = -\lambda \text{ grad}T$ ,

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (Вт/ (м·К)), зависящий от агрегатного состояния, атомно-молекулярного состояния, структуры, температуры и других параметров материала.

Значения теплопроводности  $\lambda$  для некоторых материалов приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

**Значения теплопроводности  $\lambda$  для некоторых материалов**

Материал	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Материал	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)
Хорошие проводники тепла		Плохие проводники тепла	
Серебро	407	Стекло	0,7
Медь	384	Вода	0,58
Золото	308	Теплоизоляторы	
Алюминий	209	Асбест	0,4 - 0,8
Латунь	111	ПВХ	0,17
Платина	70	Кожа	0,15
Сталь	47	Дерево	0,1 – 0,2
Свинец	35	Пробка	0,05
Плохие проводники тепла		Стекловата	0,05
Ртуть	8,2	Пенопласт	0,04
Мрамор	2,8	Воздух	0,034
Лед (0 °С)	2,23	Перо	0,02
Бетон	0,7 – 1,2	Вакуум	0,00

## 2.3. Электрические свойства материалов

В электротехнических и электронных узлах приборов применяют проводниковые, полупроводниковые, электроизоляционные, магнитные и другие материалы. Для эффективного их применения необходима информация о параметрах электрических, магнитных и других специфических свойств.

### 2.3.1. Электропроводность

Электропроводность – свойство материалов проводить электрический ток, обусловленное наличием в них заряженных частиц – носителей тока. Электрическое сопротивление – свойство материалов как проводников противодействовать электрическому току. Природу электропроводности твердых материалов объясняет зонная теория – квантовая теория энергетического спектра электронов в твердых телах, согласно которой этот спектр состоит из чередующихся зон разрешенных и запрещенных энергий. Согласно этой теории можно выделить три группы материалов: проводники, полупроводники и диэлектрики. У проводников запрещенная зона отсутствует, у полупроводников она не превышает 3,5 В, у диэлектриков она составляет десятки киловольт.

Электрическое сопротивление материалов характеризуется удельным электрическим сопротивлением:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}; \quad \text{Ом} \cdot \text{м} \text{ или } \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}},$$

где  $R$  – электрическое сопротивление;  $S$  – площадь поперечного сечения образца;  $l$  – длина образца.

Удельное электрическое сопротивление проводников и непроводников зависит от температуры. Сопротивление металлических проводников увеличивается с повышением температуры. У полупроводников сопротивление сильно уменьшается при повышении температуры.

У некоторых материалов при температуре, близкой к абсолютному нулю, сопротивление скачком уменьшается до нуля (явление сверхпроводимости). Сопротивление константана (60%Cu, 40%Ni) и манганина (86%Cu, 2%Ni, 12%Mn) очень слабо зависит от температуры:

$$\rho_t = \rho_{20} \left[ 1 + \alpha (t - 20^\circ \text{C}) \right],$$

где  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление при  $t = 20^\circ \text{C}$ ,

$\rho_t$  – удельное электрическое сопротивление при температуре  $t$ ,  
 $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления.

### 2.3.2. Пробой диэлектрика

Любой диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойство электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название пробоя диэлектрика или нарушения его электрической прочности.

Значение напряжения, при котором проходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля – пробивной напряженностью  $E_{пр}$  и измеряется чаще всего в киловольтах.

Пробивная напряженность определяется величиной пробивного напряжения, отнесенного к толщине диэлектрика в месте пробоя

$E_{пр} = U_{пр} / h$ , кВ/мм, где  $h$  толщина диэлектрика в мм.

Пробой газов обуславливается явлением ударной и фотоионизации. В однородном поле пробой газа наступает внезапно, в неоднородном поле пробой предшествует явление короны. Пробой твердых тел может вызываться как электрическими, так и тепловыми процессами, возникающими под действием поля.

Если сплошной цилиндр из оргстекла поместить между двумя соответствующим образом выполненными электродами (рис. 2.14) высоковольтной установки, то при пробивном напряжении происходит образование каналов проводимости (пробой) в цилиндре, напоминающих по структуре дерево. Для полиметилметакрилата (оргстекло) пробивная напряженность  $E_{пр} = 15 - 25$  кВ/мм.

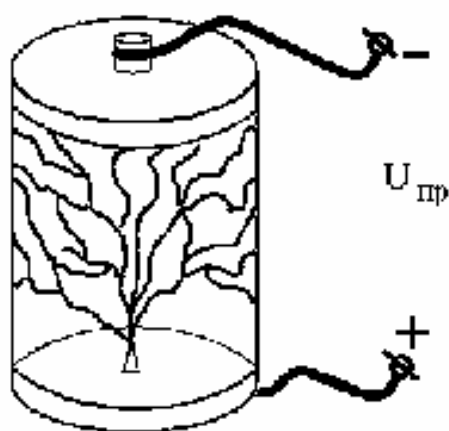


Рис. 2.14. Каналы проводимости при пробое сплошного цилиндра из оргстекла

## 2.4. Магнитные свойства материалов

### 2.4.1. Намагниченность

Все вещества, помещенные во внешнее магнитное поле, намагничиваются. Характеристикой намагничивания материалов служит намагниченность, равная суммарному магнитному моменту атомов в единице объема материала. Для однородного намагниченного материала намагниченность

$$\vec{J} = \frac{\vec{M}}{V},$$

где,  $M$  – магнитный момент,  $V$  – объем образца.

Магнитный момент – векторная величина, характеризующая вещество, как источник магнитного поля. Для одного атома магнитный момент складывается из векторов орбитальных и собственных (спиновых) моментов электронов, принадлежащих атому.

Магнитная восприимчивость  $k_m = \frac{J}{H}$ , где  $H$  – напряженность намагничивающего поля. В зависимости от знака и значения  $K_m$  все материалы делятся на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Диамагнетизм – свойство материалов намагничиваться во внешнем магнитном поле в направлении противоположном полю. Примеры диамагнетиков: Cu, Ag, Hg, Bi.  $K_m = - (10^{-6} \dots 10^{-5})$ . Они незначительно ослабляют магнитное поле.

Парамагнетики (Pt, воздух, Al) – обладают положительной магнитной восприимчивостью, поле в них лишь незначительно возрастает.  $K_m = (10^{-6} \dots 10^{-3})$ . Они слабо намагничиваются по направлению магнитного поля, а в отсутствии поля немагнитны.

*Ферромагнетики* (Fe, Ni, Co, Cr, Mn) – характеризуется большим значением магнитной восприимчивости ( $K_m \gg 1$ ) и ее нелинейной зависимостью от напряженности магнитного поля и температуры. Ферромагнетики используются для создания магнитопроводов электрических машин и аппаратов (железо, пермаллой, викаллой, ферриты, электротехнические стали), для изготовления магнитных носителей компьютеров, магнитных экранов, постоянных магнитов.

Схематическое изображение магнитной упорядоченности материалов приведено на рис.2.15.

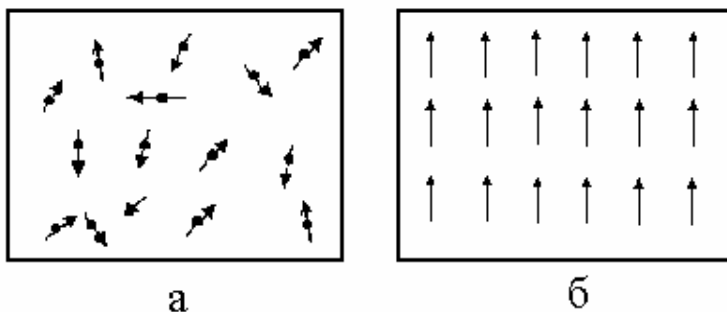




Рис. 2.15. Схема магнитного упорядочивания атомов:

а – в парамагнетиках, б – в ферромагнетиках

Основной характеристикой магнитного поля является индукция. Индукция – результирующее магнитное поле в веществе.

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}), \quad \text{Тл}$$

где  $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}$  – магнитная постоянная,  $\vec{J}$  – намагниченность вещества;  $\vec{H}$  – напряженность внешнего магнитного поля.

#### 2.4.2. Намагничивание ферромагнетика

При намагничивании ферромагнетика в изменяющемся магнитном поле обнаруживается гистерезис – неоднозначная зависимость намагниченности от изменения напряженности магнитного поля. Кривая намагничивания ферромагнетика представляет собой петлю гистерезиса (рис.2.16).

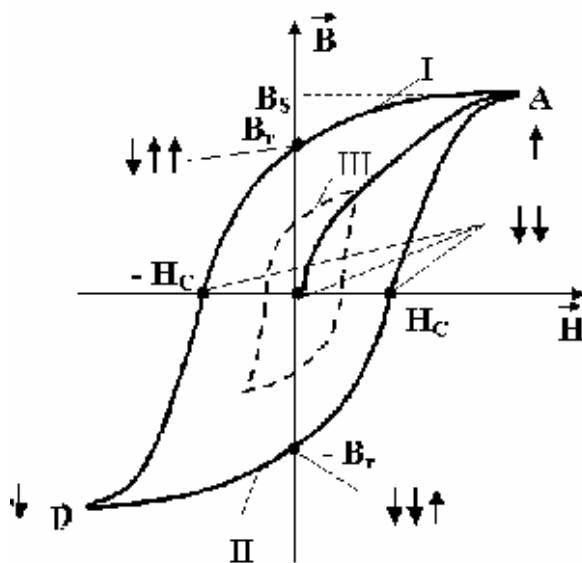


Рис.2.15. Кривая намагничивания ферромагнетика:  $B_s$  – индукция насыщения;  $H_c$  – коэрцитивная сила; точка А – индукция насыщения; точка D – отрицательная индукция насыщения;  $B_r$  – остаточная индукция

В точном приборостроении стальные детали приборов перед сборкой подвергают размагничиванию. Намагниченность детали возникает в процессе механической обработки особенно когда установка деталей осуществлялась в магнитных приспособлениях. Намагниченность создает дополнительные вредные моменты в подвижных системах приборов, а также возникает опасность попадания в прибор мельчайшей металлической пыли, удалить которую становится практически невозможно.

Для размагничивания используются секционированные индукционные катушки, имеющие небольшую индуктивность. Детали помещают внутрь катушки на диэлектрической подставке. Секции обмотки катушки, имеющие самостоятельные выводы, подключаются параллельно в сеть переменного тока промышленной частоты. Путем измерения величины тока в катушке в размагничиваемой детали создается переменное магнитное поле, соответствующее магнитному насыщению детали. При последующем уменьшении величины тока до нуля происходит размагничивание детали.

В приборостроении, автоматике, проводной связи, радио применяются магнитно-мягкие материалы в области слабого тока. В области низких и повышенных частот применяют преимущественно ферромагнитные сплавы, а в области высоких частот и для импульсной техники с ними успешно конкурируют ферриты.

*Магнитно-мягкие материалы* – материалы и сплавы, обладающие малой коэрцитивной силой  $H_c$  (рис. 2.16, а). К этой группе материалов относятся чистое железо ( $C < 0,04\%$ ), электротехнические стали, железоникелевые сплавы (пермаллои) и др. Из этих материалов делают магнитопроводы: сердечники для трансформаторов, пакеты роторов и статоров электрических машин.

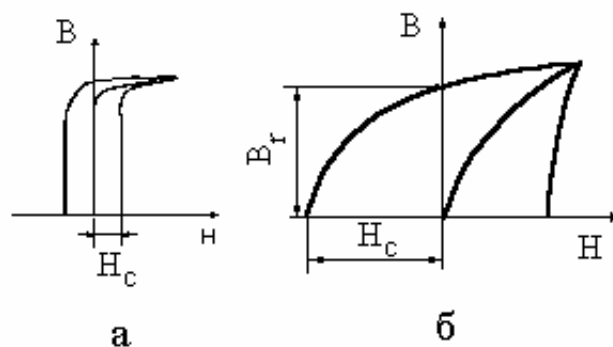


Рис. 2.16. Кривые намагничивания ферромагнитных материалов: а – магнитно-мягких; б – магнитно-твердых

Магнитно-твердые сплавы обладают большой коэрцитивной  $H_c$  силой и высокой остаточной индукцией  $B_r$  (рис. 2.16, б). Магнитно-твердые материалы применяют для изготовления постоянных магнитов, магнитных лент и дисков для записи информации и др.

Наибольшее промышленное применение для постоянных магнитов имеют литые и металлокерамические сплавы на основе системы  $Al - Ni - Co$ . В качестве примера можно привести сплав ЮН13Д24К ( $Al \approx 1\%$ ;  $Ni \approx 13\%$ ;  $Cu \approx 24\%$ ;  $Co \approx 1\%$ ; остальное Fe).

Современный этап развития магнито-твердых материалов характеризуется двумя особенностями: началом широкого применения магнитов из редкоземельных материалов класса  $R Co_5$  (где  $R$  – редкоземельный элемент – РЗМ, например Sm, Pr и т.п.) и открытие возможности дальнейшего существенного увеличения удельной энергии магнитов из РЗМ путем перехода к соединениям класса  $R_2(Co, Fe)_{17}$  и некоторым другим. РЗМ класса  $R Co_5$ , обладают очень высокой коэрцитивной силой и удельной энергией, вдвое большей, чем у альни-ко лучших марок, но они дороже.

Технология получения магнитов из РЗМ заключается в спекании порошков в присутствии жидкой фазы или литья.

## **2.5. Технологические свойства материалов**

Технологические свойства материалов характеризуются податливостью материалов различным методам обработки при переработке в изделие. Знание этих свойств позволяет рационально проектировать и осуществлять технологические процессы изготовления изделий. Основными технологическими характеристиками материалов являются: обрабатываемость резанием, давлением, литьем, свариваемость, склонность к деформации и короблению при термической обработке и др.

*Обрабатываемость резанием* характеризуется следующими показателями: качеством обработки материалов – шероховатостью обработанной поверхности и точностью размеров детали, стойкостью инструмента, сопротивлением резанию – скоростью резания и силой резания, видом стружкообразования. Значения показателей определяют при обтачивании образцов и сравнивают с параметрами материала, принятого за эталон.

*Обрабатываемость давлением* – податливость материалов подвергаться обработке штамповкой, ковкой, волочением и т.д. Обрабатываемость давлением определяют в процессе технологических испытаний (проб) материалов на пластическую деформацию. Методы оценки обрабатываемости давлением зависят от вида материалов и технологии переработки. Обрабатываемость давлением порошковых материалов характеризует их текучесть, уплотняемость и формуемость.

*Литейные характеристики* материалов – совокупность технологических показателей, характеризующих формирование отливок путем заливки расплавленных материалов в литейную форму. Жидкотекучесть – свойство расплавленного металла заполнять литейную форму; зависит от вязкости расплава, температуры расплава и формы, степени смачивания расплавом стенок формы и т.д. Усадка

литейная – уменьшение объема расплава при переходе из жидкого состояния в твердое.

*Свариваемость* – свойство материала образовывать сварное соединение, работоспособность которого соответствует качеству основного материала, подвергаемого сварке. О свариваемости судят по результатам испытания сварных образцов и характеристикам основного материала в зоне сварного шва.

Технологические свойства материалов, подвергаемых тепловой обработке и воздействию электромагнитного поля, специфичны для материалов разных классов и рассмотрены при их описании.

### 3. Строение и свойства материалов

#### 3.1. Кристаллическое строение металлов

Металлы являются телами кристаллическими. Кристаллическое состояние характеризуется закономерным (упорядоченным) расположением атомов в пространстве. Рассмотрим элементарную ячейку кристаллической решетки (рис. 3.1). Элементарная ячейка показана штриховкой. Расстояние между узлами  $0,1 \dots 0,7$  нм. Частота колебаний ионов атомов в узлах кристаллической решетки –  $10^{13}$  Гц.

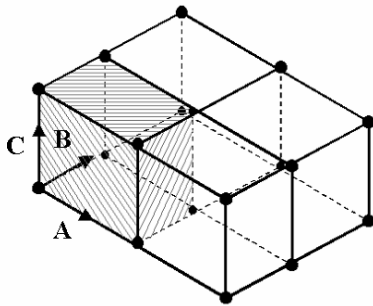


Рис. 3.1. Схема кристаллической решетки:  
A, B, C – периоды кристаллической решетки

#### 3.2. Элементарные кристаллические решетки материалов

Объемно-центрированная кубическая (ОЦК) решетка (рис. 3.2, а). В ней ионы атомов находятся в вершинах и центре куба. Такую решетку имеют следующие элементы: K, Na, Li, Ta, W, V, Cr, Nb, Ba, Fe<sub>α</sub> и другие.

Гранецентрированная кубическая (ГЦК) решетка (рис. 3.2, б). В такой решетке ионы атомов расположены не только в вершинах куба, но и в центре каждой грани. Она характерна для Rb, Ce, Fe<sub>γ</sub>, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Cu, Jг и др.

Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) решетка (рис. 3.2, в). Частицы в такой решетке расположены очень плотно. Такая ячейка характерна для Mg, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Be и др.

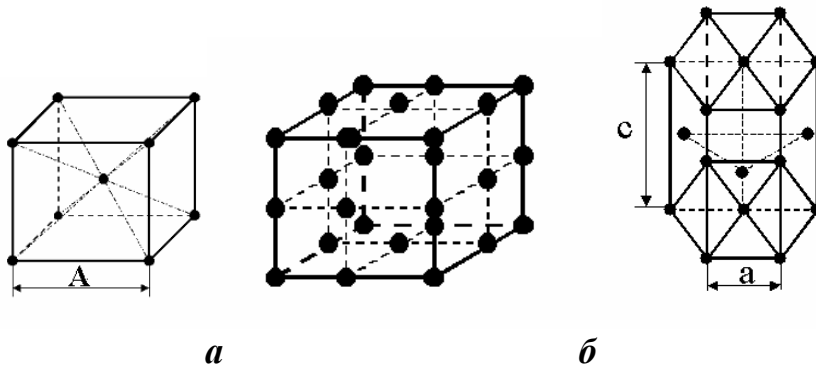


Рис. 3. 2. Основные типы кристаллических решеток материалов:  
а – ОЦК, б – ГЦК, в – ГПУ

### 3.3. Энергия взаимодействия соседних атомов

В твердом состоянии металл представляет собой упорядоченную, состоящую из положительно заряженных ионов, омываемых “газом” из свободных коллективизированных электронов. Между ионами и коллективизированными электронами проводимости возникают электростатические напряжения, которые стягивают ионы. Такая связь называется металлической. Атомы (ионы) располагаются в кристаллической решетке на таком расстоянии  $a_0$  друг от друга (рис. 3.3), при котором энергия взаимодействия минимальна.

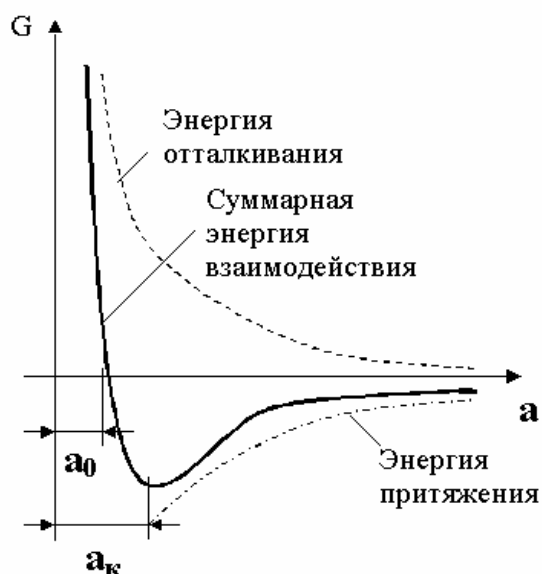


Рис. 3.3. Схема энергии взаимодействия двух атомов в зависимости от межатомного расстояния

Проследим зависимость энергии взаимных атомов от расстояния. Сближение атомов (ионов) на расстояние, меньшее  $a_0$ , или удаление их на расстояние, большее  $a_0$ , осуществимо лишь при совершении определенной работы против сил отталкивания и притяжения. При  $a = a_k$  сила притяжения между атомами максимальна ( $a_k$  — критическое расстояние, после увеличения которого происходит разрушение решетки)

### 3.4. Дефекты кристаллической решетки металлов

В любом реальном кристалле всегда имеются дефекты строения. Дефекты кристаллического строения подразделяют на точечные, линейные (одномерные) и поверхностные (двухмерные).

Точечные дефекты. Эти дефекты малы во всех трех измерениях и размеры их не превышают нескольких атомных диаметров. К

точечным дефектам относятся: вакансии (рис. 3.4, а) (дефекты Шотки), т.е. узлы решетки, в которых атомы отсутствуют; межузельные атомы (дефекты Френкеля образующиеся в результате перехода атома из узла решетки в межузелье). На месте атома, вышедшего из узла решетки в межузелье, образуется вакансия (рис. 3.4, б).

К линейным дефектам кристаллического строения металлов относятся дислокации – особый вид несовершенства кристаллической решетки, который образуется в результате локальных необратимых смещений отдельных участков кристалла. Наиболее характерной разновидностью дислокации является краевая дислокация. Краевая дислокация (рис.3.5) представляет собой дефект кристаллической решетки, вызванный наличием в ней “лишней” атомной полуплоскости (нижний край лишней полуплоскости АВ), внедрившейся в верхнюю часть кристаллической решетки. Здесь решетка упруго деформирована. В верхней части она шире, чем в нижней, что вызывает соответствующее искажение расстояния между атомами.

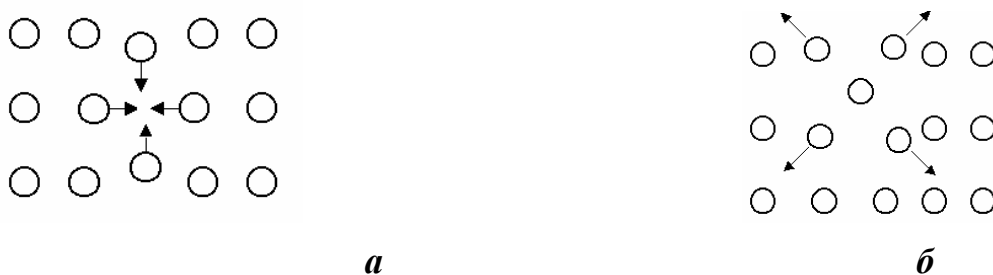


Рис. 3.4. Точечные дефекты в кристаллической решетке:  
а – вакансия, б – межузельный атом

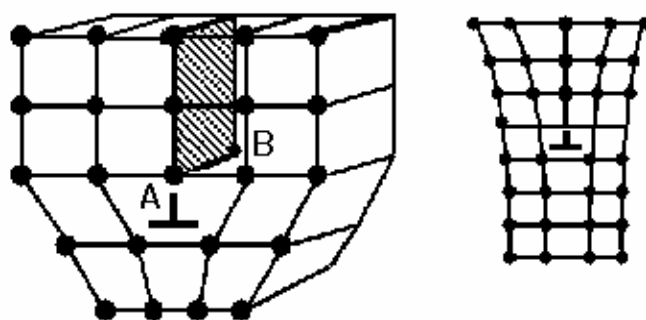
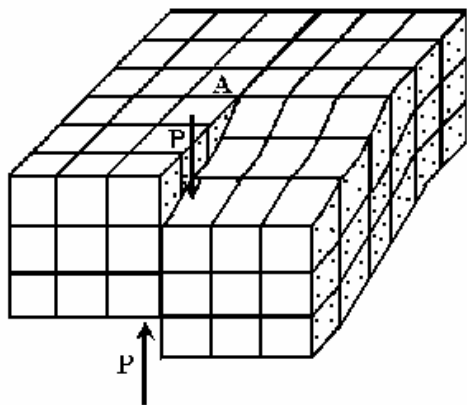


Рис. 3.5. Схема краевой дислокации в кристаллической решетке

Другим видом дислокаций является *винтовая дислокация*. Винтовая дислокация формируется под действием сил сдвига Р (рис. 3.6). Сдвиг распространяется от переднего края кристалла до линии

АВ. При этом правая передняя часть кристалла смещается вниз на период кристаллической решетки. Такая деформация искажает расстояние между атомами неравномерно.



Дефекты кристаллического строения отражаются на механических и физических свойствах материалов. Например, при повышении числа вакансий, пор, микротрещин наблюдается снижение не только прочности, но и электропроводности, теплопроводности и магнитной проницаемости.

Рис. 3.6. Схема винтовой дислокации

## Глава II. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

### 4. Общие сведения о металлах и сплавах

Металлы до недавнего времени были основой важнейших конструкционных материалов приборостроения. Их роль и сейчас остается весьма высокой. Уникальный комплекс физико-механических, теплофизических, электрических и магнитных свойств объясняется специфическим строением их кристаллической решетки и наличием большого количества электронов проводимости. Физико-механические характеристики металлов в значительной мере определяются их атомно-кристаллическим строением, которое формируется в процессе кристаллизации расплава. Управляя процессом кристаллизации, можно достичь уникального сочетания характеристик металла. Процесс образования и роста кристаллов характеризуется изменением свободной энергии системы и протекает при определенной для данного металла равновесной температуре кристаллизации.

Для некоторых металлов характерно явление полиморфизма. Полиморфизм – способность твердых тел существовать в двух или нескольких кристаллических структурах (полиморфных модификациях). Этим явлением обусловлено различие физико-механических, электрических и магнитных свойств разных полиморфных модификаций одного и того же металла. Большинство



металлов подвержено коррозии, в результате действия которой происходит их разрушение.

Металлы (греч. metallon – руда, металл) вещества, характеризующихся в нормальных условиях высокой электропроводностью и теплопроводностью, способностью хорошо отражать электромагнитные волны, пластичностью. Согласно современным представлениям, металлы состоят из ионного кристаллического остова, окруженного “электронным газом”, который компенсирует энергию электростатического отталкивания ионов, связывая их в твердое тело (металлическая связь). Из известных в настоящее время химических элементов более 80 обладают свойствами металлов.

#### 4.1. Кристаллизация металлов

Переход металла из жидкого в твердое кристаллическое (с меньшей свободной энергией) состояние называют кристаллизацией. Движущей силой процесса кристаллизации является свободная энергия. Рассмотрим процесс перехода системы в состояние, когда энергия минимальна, на примере механической системы (рис. 4.1).

Потенциальная энергия шарика в положении 2 меньше, чем в положении 1. Положение шарика 1 на вершине неустойчиво. Необходимо затратить определенную энергию для поддержания его в этом положении. Положение 2 шарика – устойчивое положение (свободная энергия минимальна).

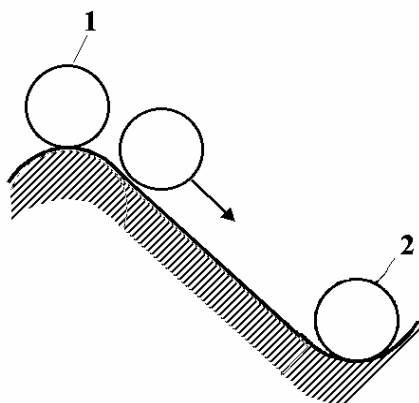


Рис. 4.1. Иллюстрация процесса перехода системы в состояние, при котором ее свободная энергия минимальна

Свободная энергия системы  $G = U - T \cdot S$ , где  $U$  – внутренняя энергия системы,  $T$  – абсолютная температура,  $S$  – энтропия. Изменение энтропии при переходе системы из состояния 1 в состояние 2:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T},$$

где  $Q$  – количество теплоты;  $\frac{Q}{T}$  – приведенное количество теплоты;  
 $\Delta S$  – изменение энтропии. При обратимом процессе  $\Delta S = 0$ . При  
 необратимом –  $\Delta S \geq 0$ .

### Второй закон термодинамики $\Delta S \geq 0$

Существует температура  $T_p$  – температура равновесия (рис. 4.2), при которой значения  $G$  (свободной энергии) для металла в жидком и твердом состоянии одинаковы. Она называется равновесной температурой кристаллизации. При этой температуре в отсутствие внешних воздействий твердое и жидкое состояния вещества могут существовать неограниченное время  $G_1 = G_2$  (при  $T_p$ ). При  $T < T_p$  (рис. 4.2) свободная энергия  $G_{ж} > G_{тв}$ , поэтому системе выгоднее быть в жидкой фазе.

Чтобы начался процесс кристаллизации нужно охладить вещество (рис. 4.3) на  $\Delta T_k$  относительно температуры  $T_p$ . Для плавления кристаллического тела необходим дополнительный нагрев системы до температуры, на  $\Delta T_n$  (перегрев) превышающей  $T_p$ . Разница  $\Delta T = T_n - T_k$  между истинными температурами плавления и кристаллизации называется температурным гистерезисом. Обычно для начала кристаллизации необходимо переохлаждение на 10...30 К.

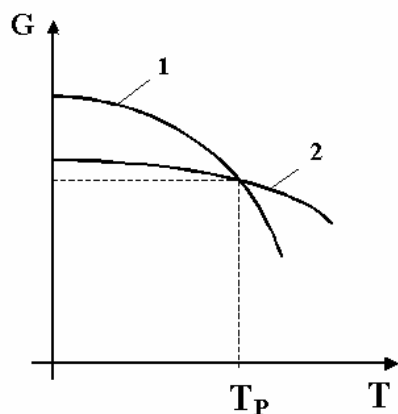


Рис. 4.2. Зависимость свободной энергии жидкой 1 и твердой фаз от температуры

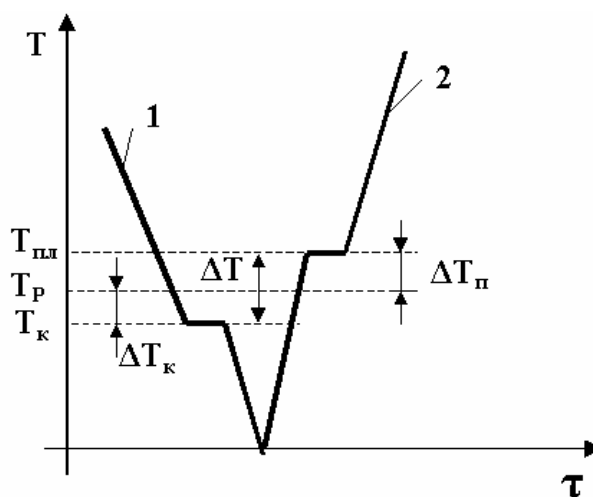
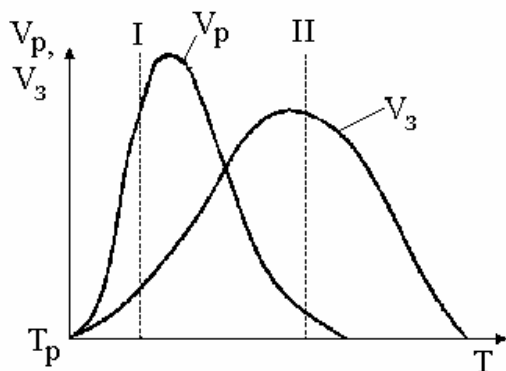


Рис. 4.3. Характерный вид кривых охлаждения (1) и нагрева (2) чистого металла



Русский инженер Чернов Д.К. первым в 1878 году установил, что процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов (рис. 4.4):  $V_3$  — скорость роста числа зачатков (центров кристаллизации),  $V_p$  — скорость роста кристаллов.

Рис. 4.4. Зависимость скорости роста кристаллов  $V_p$  и скорости образования  $V_3$  зародышей от степени переохлаждения  $\Delta T$

При малом переохлаждении (I)  $V_3 > V_p$ , металл получается крупнозернистый. При быстром переохлаждении (II)  $V_3 < V_p$ , растет много мелких кристаллов, т.е. структура получается мелкозернистой. Размер реальных зерен колеблется в диапазоне  $1 - 10^{-4}$  мм.

Этапы процесса кристаллизации (рис. 4.5):

1. В твердом состоянии все металлы имеют кристаллическое строение.
2. При переходе из жидкого состояния в твердое в отдельных частях жидкой фазы образуются частички правильно построенных атомов (зародышей).
3. Дальнейший рост кристаллов идет за счет надстройки атомов из жидкой фазы к зародышам.
4. Движущейся силой процесса кристаллизации является свободная энергия системы. Системе выгодно, чтобы свободная энергия была минимальной.
5. Скорость всего процесса кристаллизации определяется двумя величинами:  $V_p$  и  $V_3$ .

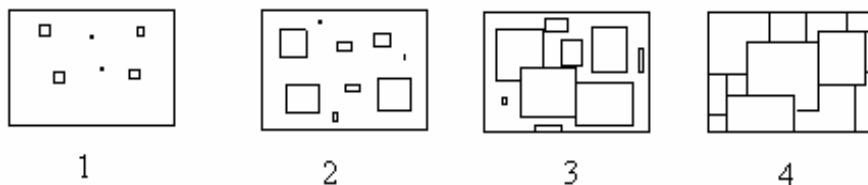


Рис. 4.5. Схема этапов процесса кристаллизации

## 4.2. Строение и свойства сплавов

Сплав – вещество, получаемое сплавлением или спеканием нескольких химических элементов, которые называются компонентами сплава. Части сплава, имеющие одинаковый химический состав, кристаллическое строение и свойства и отделенные от других частей сплава поверхностями раздела, называют фазами. Сплавы, состоящие из зерен одной фазы, называют однофазными. Сплавы, состоящие из двух и более фаз, – многофазными. Совокупность находящихся в равновесии фаз принято называть системой сплава.

### Диаграмма состояния сплавов

Диаграммой состояния сплавов называют графическое изображение состояния сплава в координатах концентрация–температура (рис. 4.6). Эта диаграмма представляет собой теоретический случай, а на практике используется при малых скоростях нагрева и охлаждения. В точке А имеем 100% компонента А и 0% компонента В. В точке В 100% компонента В и 0% компонента А. Для сплава I 30% В и 70% А. По краям характеристики чистые материалы.

На линии ликвидус (точка 1) начинается процесс кристаллизации. В интервале температур от точки 1 до точки 2 идет процесс кристаллизации, т.е. имеет место как жидкая L, так и твердая  $\alpha$  фазы. Ниже линии солидус (точка 2) жидкая фаза полностью исчерпывается, сплав находится в твердом состоянии и охлаждается до температуры окружающей среды, в точке 3.

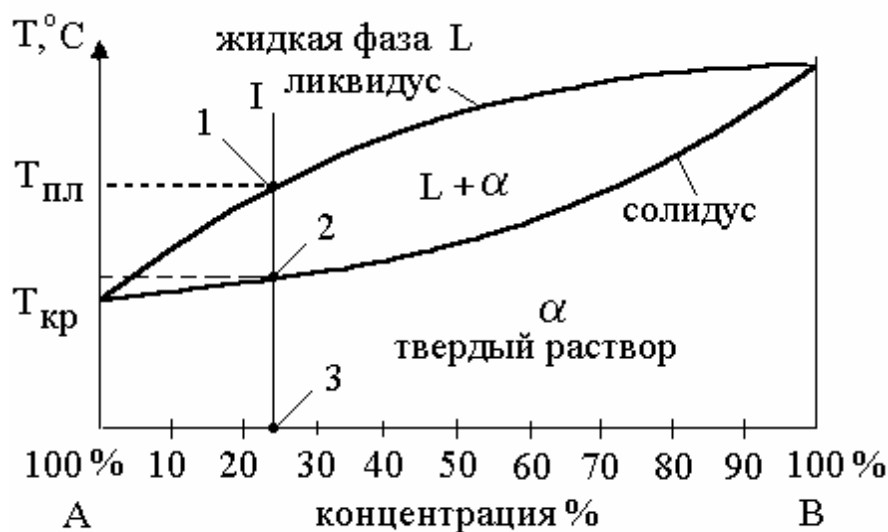


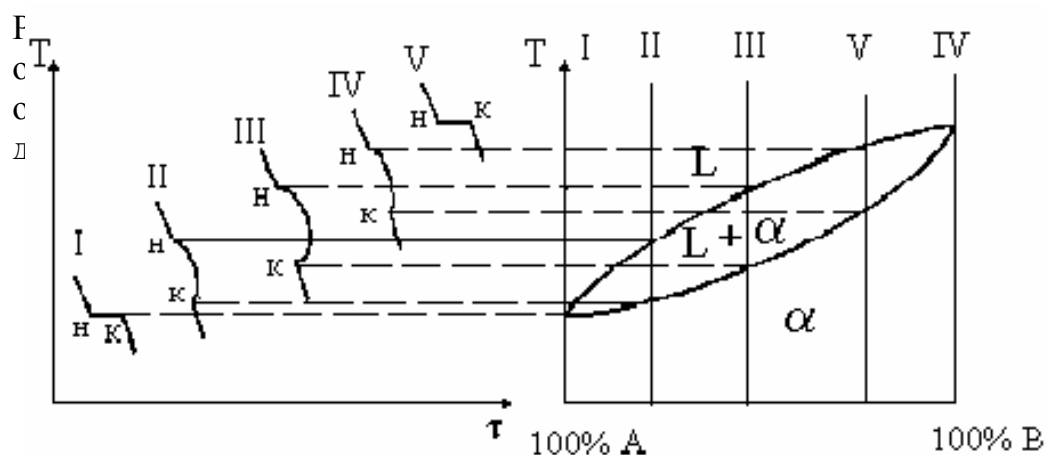
Рис. 4.6. Диаграммы состояния двойного сплава

### 4.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих непрерывный ряд твердых растворов

Пример построения диаграммы состояния сплавов приведен на рис. 4.7. Сначала необходимо определить экспериментальным путем температуры начала и конца кристаллизации (рис. 4.7, а) и построить кривые охлаждения чистых металлов I, V и сплавов II, III, IV. Далее значение этих температур откладывается на диаграмме состояния для сплавов II, III, IV с соответствующей концентрацией (рис. 4.7, б).

#### Твердые растворы

При образовании твердого раствора атомы растворимого компонента размещаются в кристаллической решетке компонента – растворителя. Чаще встречаются твердые растворы двух типов – замещения и внедрения.



При образовании твердого раствора замещения (рис. 4.8) часть атомов заменяется другими. Здесь Co – растворимое вещество, Ni – растворитель.

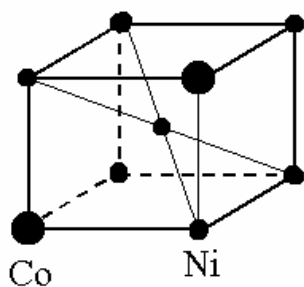


Рис. 4.8. Твердый раствор замещения  $Co \rightarrow Ni$

В твердых растворах внедрения (рис. 4.9) атомы другого вещества внедряются в межатомное пространство растворителя. В данном случае С – растворимое вещество, Fe – растворитель.

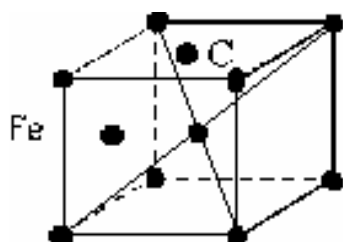


Рис. 4.9 Твердый раствор внедрения Fe...C

При этом важное значение имеют размеры атомов. Если они близки друг к другу, то замещение происходит почти без искажения кристаллической решетки. Если же размеры атомов отличаются, то при их замещении кристаллическая решетка может существенно исказиться. Замещение в таких случаях может оказаться либо ограниченным, либо невозможным. Это положение следует учитывать при подборе сплавляемых компонентов.

Сплавы, образующие непрерывный ряд твердых растворов: Fe – Ni; Fe – Co; Fe – Cr; Fe – Pd; Fe – Pt; Fe – V; Cu – Ni; Cu – Pd; Cu – Pt; Cu – Au; Cr – Mo; Cr – Ti; Cr – V; Cr – W; Bi – Sb и т.д.

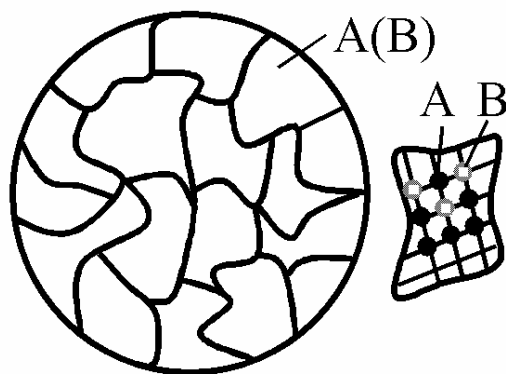


Рис. 4.10. Микроструктура сплавов, образующих твердые растворы

#### 4.4. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых практически не растворимы в твердом состоянии, с эвтектическим превращением

*Эвтектикой* (легкоплавящийся, греч.) называют высокодисперсную механическую смесь нескольких твердых фаз, одновременно кристаллизующихся при постоянной температуре расплава. Эвтектическим превращением называют процесс

одновременной кристаллизации из расплава нескольких твердых фаз при постоянной температуре.

Вид диаграммы состояния сплава, компоненты которого практически не растворимы в твердом состоянии, и образуют механическую смесь в результате эвтектического превращения, приведен на рис. 4.11. А, В – компоненты не взаимодействуют друг с другом. Рассмотрим сплав I – доэвтектический сплав (рис. 4.12). В точке 1 начинается кристаллизация веществ. На участке 1 – 2 начинает выпадать чистые компоненты вещества А. При переходе 2 – 2<sup>1</sup> температура стабилизируется, происходит наращивание эвтектики (А + В) к зернам чистого компонента А. 2<sup>1</sup> – 3 вокруг зерен компонента А образовалась смесь (А + В), ниже точки 2<sup>1</sup> охлаждение закристаллизовавшегося сплава.

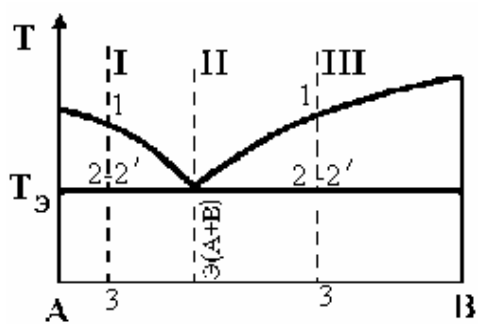


Рис. 4.11. Сплавы с полной нерастворимостью компонентов

II – эвтектический сплав: (рис.4.11): 1 – 2 – охлаждение расплава (рис.4.13), 2 – 2<sup>1</sup> – выделение эвтектики, 2<sup>1</sup> – 3 – охлаждение закристаллизовавшегося сплава.

III – заэвтектический сплав: 1 – 2 – выпадают кристаллы вещества В (рис.4.14). 2 – 2<sup>1</sup> – образуется эвтектика (А + В), ниже 2<sup>1</sup> происходит охлаждение закристаллизовавшегося сплава.

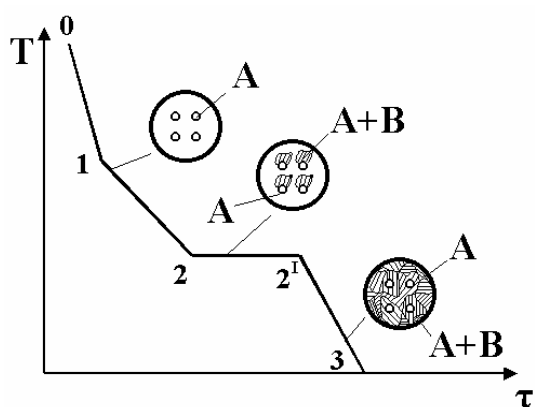


Рис. 4.12. Процесс кристаллизации доэвтектического сплава I

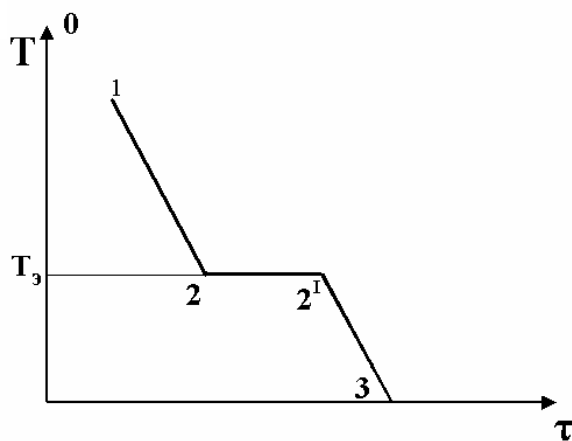


Рис. 4.13. Кривая охлаждения эвтектического сплава

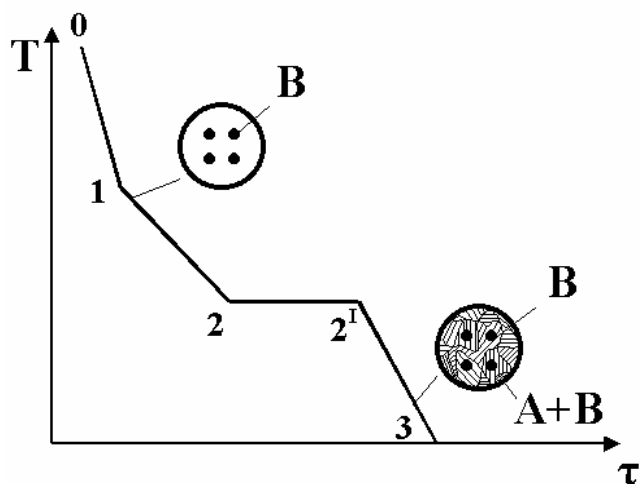


Рис. 4.14. Кривая охлаждения заэвтектического сплава

#### 4.5. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

К таким сплавам относятся: Al – Cu, Al – Si, Cu – Ag, Pb – Sn и др. Рассмотрим диаграмму (рис.4.15): ABC – ликвидус; AEDC – солидус;  $\alpha$  и  $\beta$  – твердые растворы замещения или внедрения. До точки F образуется твердый раствор  $\alpha$ , где А – растворитель, В – растворимое вещество. После точки G образуется твердый раствор  $\beta$ , где В – растворитель, А – растворимое вещество. По линии Э – эвтектика. Справа будет вещество В + эвт; слева А + эвтектика.

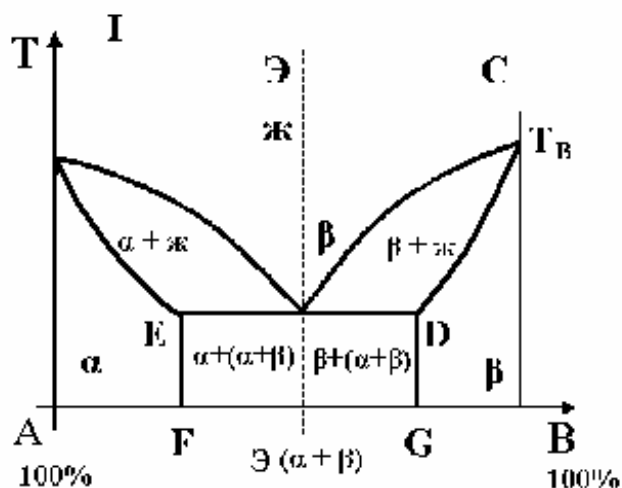


Рис. 4.15. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью



#### 4.6. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют устойчивые химические соединения

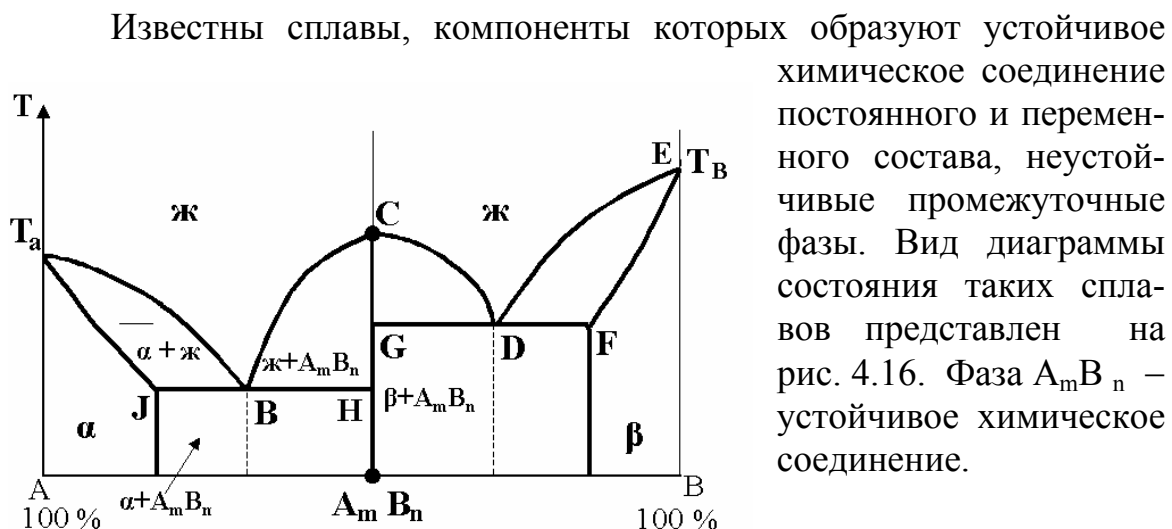


Рис. 4.16. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют устойчивые химические соединения  $A_mB_n$

#### 4.7. Связь диаграммы состояния и свойств сплавов

Н.С. Курнаковым, одним из основоположников физико-химического анализа, установлена взаимосвязь диаграммы состояния и свойств от их состава. При образовании механической твердой смеси в сплавах, компоненты которых практически не растворяются в твердом состоянии, механические, электрические, магнитные свойства сплавов изменяются линейно (рис. 4.17, а). Неограниченно растворяющиеся в твердом состоянии металлы в сплавах образуют непрерывный ряд твердых растворов, свойства которых изменяются по криволинейной зависимости (рис. 4.17, б). Изменение размеров кристаллической решетки компонентов при образовании твердых растворов обуславливает увеличение электрического сопротивления, твердости и коэрцитивной силы сплавов, уменьшение их пластичности. При образовании сплавов с ограниченной растворимостью компонентов функциональная зависимость свойств – состав приобретает более сложный вид (рис. 4.17, в). В области однофазных твердых растворов  $\alpha$  и  $\beta$  она криволинейна. Присутствие в сплаве высокодисперсной механической смеси  $\alpha + \beta$  приводит к адекватному изменению свойств в зависимости от состава.

Химические соединения типа  $A_mB_n$ , образующихся в сплавах, обладают свойствами, резко отличающимися от свойств исходных компонентов А и В. Вследствие этого на кривой “состав – свойство” в месте сингулярной точки (точки образования химического соединения постоянного состава) появляется характерный перелом (рис. 4.17, г). Отмеченные закономерности позволяют создавать промышленные сплавы с заданными свойствами.

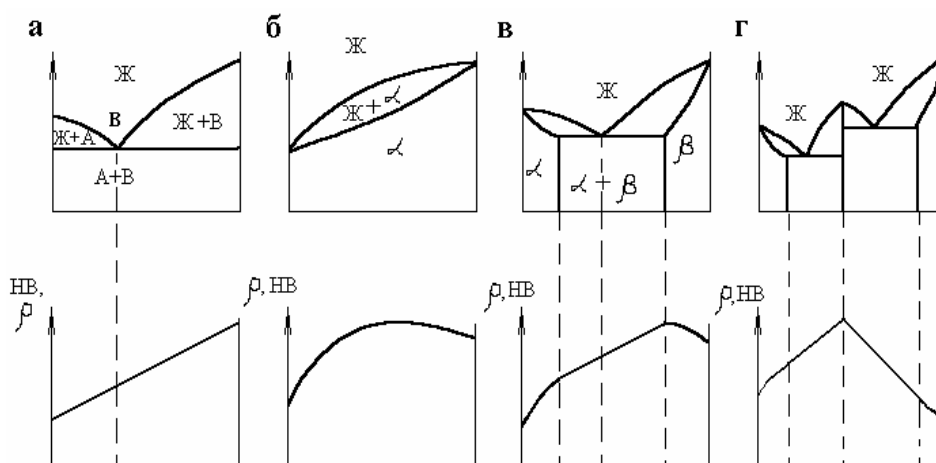


Рис. 4.17. Корреляция типа диаграммы состояния и свойств сплавов с компонентами: а – практически нерастворимыми в твердом состоянии; б – неограниченно растворимыми в твердом состоянии; в – ограниченно растворимыми в твердом состоянии; г – образующими химическое соединение

#### 4.8. Диаграммы состояния тройных сплавов

Широкое распространение в приборостроении нашли сплавы, состоящие из трех и более компонентов. Для их графического описания используются тройные диаграммы состояния. Последние имеют вид сложных пространственных фигур, основанием которых является равносторонний треугольник (рис. 4.18), называемый концентрационным. В его углах указывают компоненты, образующие сплав. Например, сплав точки D содержит 10 % компонента А, 60 % компонента В и 30 % компонента С. Сплав, соответствующий точке Е, содержит 40 % А, 40 % В и 20 % С. Концентрацию сплавов определяют по ходу часовой стрелки. Содержание компонента А пропорционально длине отрезка  $a$ , В – отрезка  $b$  и С – отрезка  $c$ . При построении тройной диаграммы значения температур откладывают по граням призмы.

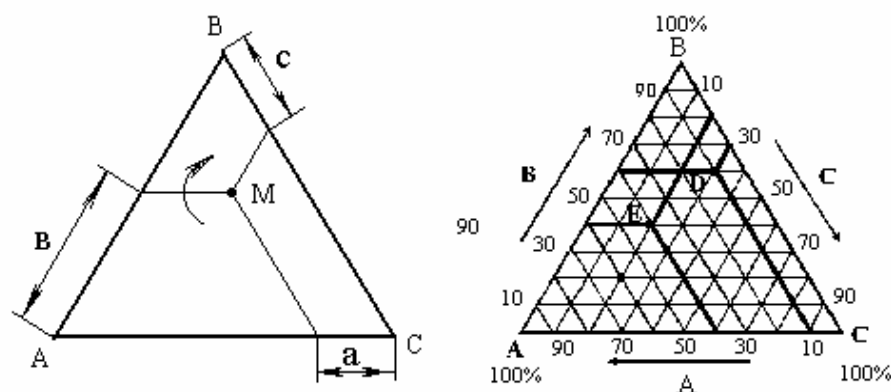


Рис. 4.18. Концентрационные треугольники тройного сплава

Для построения общей диаграммы состояния тройного сплава пользуются кривыми охлаждения. Экспериментально определяют критические точки, переносят на перпендикуляры, восстановленные из точек концентрационного треугольника, соответствующего данным сплавам. Полученные семейства точек соединяют криволинейными поверхностями. Боковые грани диаграммы состояния тройного сплава (рис. 4.19) представляют собой диаграммы состояния двойных систем АВ, ВС, АС.

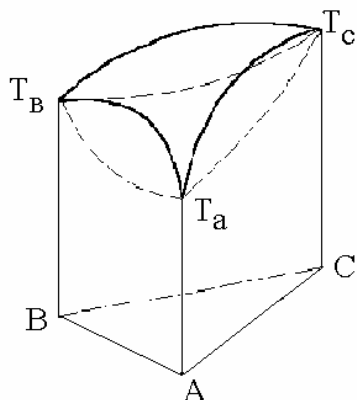


Рис. 4.19. Диаграмма состояния тройных сплавов

## 5. Железо и его сплавы

### 5.1. Свойства железа

Содержание Fe в земной коре примерно равняется 4,5 %. Это четвертый по распространенности в природе элемент. Железо, элемент восьмой группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева, располагающийся в триаде Fe, Co, Ni. Температура плавления железа составляет  $1539^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ). Механические характеристики железа:  $\rho = 7,68 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma_B = 200\dots 250 \text{ МПа}$ ,  $\text{НВ} = 70\dots 80$ , относительное удлинение железа  $\delta = 50\dots 60 \%$ , т.е. железо, очень пластичный материал.

Кривая охлаждения железа представлена на рис. 5.1, а. Ниже температуры  $911^{\circ}\text{C}$  железо существует в форме  $\text{Fe}_{\alpha}$  (ОЦК решетка), выше  $911^{\circ}\text{C}$  – в форме  $\text{Fe}_{\gamma}$  (ГЦК решетка), выше  $1392^{\circ}\text{C}$  – снова в форме  $\text{Fe}_{\alpha}$ . Высокотемпературную модификацию  $\text{Fe}_{\alpha}$  обозначают также  $\text{Fe}_{\delta}$ . Наличие двух температурных областей существования аллотропических модификаций  $\alpha$  - железа объясняется особенностью зависимости свободной энергии  $\alpha$ - и  $\gamma$  - железа от температуры (рис. 5.1.б). При температурах  $911^{\circ}\text{C}$  и  $1392^{\circ}\text{C}$  значения этой энергии для  $\text{Fe}_{\alpha}$  и  $\text{Fe}_{\gamma}$  равны, а при  $t < 911^{\circ}\text{C}$  и  $t > 1392^{\circ}\text{C}$   $G_{\text{Fe}_{\alpha}} < G_{\text{Fe}_{\gamma}}$ . При температуре выше точки Кюри материал становится немагнитным. Для железа точка Кюри  $T_K = 768^{\circ}\text{C}$ . Кристаллические решетки  $\alpha$  - и  $\gamma$  - железа имеют периоды 0,286 нм и 0,364 нм, соответственно. В  $\gamma$  - железе углерод растворяется в значительно большем количестве, так как атомы углерода с обобществленными электронами размещаются в порах ГЦК решетки.

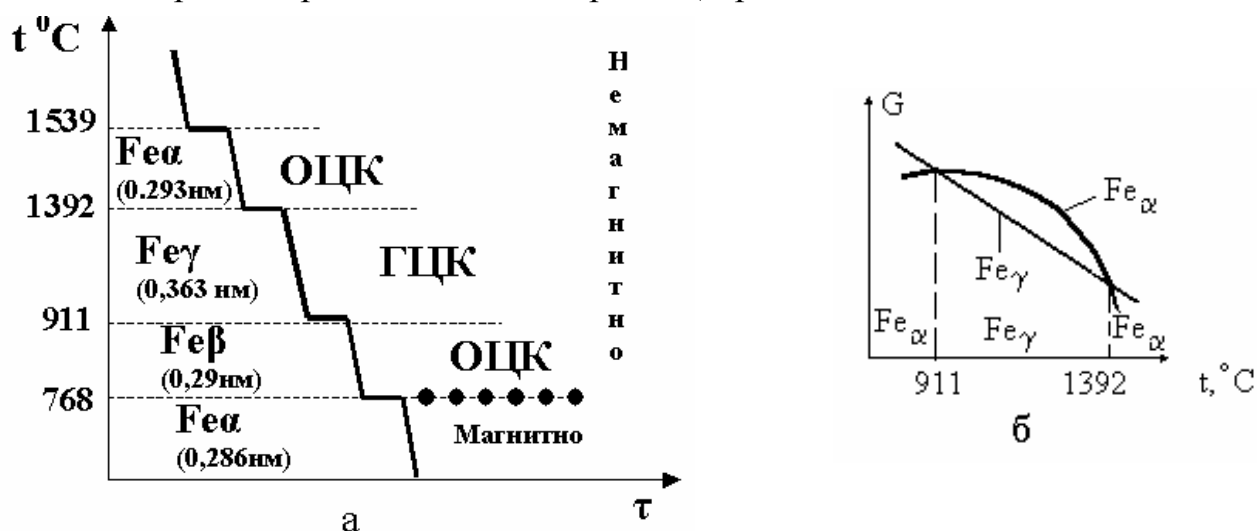


Рис. 5.1. Кривая охлаждения чистого железа (а) и зависимость свободной энергии от температуры (б)

## 5.2. Диаграмма состояния сплава железо–углерод

Часть диаграммы, имеющая практическое значение, расположена в диаграмме концентраций углерода до 6,67 % , что соответствует химическому соединению  $\text{Fe}_3\text{C}$ , или цементиту, представлена на рис 5.2. Увеличенные области диаграммы состояния железо–углерод представлены на рис 5.3: перитектическое превращение (рис. 5.3, а), эвтектическое превращение и (рис. 5.3, б)

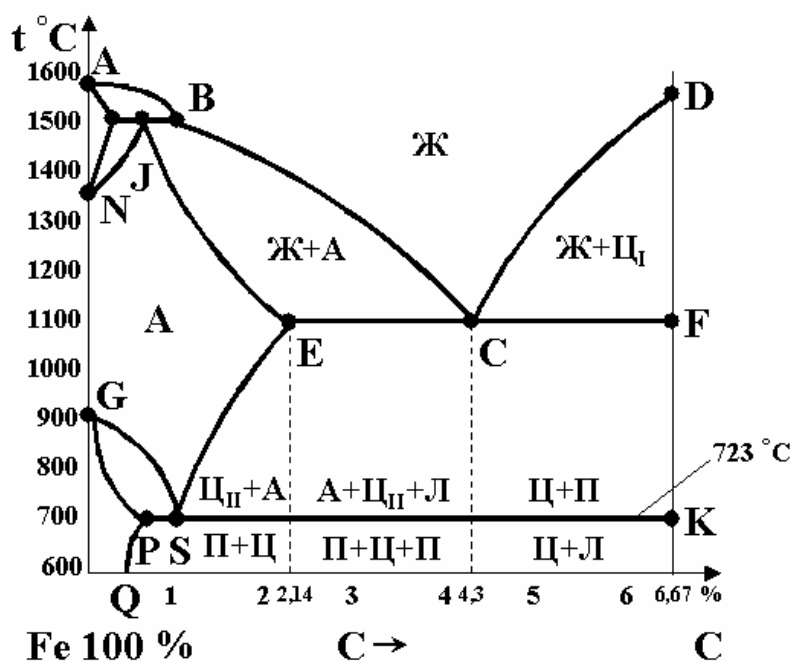


Рис. 5.2. Диаграмма состояния системы железо–углерод:  
ABCD – линия ликвидус, AJECF – линия солидус

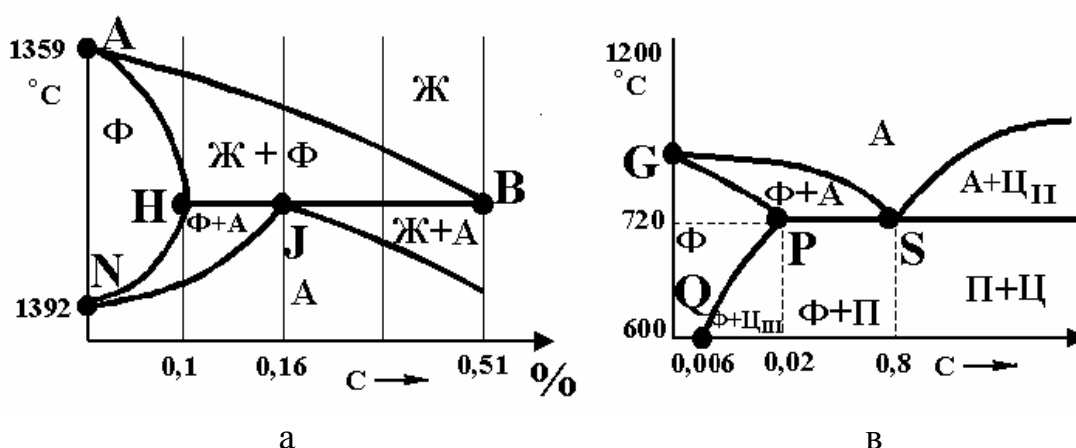


Рис. 5.3. Области диаграммы состояния железо–углерод:  
а – перитектическое превращение, в – эвтектическое превращение

Сплавы, содержащие менее 0,02 % углерода, называются *техническим железом*, от 0,02 до 2,14 % – *сталями*, от 2,14 до 6,7 % – *чугунами*. Стали левее точки S ( $C < 0,8 \%$ ) – называются *доэвтектоидными*, с содержанием 0,8 % углерода – *эвтектоидными*, 0,8 %...2,4 % углерода – *заэвтектоидными*. Чугуны, содержащие 2...4,3% углерода – *доэвтектические*, 4,3 % C – *эвтектическими*, более 4,3 % C – *заэвтектическими*.

**Фазовые и структурные изменения в сплавах Fe–Fe C после затвердевания.** Такие изменения связаны с полиморфизмом железа, изменением растворимости углерода в аустените и феррите, понижением температуры и эвтектоидным превращением.

В системе Fe–C различают следующие фазы: жидкий сплав, твердые растворы – феррит и аустенит, а также цементит и графит. Микроструктура стали в равновесном состоянии представлена на рис. 5.4.

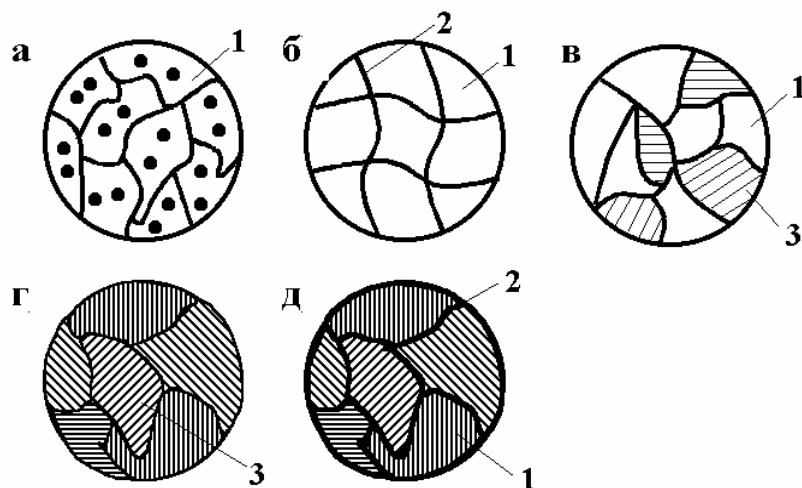


Рис. 5.4. Микроструктура стали: а – ферритная Ф; б – ферритно-цементитная Ф + Ц; в – ферритно-перлитная Ф + П; г – перлитная П; д – перлитно-цементитная П+Ц; 1 – феррит; 2 – цементит; 3 – перлит

**Феррит** – твердый раствор углерода внедрения в  $\alpha$ -железе. Обозначается **Ф** или  **$\alpha$** . Предельное содержание углерода при  $723^\circ\text{C} \approx 0,02 \%$ , при  $20^\circ\text{C} \approx 0,006 \%$ . Феррит по свойствам близок к чистому железу, мягок НВ = 60...80, пластичен. Применяют для изготовления магнитопроводов.

**Аустенит** – твердый раствор внедрения C в  $\gamma$  - железо. Устойчив только при высоких температурах. С примесями Mn, Cr устойчив даже при низких температурах. Твердость НВ = 170...200. Обозначается А или  $\gamma$ .

**Цементит** – карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) – химическое соединение, содержащее 6,67 % углерода является составной частью эвтектической смеси, а также самостоятельной структурой сплава. Цементит неустойчив и распадается при термической обработке. Цементит очень тверд  $\text{HV} = 800$  и хрупок. Решетка сложная, ромбическая, плотноупакованная. Температура плавления цементита –  $t_{\text{пл}} = 1250^\circ\text{C}$ . До  $t = 210^\circ\text{C}$  цементит магнитен. Обозначается буквой Ц.

**Перлит** – эвтектоидная смесь феррита и цементита, образуется в процессе распада аустенита при  $723^\circ\text{C}$  и содержании углерода 0,83 %.

Структура перлита может быть пластичной и зернистой. Прочность пластичного перлита выше чем зернистого обозначается П.

**Ледебурит** – смесь (эвтектическая) аустанита и цементита, образующаяся при  $1130^\circ\text{C}$  и содержащая углерода 4,3 %. Обозначается Л.

Структура неустойчива: при охлаждении А, входящий в Л, распадается на вторичный цементит и перлит.  $\text{HV} = 700$ , хрупок.

**Графит** – аллотропическая модификация углерода со слоистой гексагональной решеткой и слабой связью между слоями. Графит мягок, прочность его низкая.  $t_{\text{пл}} = 3800^\circ\text{C}$ . Плотность  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Химически стоек и электропроводен.

### 5.3. Зависимость свойств сплавов железа с углеродом от содержания в них углерода

Количество цементита в стали возрастает прямо пропорционально содержанию углерода. Твердые и хрупкие частицы цементита повышают сопротивление движению дислокаций, т.е. повышают сопротивление деформации, но уменьшают пластичность и вязкость. Вследствие этого предел прочности, предел текучести и твердость стали с увеличением углерода возрастают, а ударная вязкость и характеристики пластичности ( $\delta, \psi$ ) снижаются (рис. 5.4). Повышение содержания углерода облегчает переход стали в хладноломкое состояние. Каждая 0,1 % углерода повышает порог хладноломкости  $t_{50}$  в среднем на  $20^\circ\text{C}$ . С увеличением углерода в стали снижается плотность, растет электрическое сопротивление и коэрцитивная сила и понижается теплопроводность, остаточная индукция и магнитная проницаемость.

По содержанию углерода [2] стали разделяют на: низкоуглеродистые ( $\text{C} < 0,3\%$ ), среднеуглеродистые ( $0,3 < \text{C} < 0,7\%$ ), высокоуглеродистые ( $\text{C} > 0,7\%$ ). Низкоуглеродистые стали обладают невысокой твердостью, высокой пластичностью. Среднеуглеродистые

– обладают высокой твердостью, но менее пластичны. Высокоуглеродистые стали обладают высокой твердостью, прочностью и низкой пластичностью.

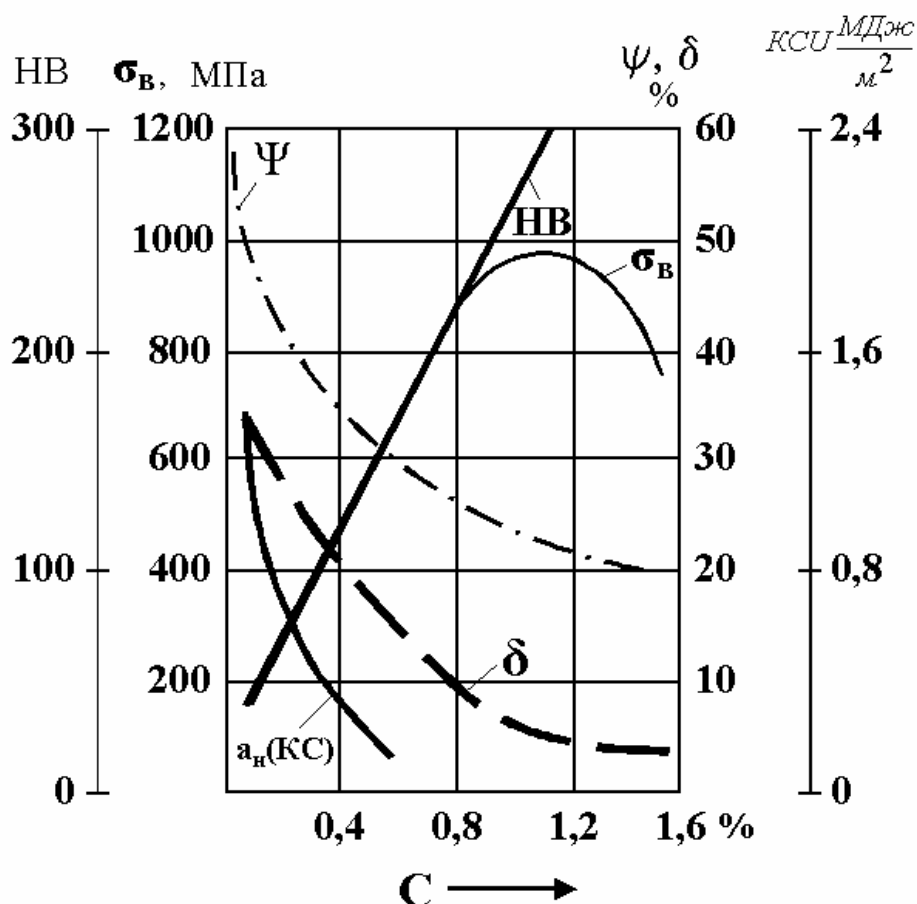


Рис. 5.4. Зависимость механических свойств стали от содержания в ней углерода:  $KCU$  ( $a_n$ ) – ударная вязкость;  $\psi$  – относительное сужение, характер пластичности;  $\delta$  – относительное удлинение, характер пластичности;  $HV$  – твердость по Бринеллю;  $\sigma_B$  – предел прочности

## 6. Термическая обработка стали

Термической обработкой называют технологические процессы, заключающиеся в нагреве изделия или заготовки до определенной температуры, выдержке при этой температуре и охлаждении с заданной скоростью с целью изменения их свойств в заданном направлении. Термическая обработка позволяет изменить в желательном направлении структуру и свойства материалов в изделии, причем диапазон регулирования свойств может быть очень широким. Термическая обработка может сочетаться с химическим воздействием или с пластическим деформированием, что расширяет ее возможности. Все основные виды термической, химико-термической,



термомеханической и механотермической обработки основаны на протекании процессов перекристаллизации в структуре металлического материала. Факторами, влияющими на изменение структуры и свойств материала, является температура нагрева, его продолжительность и скорость, а также скорость охлаждения.

Можно выделить четыре основных вида термической обработки стали: отжиг первого рода, отжиг второго рода, закалка, отпуск и старение.

### 6.1. Отжиг и нормализация

Отжиг первого рода устраняет неоднородность материала, вызванную предшествующей обработкой. Его проводят при температуре выше или ниже температуры фазовых превращений (рис. 6.1, рис. 6.2) и подразделяют на гомогенизацию (диффузионный отжиг), рекристаллизационный отжиг и отжиг для снятия остаточных напряжений.

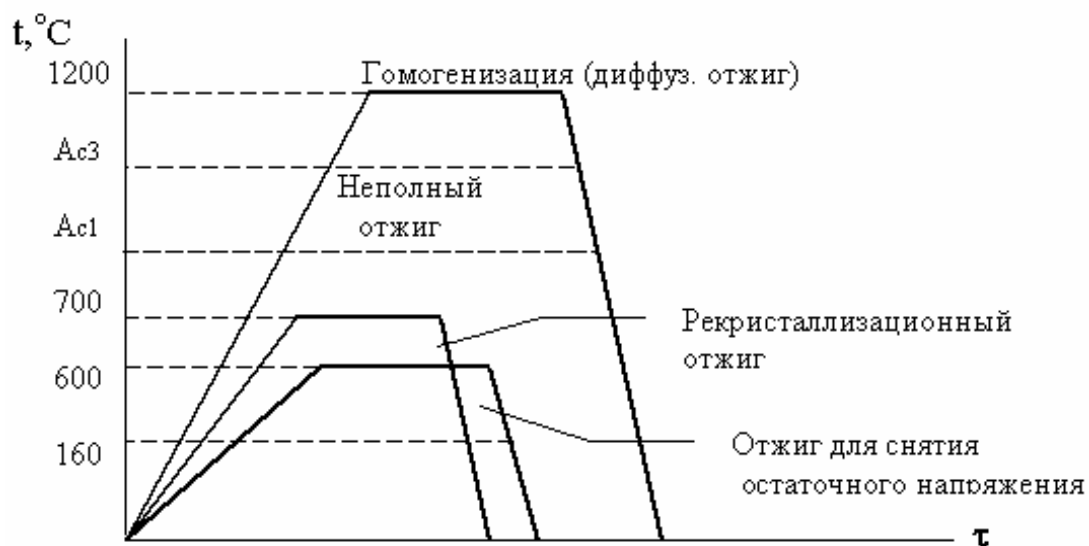


Рис. 6.1. Схема отжига первого рода

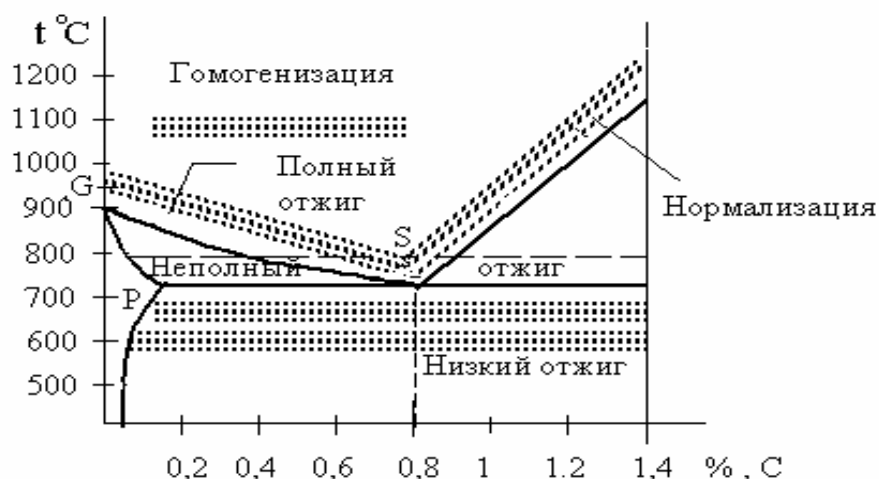


Рис. 6.2. Диаграмма различных видов отжига

*Гомогенизация* – применяется для устранения дендритной ликвации стальных слитков и включает (рис. 6.1): нагрев до температуры 1100 – 1200  $^{\circ}\text{C}$ , выдержку при данной температуре в течение 8 – 20 часов, медленное охлаждение. Общее время гомогенизации 50 – 100 часов.

*Рекристаллизационному отжигу* подвергают холоднодеформированную сталь для снятия наклёпа. Режим: нагрев до 700  $^{\circ}\text{C}$ ; выдержка в течение 0,5 – 1,5 часов; охлаждение.

*Нормализация* отличается от полного отжига большей скоростью охлаждения. Прочность и твёрдость нормализованной стали на 15 – 20 % выше, чем у отожжённой стали.

*Полный отжиг* применяется для перекристаллизации доэвтектоидной стали с целью измельчения зерна и снятия остаточных напряжений. Отжиг складывается из нагрева на 30...50  $^{\circ}\text{C}$  выше температуры  $A_{c3}$ , прогрева для завершения фазового превращения и медленного охлаждения вместе с печью. В результате нагрева образуется мелкозернистый аустенит, который при охлаждении превращается в мелкозернистый перлит.

*Неполный отжиг* – нагрев идёт только до температуры на 10 – 30  $^{\circ}\text{C}$  выше  $A_{c1}$  (723  $^{\circ}\text{C}$ ). Применяют для эвтектоидных и заэвтектоидных сталей. Получается зернистая структура перлита вместо пластинчатой.

*Отжиг для снятия остаточного напряжения.* Производится после сварки, литья и механической обработки. Режим: нагрев (после резания – при 570 – 600  $^{\circ}\text{C}$ , после сварки – при 650 – 700  $^{\circ}\text{C}$ , после шлифовки – при 160 – 180  $^{\circ}\text{C}$ ), выдержка 2 – 3 часа, охлаждение.

## 6.2. Закалка

*Закалка* – нагрев до температуры более высокой, чем температура фазового превращения (рис. 6.3), выдержка при этой температуре и быстрое охлаждение со скоростью, превышающей критическую.

Главным отличием закалки от других операций термической обработки является высокая скорость охлаждения, достигаемая применением специальных закалочных сред (вода, масло, расплавленные соли или их водные растворы).

*Прокаливаемость* характеризует способность стали закаливаться на требуемую глубину (рис. 6.4) и оценивается по расстоянию от поверхности изделия до слоя, в котором содержится не менее 50% мартенсита. При закалке в воде максимальный диаметр  $D_{кр}$  сквозной закалки больше, чем при закалке в масле.

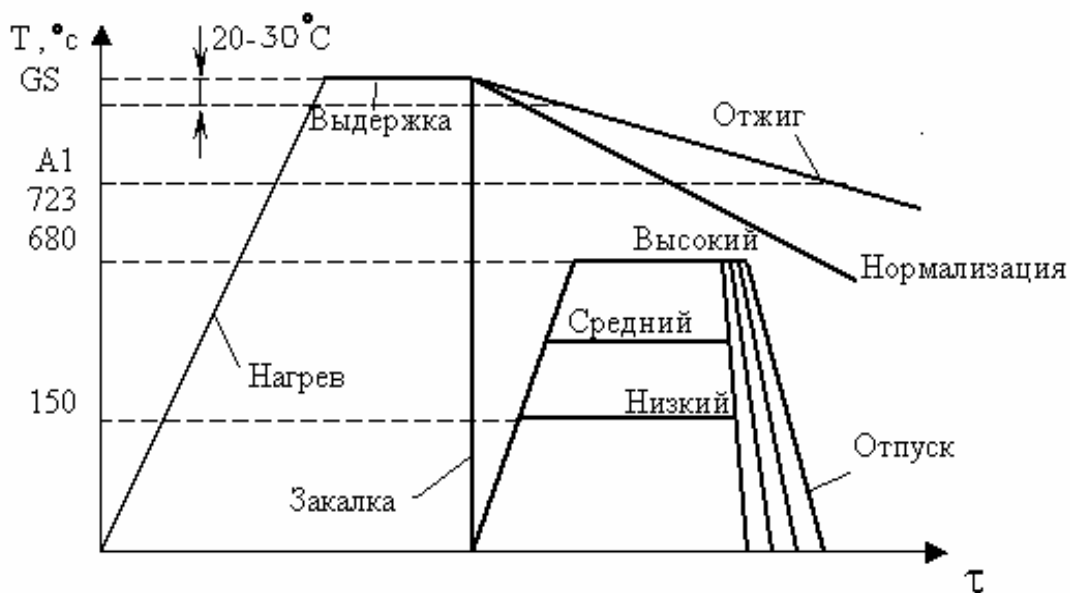


Рис. 6.3. Температурно-временная характеристика различных видов термообработки

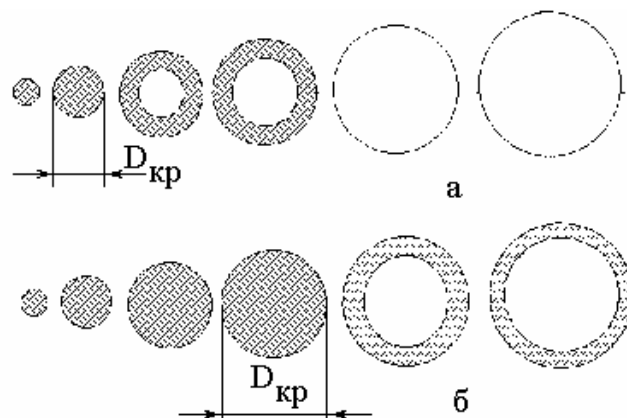


Рис. 6.4. Прокаливаемость образцов в масле (а) и воде (б): заштрихованы закаленные участки; незакаленная сердцевина не заштрихована,  $D_{кр}$  – максимальный диаметр сквозной закалки

### 6.3. Отпуск и искусственное старение

*Отпуск* – заключительная операция термической обработки. Цель – получение заданного комплекса механических свойств стали, а также неполное или частичное устранение закалочных напряжений.

*Низкий отпуск* – для углеродистых и низкоуглеродистых сталей, из которых изготавливаются режущие и измерительные инструменты. Режим низкого отпуска: нагрев изделия до 150 – 200 °С, выдержка 1 – 1,5 ч, охлаждение. Твердость HRC 58 – 63, высокая износостойкость.

*Средний отпуск* – применяется для пружин, рессор, штампов. Режим: нагрев до 350 – 500 °С, выдержка 1 – 8 ч, охлаждение на спокойном воздухе (в воде). HRC 40 – 50, высокая упругость, выносливость.

*Высокий отпуск* – повышает временное сопротивление, предел текучести, относительное сужение, ударную вязкость. Режим: нагрев до 500 – 680 °С, выдержка 1 – 8 ч, охлаждение на воздухе (для легированных сталей – в воде или масле). HRC 25 – 30, наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.

*Старение* – термическая обработка, которая производится для стабилизации внутренней структуры. *Естественное старение* происходит при обычной температуре. Максимальная твердость при естественном старении после весьма длительной выдержки – HRC 25 – 30. *Искусственное старение* происходит при нагреве стали до температур 100...170 °С. Нагрев существенно ускоряет процесс старения. Выдержка позволяет, не снижая твердости закаленной стали,

стабилизировать состояние углерода в ее структуре за счет выделения его в виде дисперсных карбидов.

## 7. Химико-термическая обработка (ХТО)

В основе ХТО лежат диффузионные процессы. Это тепловая обработка металлических изделий в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоёв.

Химико-термическая обработка позволяет повысить твёрдость, износоустойчивость, усталостную долговечность и контактную выносливость, а также стойкость изделия к окислению и электрохимической коррозии.

Модификация химического состава данного слоя имеет в большинстве способов химико-термической обработки диффузионный механизм, зависящий от температуры окружающей среды, температуры материала, давления окружающей среды и от времени.

### 7.1. Кинетика диффузионных процессов

Кинетика диффузии материала определяется тремя главными факторами: температурой, продолжительностью воздействия, начальной концентрацией диффундирующих атомов. Глубина диффузионного слоя зависит от времени ( $\tau$ ), температуры ( $T$ ) и давления, а также от начальной концентрации ( $C$ ). Чем выше эти параметры, тем больше глубина диффузионного слоя (рис. 7.1).

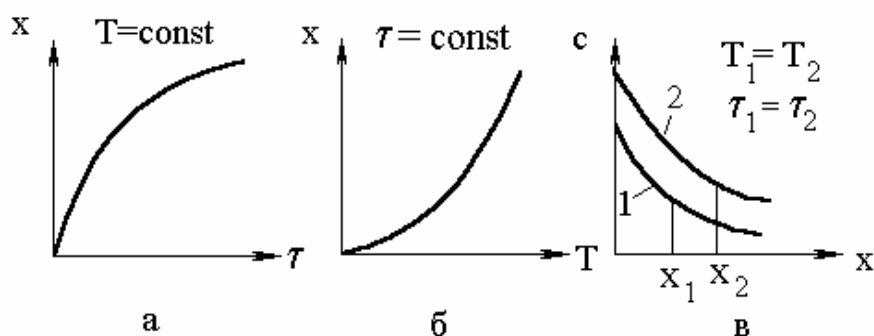


Рис. 7.1. Кривые диффузии модифицирующего элемента в поверхностный слой изделия: а – изменение толщины  $x$  диффузионного слоя во времени; б – то же в зависимости от температуры; в – изменение содержания  $C$  диффундирующего элемента по глубине слоя: 1 –  $C_{01}$ ; 2 –  $C_{02}$  ( $C_0$  – начальное содержание элемента у поверхности)

## 7.2. Виды ХТО

Различают несколько видов ХТО: цементация, азотирование, алитирование, силицирование, борирование стали. Наибольшее распространение получили цементация и азотирование. Цементация стали – технологический процесс насыщения поверхности стальных деталей углеродом. При цементации концентрация углерода в поверхностных слоях достигает 0,8...1 %. Поэтому с помощью цементации обрабатывают детали, изготовленные из низкоуглеродистых марок стали. После цементации сердцевина детали остается вязкой. Если детали имеют поверхности, не подлежащие ХТО, то их защищают, например, с помощью меднения. Цементации обычно подвергаются детали, которые должны иметь износоустойчивую поверхность и вязкую сердцевину. Такое распределение свойств позволяет получить детали, хорошо работающие на удар.

Цементацию проводят, как правило, в твёрдых и газообразных средах. Эти среды называются карбюризаторами. В качестве твердого карбюризатора используется древесный уголь и кокс. Ящик накрывают крышкой, кромки которой обмазывают огнеупорной глиной. После этого в ящик помещают в печь. Здесь его нагревают до температуры 910...930 °С. При этом образуется устойчивый аустенит, растворяющий углерод в больших количествах. При цементации атомы углерода проникают в решетку Fe  $\gamma$ . Выдержка в печи определяется требуемой глубиной цементируемого слоя. После цементации ящики охлаждают на воздухе до температуры 400...500 °С и затем раскрывают.

При газовой цементации изделия нагревают в среде газов, содержащих углерод. Процесс идет значительно быстрее чем в твердом карбюризаторе. Кроме того, появляется возможность полностью механизировать и автоматизировать процесс. Наиболее высокое качество цементации достигается в среде природного газа метана (CH<sub>4</sub>), а также в среде жидких углеводородов. Окончательные свойства цементируемых деталей получают в результате термической обработки, которую выполняют после цементации. За счет измельчения зерна при такой обработке повышаются показатели прочности. Обычно глубина цементируемого слоя 0,5...2,0 мм. Однако твердость цементированного слоя сохраняется только до температуры 200...250 °С.

*Азотирование стали* – насыщение поверхностного слоя стали азотом. Азотирование значительно повышает твердость поверхностного слоя, увеличивает его износоустойчивость, повышает

предел выносливости и стойкость к коррозии в среде атмосферы, воды и пара. Твердость азотированного поверхностного слоя значительно выше, чем у цементированной стали, и сохраняется до 550...600 °С. Толщина азотированного слоя обычно составляет 0,3... 0,6 мм. Азотирование проводят в атмосфере аммиака ( $\text{NH}_3$ ), который при нагреве диссоциирует, разделяясь на атомарные азот и водород. Атомарный азот проникает в железо.

*Борированием называют* ХТО, заключающуюся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагреве в соответствующей среде. Борирование чаще выполняют при электролизе расплавленной буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). Изделие служит катодом. Температура насыщения 930 – 950 °С, выдержка 2 – 6 ч. Процесс можно вести и без электролиза в ваннах с расплавленными хлористыми солями ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ ), в которые добавляют 20 % ферробора или 10 % карбида бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ). Хорошие результаты получены при газовом борировании. В таком случае насыщение ведут при температуре 850 – 900 °С в среде диборана ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) или треххлористого бора ( $\text{BCl}_3$ ) в смеси с водородом.

Диффузионный слой состоит из боридов  $\text{FeB}$  (на поверхности) и  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Толщина слоя 0,1–0,2 мм. Борированный слой обладает высокой твердостью (1800–2000 HV0, износостойкостью, коррозионной стойкостью, окислостойкостью (до 800 °С) и теплостойкостью.

Борирование применяют для повышения износостойкости втулок грязевых нефтяных насосов, вытяжных, гибочных и формовочных штампов, деталей пресс-форм и машин для литья под давлением.

Кроме рассмотренных видов ХТО, применяют нитроцементацию, алитирование, хромирование, силицирование.

## **Глава III. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ**

### **8. Стали и сплавы**

Широкое применение сталей в различных отраслях обусловлено сочетанием ценного комплекса их механических, теплофизических, химических, магнитных и других свойств. Номенклатура сталей, используемых в приборостроении достаточно велика. Разработана информационная система маркировки, отражающая состав, технологию получения и структуру сталей различных видов.

Сталь – сплав железа с углеродом (до 2 % С). По химическому составу сталь разделяют на углеродистую и легированную. По качеству – на сталь обыкновенного качества, качественную, повышенного качества и высококачественную.

#### **8.1. Углеродистые стали обыкновенного качества**

Углеродистые стали обыкновенного качества характеризуются значительным содержанием вредных примесей, неметаллических включений, газов. Стали обыкновенного качества выпускаются преимущественно в виде проката. Маркируют их буквами Ст и цифрами. Цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава. Углеродистую сталь обыкновенного качества изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Стбсп. Буквы "кп", "пс", "сп" обозначают степень раскисления ("кп" – кипящая, "пс" – полуспокойная, "сп" – спокойная).

#### **8.2. Углеродистые качественные стали**

Углеродистые качественные конструкционные стали имеют меньшее по сравнению со сталями обыкновенного качества содержание вредных примесей и неметаллических включений. Эти стали по видам обработки при поставке делятся на горячекатаную и кованую, калиброванную, круглую со специальной отделкой поверхности – серебрянку. Маркируют двухзначными цифрами 05, 08, 10, 20..85, характеризующими содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 40 содержит 0,4 % углерода. Стали этой группы изготавливают без термической обработки, термически обработанными и нагартованными. Их применяют в машиностроении и приборостроении для изготовления методом штамповки корпусов, кожухов (Ст08кп, Ст05кп, Ст10кп), сварных конструкций, резервуаров,



емкостей, труб средней прочности (Ст08сп, Ст10сп), малонагруженных зубчатых колес, кулачков, осей (Ст10, сталь20, сталь25). Термическая обработка позволяет использовать эти стали для изготовления деталей, испытывающих циклические нагрузки (стали 40,45, 55, 60). Стали с повышенным содержанием углерода и марганца (65, 70, 75, 80, 60Г, 65Г, 70Г) применяют в качестве рессорно-пружинных.

Инструментальные углеродистые стали обозначают буквой У с указанием на среднее массовое содержание углерода в десятых долях процента. Например, в стали У12 содержится около 1,2% углерода. Сталь У12А высококачественная. Некоторые виды режущих инструментов работают в тяжелых условиях и для них созданы стали с условным названием “быстрорежущие”. Их маркируют буквой Р, которую ставят в начале обозначения марки. Например, быстрорежущая сталь Р6М5 содержит 6 % вольфрама и 5 % молибдена.

### **8.3. Легированные стали**

Легированной называют сталь, в которую введены специальные элементы для получения требуемых свойств. Легированную сталь по степени легирования разделяют на низколегированную (легирующих элементов до 2,5 %), среднелегированную (от 2,5 до 10 %), высоколегированную (от 10 до 50 %). В зависимости от основных легирующих элементов различают сталь 14 групп.

К высоколегированным сталям относят: коррозионностойкие (нержавеющие) стали и сплавы, обладающие стойкостью против электрохимической и химической коррозии; межкристаллитной коррозии, под напряжением и др.; жаростойкие (окалиностойкие) стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения в газовых средах при температуре выше 500°C, работающие в ненагруженном и слабонагруженном состоянии; жаропрочные стали и сплавы, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью.

#### **8.3.1. Маркировка легированных сталей**

Для обозначения марок легированных сталей используют цифры и буквы. Пример: сталь 12Х2Н4А содержит углерода – 0,12%, хрома – 2%, никеля – 4%; А – высококачественная сталь.

Буквенные обозначения элементов: Б – ниобий, Р – бор, В – вольфрам, Т – титан, Г – марганец, С – кремний, Д – медь, Ф –

ванадий, К – кобальт, Х – хром, М – молибден, Ц – цирконий, Н – никель, Ю – алюминий, П – фосфор, Ч – редкоземельные.

Благодаря введению легирующих элементов можно сформировать в стали требуемые свойства: коррозионную стойкость, жаропрочность, жаростойкость, твёрдость, ударную вязкость, износоустойчивость. На рис.8.1 показано влияние легирующих элементов на предел прочности феррита, содержащего менее 0,02 % углерода.

Сталь легированную конструкционную в зависимости от химического состава и свойств делят на качественную, высококачественную А, особовысококачественную Ш (электрошлакового переплава). По видам обработки при поставке различают сталь горячекатаную, кованую, калиброванную, серебрянку. По назначению изготавливают прокат: а) для горячей обработки давлением и холодного волочения (подкат); б) для холодной механической обработки.



Рис.8.1. Зависимость  $\sigma_v$  стали от содержания легирующих элементов в феррите

#### 8.4. Электротехническая сталь

Электротехническую тонколистовую сталь разделяют:

- по структурному состоянию и виду прокатки на классы: 1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой;
- по содержанию кремния: 0 – до 0,4 %; 1 – св. 0,4 до 0,8 %, 2 – св. 0,8 до 1,8 %; 3 – св. 1,8 до 2,8 %; 4 – св. 2,8 до 3,8 %; 5 – св. 3,8 до 4,8 %, химический состав стали не нормируется;
- по основной нормируемой характеристике на группы: 0 – удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ( $P_{1,7/50}$ ); 1 – удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте

50 Гц ( $P_{1,5/50}$ ); 2 – удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ( $P_{1,0/400}$ ); 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ( $B_{0,4}$ ); 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м ( $B_{10}$ ).

## **9. Медь и сплавы на ее основе**

### **9.1. Свойства меди и классификация медных сплавов**

Медь – металл красного, в изломе – розового цвета с кристаллической структурой в виде ГЦК. По электропроводности медь занимает второе место после серебра. Поэтому медь является важнейшим материалом для изготовления электропроводников (проводов, шин, кабелей и т.п.). Медь также имеет высокую теплопроводность, в связи с чем широко применяется в теплообменниках (радиаторы, холодильники и т.п.). Медь и ее сплавы хорошо свариваются всеми видами сварки и легко поддаются пайке. На основе меди получены сплавы с очень ценными свойствами. Медь относится к тяжелым металлам, ее плотность 8940 кг/м<sup>3</sup>. Медь отлично обрабатывается давлением, но плохо резанием и имеет плохие литейные свойства, поскольку дает большую усадку. Чистую медь и ее малолегированные сплавы широко используют в электротехнике, электронике и других отраслях.

Медь выпускают следующих марок (ГОСТ 859 – 2001): катодную – МВ4к, М00к, М0ку, М1к; бескислородную – М00б, М0б, М1б; катодную переплавленную – М1у; раскисленную – М1р, М2р, М3р. По содержанию примесей различают марки меди М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М1 (99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu), М3 (99,5 % Cu).

По составу медные сплавы подразделяют на латуни, бронзы, медно-никелевые сплавы.

### **9.2. Латуни**

Латунь (ГОСТ 17711 – 93) – сплав меди с цинком. Помимо Zn в латунь добавляют различные легирующие элементы. Химические элементы, используемые в медных сплавах, обозначаются следующими индексами в марке сплавов: Al – А; Ва – Бр; W – ВАМ, Внм, Вэл; Bi – Ви; V – В; Cd – Гм; Ga – Гл; Ge – Г; Fe – Ж; As – Мш; Ni – Н; Sn – О; Pb – С; Р – Ф; Co – К(Ко); Au – Зл; Si – Кр (К); Mg – Мг; Mn – Мц; Cu – М; Se – Ст; Ag – Ср; Sb – Су; Tu – Ти; Zn – Ц.

Все латуни по технологическому признаку подразделяют на две группы: деформируемые, из которых изготавливают листы, трубы, проволоку и другие полуфабрикаты, и литейные – для фасонного

литья. Литейные латуни обладают хорошей жидкотекучестью и обладают хорошими антифрикционными свойствами.

Двойные латуни маркируют буквой Л и цифрами, показывающими содержание меди (остальное цинк). Например, Л90 – Cu 90 %; Zn 10 %. Латуни перерабатывают в изделия: обработкой, давлением, литьём, резанием. Латуни хороший конструкционный материал.

Алюминиевые латуни имеют повышенные механические характеристики и коррозионную стойкость. ЛА85–0,5 (Cu – 85 %; Al – 0,5 %, остальное Zn).

Многокомпонентные латуни: ЛАНКМЦ 75 – 2 – 2,5 – 0,5 – 0,5 (Cu – 75 %; Al – 2 %; Ni – 2,5 %; Si – 0,5 %; Mn – 0,5 %, остальное Zn).

Марганцевые латуни обладают высокими механическими свойствами, обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии, стойки к коррозии. ЛМЦ 58 – 2; Cu – 58% (Mn – 2 %; Zn – 40 %).

Свинцовые латуни обладают антифрикционными свойствами, обрабатываются резанием. Марки: ЛС 63 – 3; ЛС 74 – 3.

Кремнистые латуни обладают высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и в морской воде. Марки: ЛК80 – 3; ЛКС65–1,5– 3.

Практическое применение находят латуни с содержанием Zn до 48 %.

### 9.3. Бронзы

Бронзы – сплавы меди, основными компонентами которых являются: олово, алюминий, бериллий, кремний, свинец и др.

Бронзы обозначают буквами Бр и цифрами, аналогично маркировке латуней.

Литейные бронзы – содержат до 6 % Sn, их используют для изготовления деталей ответственных углов трения. Оловянные бронзы (ГОСТ 613 – 79) обладают высокими антифрикционными свойствами, не чувствительны к перегреву, морозостойки, немагнитны. Например, бронза БРОЦСН – 3 – 7 – 5 – 1 имеет следующий состав: Sn – 3%; Zn – 7 %; Pb – 5 %; Ni – 1 %, остальное Cu. Недостаток оловянных бронз – склонность к образованию пор в отливках, малая жидкотекучесть.

Деформированные оловянные бронзы содержат до 80% Sn, из них изготавливают пружины и деформируемые детали. Бериллиевая бронза БрБ2 обладает хорошими упругими свойствами, из неё изготавливают пружины.

## 9.4. Сплавы меди с никелем

Медно-никелевые сплавы являются основными сплавами для изготовления технических резисторов (мельхиор, нейзильбер). В качестве жаростойких сплавов для работы при температуре не выше 400 – 500 °С можно применять медно-никелевые сплавы типа *константан*, содержащие 40 – 50 % Ni. В указанном диапазоне температур они достаточно жаростойки, имеют высокое электрическое сопротивление при малом его температурном коэффициенте.

Сплавы меди с никелем и другими легирующими элементами – это бронзы особого вида: мельхиор, нейзильбер, копель и др.

Мельхиор – МНЖМц 30 – 1 – 1 (Ni и Co 29 – 33 %; Fe 0,5 – 1 %; Mn 0,5 – 1 %, остальное Cu).

Нейзильбер – МНЦС 16– 9–1,8 (Ni и Co 15–16,7 %; Pb 1,6–2 %; Cu 51 – 55 %, остальное Zn).

Копель – Ni и Co 44 % , Mn 0,1 – 1 %, остальное Cu.

Куниали – МНА13-3, МНА6 – 1,5. Манганин – МНЦ18 – 20.

## 10. Алюминий и его сплавы

### 10.1. Свойства алюминия и классификация алюминиевых сплавов

Алюминий – металл серебристо-белого цвета.

Температура плавления чистого алюминия равна 660 °С, алюминий имеет ГЦК решетку и температурным полиморфизмом не обладает. При нормальной температуре его плотность  $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ . По величине электропроводности алюминий среди металлов находится на четвертом месте (после серебра, золота и меди). При 25 °С его электропроводность равна 65 % от электропроводности международного эталона отожженной меди.

Механические свойства алюминия типичны для чистых металлов с ГЦК решеткой: он имеет низкую прочность ( $\sigma_B=40 \text{ МПа}$ ) и высокую пластичность ( $\delta=50\%$ ). Модуль упругости  $E=70 \text{ ГПа}$ .

Поверхность алюминия покрыта сплошной тонкой (до 5 нм) и прочной оксидной пленкой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , имеющей хорошее сцепление с металлом и защищающей алюминий от атмосферной коррозии.

По объему производства алюминий и сплавы на его основе занимают первое место среди нежелезных металлических материалов. Это обусловлено тем, что алюминиевые сплавы отличаются уникальным комплексом свойств: низкой плотностью, высокой

удельной прочностью ( $\sigma_B/\rho$ ), хорошей коррозионной стойкостью во многих средах и высокой технологичностью (их плавят и обрабатывают давлением при невысоких температурах в воздушной атмосфере).

Первичный алюминий (ГОСТ 11069–74 (1–Х–6), (2–III–80), (3–II–85), (4–VIII–87), (5–I8–8), (6–VII–89), (7–XII–92)) маркируют буквой А, за которой следуют цифры, указывающие десятые, сотые или тысячные доли процента содержания алюминия. Например, алюминий марки А995 содержит не менее 99,995 % Al, марки А99 – 99,99 % Al, марки А7 – 99,7 % Al и марки А0 – 99,0 % Al. Металлургические заводы выпускают алюминий трех сортов: особой чистоты (А999), высокой чистоты (А995, А99, А97, А95) и технической чистоты (А85, А8, А7, А6, А5, А0).

Основные примеси в первичном алюминии – железо и кремний. Например, алюминий марки А7 содержит не более 0,16 % Fe и 0,16 % Si и не более 0,30 % суммы всех примесей.

Для повышения прочности алюминий легируют разными элементами. Ни с одним из элементов периодической системы алюминий не образует непрерывный ряд твердых растворов. Всего лишь 9 элементов имеют предельную растворимость в твердом алюминии в количестве более 1,5 % (по массе): Zn 82,8; Ag 55,6; Ga 20,0; Mg 17,4; Ge 6,0; Cu 5,7; Li 4,2; Mn 1,82; Si 1,65. За исключением остродефицитных серебра, галлия и германия, все эти элементы образуют с алюминием двойные системы эвтектического типа.

Алюминиевые сплавы подразделяют на деформируемые и литейные (рис. 10.1). Из деформируемых сплавов методом полунепрерывного литья получают круглые и плоские слитки, которые подвергают горячей и холодной обработке давлением (прессованию, прокатке, ковке, штамповке и т.п.).

Для обозначения промышленных деформируемых сплавов используют исторически сложившуюся буквенно-цифровую и буквенную маркировку, причем цифры в марке чаще всего не обозначают концентрацию легирующих элементов. Позднее была введена единая маркировка из четырех цифр. Первая цифра во всех марках обозначает основу сплава – алюминий. Вторая цифра в марке несет главную смысловую нагрузку, указывая систему, являющуюся основой данного сплава: 0 – технический алюминий, 1 – система Al–Cu–Mg, 2 – системы Al–Cu–Mn и Al–Li, 3 – системы Al–Mg–Si и Al–Mg–Si–Cu, 4 – система Al–Mn, 5 – система Al–Mg, 9 – системы Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–Cu. Цифры 6, 7 и 8 – резервные для

возможных новых систем. Последние две цифры в марке указывают порядковый номер сплава.

В ГОСТ 4784–97 дано традиционное буквенное и, параллельно, цифровое обозначение марки. Новым сплавам присваивают только цифровое обозначение.

Литейные сплавы, предназначенные для отливки фасонных деталей в песчаные формы, кокиль, методом литья под давлением и другими способами, должны обладать хорошими литейными свойствами: высокой жидкотекучестью, сопротивляемостью образования горячих трещин, малой склонностью к образованию рассеянной пористости. Для этого они должны иметь небольшой интервал кристаллизации и содержать достаточно большое количество эвтектической жидкости, кристаллизирующейся при постоянной температуре или в узком интервале температур.

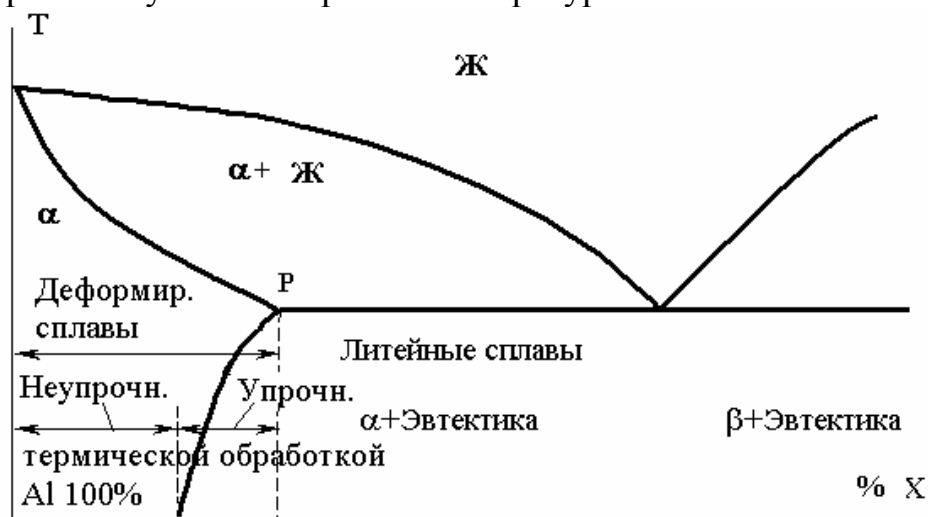


Рис. 10.1. Диаграмма состояния сплавов алюминия

Литейные алюминиевые сплавы в соответствии с ГОСТ 1583–93 маркируют буквой А, за которой следуют буквы, обозначающие легирующий элемент: К–Si, М–Cu, Мг–Mg, Н–Ni, Кд–Cd. Цифры после обозначения элемента указывают среднее его содержание. Если концентрация элемента не превышает 1,5 %, то после его обозначения цифры не проставляют. Во многих сплавах магний, являющийся одним из основных компонентов, содержится в десятых долях процента; в марках этих сплавов его обозначение отсутствует. Буквы ч и пч в конце марки (чистый, повышенной чистоты) указывают на пониженное содержание примесей.

## 10.2. Литейные алюминиевые сплавы

Литейные сплавы (Al – Si; Al – Cu; Al – Mg) отличаются повышенным содержанием легирующих элементов, а эвтектическая структура (15 – 20 %) обеспечивает жидкотекучесть и более низкие температуры плавления. Главное достоинство – жидкотекучесть, небольшая усадка, хорошие механические свойства, сопротивление коррозии. Металл должен обладать жидкотекучестью, чтобы заполнить всё пространство литейной формы.

Лучшие литейные свойства у сплавов Al – Si – силумины.

Силумины – обладают высокой коррозионной стойкостью. Типичным представителем силуминов является сплав АЛ2 (Si – 10,13 %,  $\sigma_{\text{в}} = 180$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 90$  МПа). Структура близка к эвтектической, хорошо обрабатывается резанием, сваривается.

Коррозионно- стойкие сплавы (устаревшее мангалины) – Al – Mg (АЛ8, АЛ27, АЛ29). Для этих сплавов характерна высокая стойкость к коррозии, прочность, обрабатываемость резанием. Литейные свойства невысоки, так как сплав не содержит эвтектики.

Для подшипников изготавливаются специальные алюминиевые сплавы: АСМ (0,5 % Mg; 3 – 5 % Sb); АСС – 6 – 5 (0,5 % Mg, 5 – 6 % Sb, 4 – 5 % Pb).

## 10.3. Спечённые алюминиевые порошки

Спечённые алюминиевые порошки получают методом порошковой металлургии. Они не входят ни в первую, ни во вторую группу, это обособленная группа. Это соединение Al+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от 6 до 22 %). Порошок получают из технически чистого алюминия распылением в азоте с последующим измельчением. Чешуйчатые частицы алюминия в процессе разлома покрываются тонкой плёнкой оксида, толщиной 0,01 – 0,1 мкм, т. е. алюминий в воздухе быстро покрывается оксидной плёнкой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что предохраняет его от коррозии.

Марка	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа
САП – 1	6 – 9	220
САП – 2	9 – 13	280
САП – 3	13 – 17	320
САП – 4	18 – 23	370



#### **10.4. Спечённые алюминиевые сплавы**

Спеченные алюминиевые сплавы получают из порошков алюминия с небольшим содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , легированных Fe, Ni, Cu, Mn, и др. Например, САС – содержит 25 – 30 % Si и 7 % Ni. Изготовление полуфабрикатов из материала САС – 1 включает в себя несколько технологических процессов: приготовление высококремнистого сплава для последующего распыления; его распыление (пульверизация) сжатым газом с помощью форсунок; изготовление из порошков полуфабрикатов методом гидростатического прессования.

Достоинства САС – 1 заключается в низком и стабильном коэффициенте линейного температурного расширения, что очень важно при малой величине зазора газостатического подвеса. Сплавы типа САС–1 не склонны к интеркристаллитной коррозии. Их защита от общей коррозии осуществляется анодированием в серной кислоте с наполнением пленки в растворе бихромата калия. Они хорошо поддаются механической обработке: точению, фрезерованию, сверлению, полированию с обеспечением точности изготовления до долей микрометра [1]. Использование этих сплавов в качестве конструкционных материалов позволяет значительно уменьшить массу гиропиборов.

#### **10.5. Общая характеристика видов термической обработки алюминиевых сплавов**

Большое разнообразие структур, которые могут быть получены в изделиях из алюминиевых сплавов после термообработки, является результатом различного отклонения состояния сплавов от термодинамически равновесного при комнатной температуре.

Термической обработкой можно достичь большого разнообразия структур (и свойств) и в сплавах, не имеющих фазовых превращений в твердом состоянии при нагреве и охлаждении, но только тогда, когда исходное неравновесное состояние получено либо при литье, либо при обработке давлением. В этих случаях изменение структуры при термообработке необратимо. Для алюминиевых сплавов широкое распространение получили три вида термообработки: отжиг, закалка и старение.

Деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термической обработкой: Al – Mn; Al – Mg. Они обладают высокой пластичностью, свариваемостью, коррозионной стойкостью.

Границей деформируемых и литейных алюминиевых сплавов служит предел насыщения твёрдого раствора при температуре

эвтектики (точка Р рис. 10.1). Деформируемые сплавы после обработки давлением подвергают термической обработке. По своим механическим свойствам они превосходят литейные сплавы.

Алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой, подразделяют на сплавы нормальной прочности, высокопрочные сплавы, жаропрочные сплавы, сплавы дляковки и штамповки. Типичным представителем сплавов нормальной прочности являются дуралюмины, относящиеся к системе  $Al - Cu - Mg$ , которые обозначаются буквой Д. Марганец повышает коррозионную стойкость, температуру рекристаллизации и улучшает механические свойства дуралюминов. Для упрочнения сплавов применяют закалку: Д1; Д18 – 450 – 505 °С; Д16 490 – 500 °С с охлаждением в холодной воде.

Дуралюмины широко используют в авиации: Д1 – лопатки винтов, Д16 – элементы фюзеляжа, Д18 – основной заклёпочный материал.

Высокопрочные сплавы:  $Al - Zn - Mg - Cu$  (В95; В96).

Закалка при температуре 406 – 480 °С. Искусственное старение при 120 – 190 °С, 16 часов. Температура эксплуатации  $t_{эксп} = 90 + 120$  °С.

Жаропрочные сплавы – АК – 4; АК4 – 1. Температура эксплуатации  $t_{эксп}$  до 300 °С. Используют после закалки и старения, легированы Cu, Fe, Ni, Mn, Ti.

Сплавы дляковки и штамповки обладают высокой пластичностью. Штамповка при температуре 450 – 475 °С.

## **11. Титан и его сплавы**

Высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, достаточное распространение в природе способствуют расширению области использования титана в качестве конструкционного материала.

Титан обладает высокой стойкостью к воздействию окислительных и коррозионных сред благодаря образованию на поверхности прочной оксидной пленки. В большинстве сплавов титана присутствует алюминий.

Титановые сплавы классифицируют по технологии переработки (литейные и деформируемые); механическим свойствам (нормальной прочности, высокопрочные, повышенной пластичности); по отношению к термической обработке (упрочняемые и неупрочняемые термически); жаропрочные и т.д. В приборостроении сплавы на основе

титана применяют для изготовления корпусных деталей, рамок приборов ориентации и навигации летательных аппаратов и т.д.

К группе более прочных сплавов титана относят ВТ–5, ВТ–6, ВТ–16, ВТ–20. Временное сопротивление  $\sigma_v$  этих сплавов достигает 1200 МПа. Их поставляют в форме листов, штамповка которых выполняется с подогревом (800...900). Сплав ВТ–6 относится к системе Ti – Al – V, сплав ВТ–16 – к системе Ti – Al – Mo – V. Сплав ВТ – 5 представляет систему Ti – Al. Все эти сплавы применяют в термически обработанном состоянии – отожженном или закаленном и искусственно состаренном. Большую группу составляют литейные титановые: ВТ3–1Л, ВТ5–Л, ВТ14Л, ВТ6Л, ВТ9Л. Буква Л в маркировке сплава означает – “Литейный”.

Титан образует сплавы на основе интерметаллических соединений, в которых титан вступает в химическое соединение с другим металлом. Среди таких сплавов выделяется сплав на основе TiNi, называемый нитинолом. Этот сплав обладает так называемым эффектом памяти формы. Он способен воспроизводить заданную форму изделия при определенном тепловом воздействии.

## **Глава IV. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **12. Пластические массы и резины**

Пластмассы – искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ.

Достоинства пластмасс:

- низкая плотность ( $\rho = 0.9 \dots 3 \text{ т/м}^3$ ),
- прочность силовых пластиков сопоставима с прочностью стали,
- пластмассы имеют хорошие технологические свойства,
- хорошие электроизоляционные свойства,
- высокая химическая стойкость,
- фрикционные и антифрикционные свойства.

Недостатки пластмасс:

- невысокая теплостойкость,
- низкий модуль упругости,
- склонность к старению.

По происхождению полимеры разделяют на природные и синтетические. Типичными представителями природных полимеров являются целлюлоза, крахмал, натуральный каучук, слюда, асбест. Природные полимеры образуются в процессе биосинтеза в клетках живых организмов. Их выделяют с помощью экстракции (вытяжки, перевода в другое вещество), фракционного осаждения из растительного и животного сырья. Однако в промышленности природные полимеры используют мало.

Синтетические полимеры представляют собой продукт синтеза (целенаправленного получения сложных веществ из более простых), основанного на знании молекулярного строения и реактивной способности. Номенклатура синтетических полимеров постоянно расширяется.

#### **12.1. Классификация полимеров**

Все полимеры можно разделить по составу на две основные группы: органические, элементоорганические и неорганические.

Органические полимеры – наиболее обширная группа соединений. Смолы и каучуки являются органическими полимерами. К органическим полимерам относят соединения, молекулы которых содержат атомы углерода, водорода, азота, кислорода, серы, галогенов, входящие в состав главной цепи и боковых групп.

Элементоорганические соединения содержат в составе основной цепи неорганические атомы (Si, Ti, Al), сочетающиеся с органическими

радикалами ( $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5$ ,  $\text{CH}_2$ ). Эти радикалы придают материалу прочность и эластичность, а неорганические атомы сообщают повышенную теплостойкость. В природе таких соединений не встречается. Представителями их являются кремнийорганические соединения.

Неорганические полимеры – это соединения, которые не содержат в составе макромолекул атомов углерода (силикатные стекла, керамика, слюда, асбест).

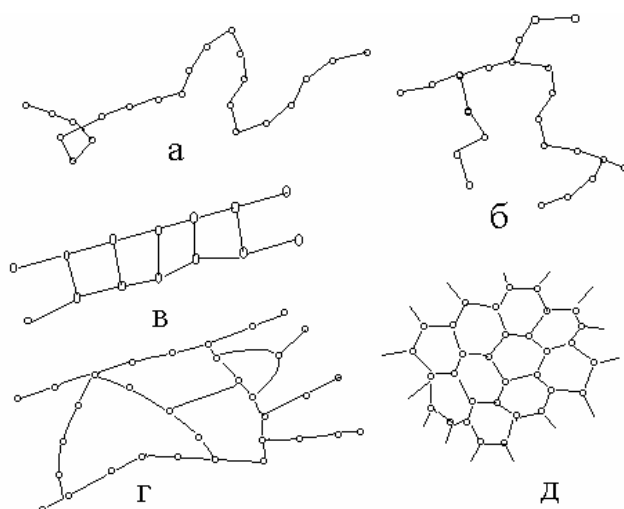
В процессе получения полимерного соединения мономерные звенья выстраиваются в определенную цепь. По характеру строения полимерных цепей различают полимеры линейного, разветвленного и сетчатого строения (рис. 12.1).

Линейные макромолекулы (рис. 12.1, а) представляют собой длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки.

Разветвленные макромолекулы (рис. 12.1, б) определяют меньшую прочность и повышенную легкоплавкость, а также растворимость полимера. Это происходит потому, что разветвленная форма макромолекул препятствует их сближению, что и определяет пониженное межмолекулярное взаимодействие, а следовательно и пониженную прочность.

Макромолекула ленточная или лестничная состоит из двух цепей, соединенных химическими связями (рис. 12.1, в). Лестничные полимеры обладают повышенной теплопроводностью, большей жесткостью, они нерастворимы в стандартных органических растворителях.

Пространственные или сетчатые полимеры получают при соединении (сшивке) макромолекул между собой в поперечном направлении (рис. 12.1, г). Пространственные полимеры лежат в основе



конструкционных неметаллических материалов. К полимерам этого типа относятся также паркетные или пластинчатые структуры (рис. 12.1, г). Примером такого полимера является графит.

Рис. 12.1. Формы макромолекул

По фазовому состоянию полимеры подразделяют на аморфные и кристаллические.

Аморфные полимеры построены из цепных молекул, которые собраны в клубки или пачки. Эти структуры считаются недолговечными, отчего с течением времени свойства аморфных полимеров могут изменяться.

Кристаллические полимеры характерны тем, что при определенных условиях в их структуре образуются пространственные решетки кристаллов. Например, полиэтилен является кристаллизующимся полимером. В некоторых случаях могут встречаться комбинации кристаллических и аморфных полимеров.

Полимерные материалы изменяют свои свойства под воздействием температуры. По этому признаку различают термореактивные и термопластичные полимеры.

Термопластичные полимеры (термопласты) обладают свойством многократно переходить при нагревании в состояние расплава. Термопласты удобны в обработке, дают незначительную усадку при формировании (1 – 3 %).

Термореактивные полимеры (реактопласты) при нагревании выше определенных, характерных для данного типа полимера, температур, становятся неплавкими и практически нерастворимыми. После отверждения они хрупки, часто дают большую усадку (10 – 15 %), поэтому их усиливают наполнителями.

## **12.2. Состав пластмасс**

1. Связывающее вещество – смолы, эфиры, целлюлозы.
2. Наполнитель (арматура) – вводят в состав пластмасс для формирования дополнительных свойств (механических, электрических и др.).
3. Пластификатор – вводят для повышения эластичности и облегчения обработки (олеиновая кислота, стеарин, дибутилфталат).
4. Отвердитель – предназначен для отверждения (полимеризации, поликонденсации) смол.
5. Ускорители – вводят для ускорения и большей полноты реакции отверждения.
6. Красители – для придания пластмассе декоративного вида. Красителями могут быть минеральные пигменты или спиртовые растворы органических красок.
7. Специальные добавки – применяют для придания пластмассам особых свойств. В качестве их используют смазочные материалы, добавки для уменьшения статических зарядов и горючести, для защиты от плесени и других видов микробиологической коррозии.

По виду наполнителя пластмассы делятся на

- порошковые (тальк, графит, древесная мука);
- волокнистые (очёсы хлопка, льна, асбест, стеклянные волокна);
- слоистые (листы бумаги в гетинаксе, хлопчатобумажные листы, асбестовые, стеклянные ткани в текстолите, стеклотекстолите);
- газонаполненные.

### 9. 3. Термопласты

Полиэтилен – продукт полимеризации бесцветного газа этилена (рис. 12.2). В зависимости от условий полимеризации (давления, вида катализатора, температуры) получают продукт с различной молекулярной массой. Различают полиэтилен высокого давления (низкой плотности) с молекулярной массой 80000...500000 (ПЭВД), полиэтилен низкого давления – 80000...3000000 (ПЭНД), полиэтилен среднего давления – 300000...000000 (ПЭСД), высокомолекулярный полиэтилен низкого давления с молекулярной массой 2000000...3500000 (СВМПЭ).

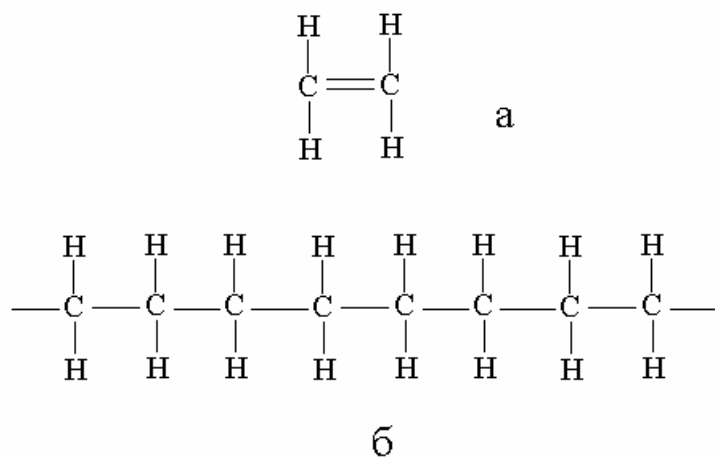


Рис. 12.2. Структура макромолекулы:  
а – этилен  $C_2H_4$ ;  
б – полиэтилен  $C_2H_{4n}$

Необходимо отметить, что классификация полиэтиленов по давлению в процессе их синтеза или по плотности не полностью отражает свойства получаемого продукта. Поэтому при характеристике полиэтилена целесообразно указывать его плотность и давление синтеза.

Температурный диапазон эксплуатации полиэтилена от  $-70$  до  $+60...+100$  °С. Морозостойкость полиэтилена достигает  $-70$  °С. Полиэтилен химически стоек, не растворим при  $t = +20$  °С ни в одном из известных растворителей, но недостаточно стоек к маслам и жирам.

Существенный недостаток полиэтилена – подверженность старению. Изготавливают полиэтиленовые трубы, плёнки, чехлы. Для изготовления деталей из полиэтилена применяют литье под давлением,

экструзию, вакуумформование. Полиэтилен хорошо сваривается. Благодаря своим свойствам полиэтилен находит широкое применение в изделиях медицинского назначения.

Полипропилен – производная полиэтилена. Имеет хорошие механические свойства, но очень низкую морозостойкость.

Полистирол – твёрдый, жёсткий, термопластичный полимер. Хорошо окрашивается. Обладает хорошими диэлектрическими свойствами, очень мало поглощает влагу, обладает хорошей прозрачностью. Недостатки полистирола – склонность к старению и образованию трещин. Из полистирола литьём под давлением и экструзией изготавливают ручки, детали радиотехники и приборов.

Фторопласты. Название этот термопласт получил от того, что в цепь полимера входит фтор. Это высококачественный диэлектрик (изоляционные трубочки, прокладки). Стоек к действию кислот, щелочей, растворителей, окислителей.

Фторопласт – 4, например, можно эксплуатировать до температуры  $t_{\max} = + 250$  °С. Достоинства: обладает низким коэффициентом трения, негорюч, стоек к маслам, топливу. К его недостаткам относится низкая твёрдость и высокая стоимость. Фторопласт – 4 применяют для изготовления прокладок, уплотнительных колец, подшипников, втулок. Изготавливают также металлофторопластовые покрытия, которые практически не требуют смазки.

Органическое стекло – прозрачный термопласт. Чаще всего применяют полиметилметакрилат. Он более чем в два раза легче минеральных стёкол. Полиметилметакрилат получают полимеризацией метилметакрилата, которая происходит при определённой температуре в специальных формах, из которых потом извлекают готовую продукцию – листы, блоки. Для улучшения прозрачности из массы, приготовленной для полимеризации, удаляют пузырьки воздуха вакуумированием в специальных вакуумных камерах.

Полиметилметакрилат хорошо окрашивается, обладает светопрозрачностью толщиной до 24 мм. При нормальной температуре устойчив к воздействию воды, разбавленных кислот и щелочей, спиртов и масел.

Отходы оргстекла хорошо утилизируются, поскольку при температуре + 300 °С деполимеризуются с образованием мономера, который может быть снова употреблён для получения полиметилметакрилата.

Высокие электроизоляционные свойства, химическая стойкость, хорошая светопрозрачность определили применение этого материала в



приборах, в медицинской промышленности, при протезировании, в светотехнической промышленности. Этот материал хорошо сваривается и склеивается, при температуре + 80 °С оргстекло начинает размягчаться, при температуре + 150...180 °С появляется пластичность, что позволяет формировать из него различные детали.

Недостатком оргстекла является склонность к образованию микротрещин, так называемого “серебра”, что снижает прозрачность стекла. Причиной возникновения трещин являются внутренние напряжения, возникающие в связи с низкой теплопроводностью при высоком температурном коэффициенте линейного расширения. В этом случае хаотично расположенные макромолекулы при нагревании будут расширяться в разных направлениях, что и вызовет появление внутренних напряжений.

Оргстекло хорошо обрабатывается механически, сваривается. Из него изготавливают светотехнические детали, оптические, в том числе, контактные линзы (полиметилметакрилат СТ – 1, ЛСО – 14), призмы, солнцезащитные очки, пластины для замещения дефектов черепа и т.д. Известен органический триплекс – склеенные с помощью специальной клеящей плёнки листы.

Поликарбонат – сложный полиэфир угольной кислоты; выпускается под названием дифлон. Это кристаллический полимер, которому при плавлении и последующем охлаждении можно придать аморфную структуру. Такой материал становится стеклообразным и прозрачным. Свойства поликарбонатов своеобразны – им присущи гибкость и одновременно прочность и жесткость. По прочности при разрыве металл близок к винипласту и отличается высокой ударной вязкостью, он не хладотекут. При длительном нагреве, вплоть до температуры размягчения, образцы сохраняют свои размеры и остаются эластичными при низких температурах.

Поликарбонат химически стоек к растворам солей, разбавленным кислотам и щелочам, маслам; разрушается крепкими щелочами; выдерживает светотепловакуумное старение и тепловые удары, тропикостоек. Поликарбонат имеет ограниченную стойкость к воздействию ионизирующего излучения. Поликарбонаты растворяются в хлорированных углеводородах, крезоле и других растворителях. Температура их плавления колеблется от 150 до 270 °С, морозостойкость до 100 °С.

Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, автодетали, радиодетали и т.д. Его используют в криогенной технике для работы в среде жидких газов. Дифлон применяют также в виде гибких, прочных пленок.

Общим свойством термопластов является обратимость. Это свойство позволяет использовать вторичное сырье для производства изделий.

#### 9.4. Реактопласты

**Пластмассы с порошковыми наполнителями.** Термоактивные пресскомпозиции готовят на основе фенолформальдегидных, amino-формальдегидных, анилино-формальдегидных и полисилоксановых. В качестве наполнителей применяют органические (древесная мука) и минеральные (молотый кварц, асбест, слюда, графит и др.) порошки.

Свойства порошковых пластмасс характеризуются изотропностью, высокой механической прочностью и низкой ударной вязкостью, удовлетворительными электроизоляционными показателями. Их применяют для несилевых конструкционных и электроизоляционных деталей. Минеральные наполнители придают пластмассе водостойкость, химическую стойкость, повышенные электроизоляционные свойства, устойчивость к тропическому климату.

В приборостроении широко используются слоистые пластики: текстолит, стеклотекстолит и гетинакс.

Текстолит (связующее – термоактивные смолы, наполнитель – хлопчатобумажные ткани) среди слоистых пластиков обладает наибольшей способностью поглощать вибрационные нагрузки, хорошо сопротивляется раскаливанию. В зависимости от назначения текстолиты делят на конструкционные (ПТК, ПТ, ПТМ), электротехнические, графитированные, гибкие прокладочные. Текстолит, как конструкционный, материал применяют для зубчатых колес. Такие зубчатые передачи работают бесшумно при частоте вращения до  $30000 \text{ мин}^{-1}$ . Текстолитовые вкладыши подшипников служат в 10 – 15 раз дольше бронзовых. Но рабочая температура текстолитовых подшипников невысока (80 – 90 °C). Они применяются в насосах, турбинах и др.

Стеклотекстолит. В качестве наполнителя применяют стеклянные ткани. Стеклотекстолит на фенолоформальдегидном связующем недостаточно вибропрочен, но по сравнению с обычным текстолитом он более теплостоек и имеет более высокие электроизоляционные свойства. Эпоксидные связующие (ЭД-8, ЭД-10)

обеспечивают стеклотекстолитам наиболее высокие механические свойства. Температура эксплуатации до 250 °С.

Гетинакс получается на основе модифицированных фенольных, анилиноформальдегидных и карбамидных смол и различных сортов бумаги. По назначению гетинакс подразделяют на электротехнический и декоративный. Гетинакс можно применять при температуре 120...140 °С. Он устойчив к действию химикатов, растворителей, пищевых продуктов; используется для внутренней облицовки пассажирских кабин самолетов, железнодорожных вагонов, кают судов и др.

Гетинакс и стеклотекстолит является основным материалом для изготовления печатных плат электронных узлов приборов. Стеклотекстолит обеспечивает высокое качество для условий эксплуатации с повышенными требованиями. Но стеклотекстолит обладает сильными абразивными свойствами, что приводит к интенсивному износу режущего инструмента при механической обработке.

### **12.5. Газонаполненные пластмассы**

Газонаполненные пластмассы представляют собой гетерогенные дисперсные системы, состоящие из твердой и газообразной фаз. Структура таких пластмасс образована твердым, реже эластичным полимером – связующим, которое образует стенки элементарных ячеек или пор с распределенной в них газовой фазой – наполнителем. Такая структура обуславливает чрезвычайно малую массу и высокие звукотеплоизоляционные характеристики. В зависимости от физической структуры газонаполненные пластмассы делят на пенопласты, поропласты и сотопласты.

Полимерные связующие могут быть как термореактивными, так и термопластичными. Для термопластичных полимеров наиболее опасны температуры, близкие к температуре текучести, когда значительно снижается прочность материала и избыточное давление газа внутри ячеек может разрушить пенопласт. Для получения эластичных материалов вводят пластификаторы.

Пенопласты – материалы с ячеистой структурой, в которой поры изолированы друг от друга и окружающей среды тонкими перегородками полимеров – связующего (рис.12.3, а).

Поропласты (губчатые материалы) имеют открытую пористую структуру, вследствие чего поры могут сообщаться друг с другом и с окружающей атмосферой (рис.12.3, б).

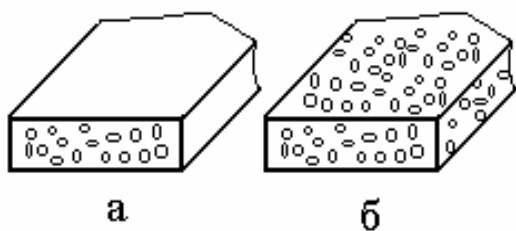


Рис. 12. 3. Газонаполненные пластмассы

Широкое применение получили пенопласты (плотность 0,02...0,2 т/м<sup>3</sup>). Пенопласты хорошо обрабатываются на деревообрабатывающих станках, легко склеиваются. Все большее распространение получает нанесение вспениваемой пластмассы методом напыления.

Вспененные материалы часто используют как составляющую комбинированной конструкции, называемой сэндвич-конструкцией (рис. 12.4). Здесь для наружных слоев применяют самые различные материалы [7].

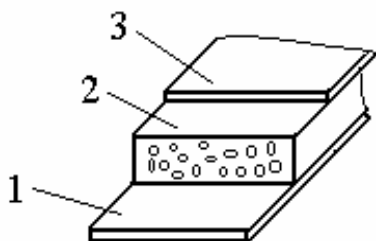


Рис.12.4. Комбинированная конструкция с применением вспененного материала: 1, 3 – наружные слои; 2 – слой вспененного материала

## 12.6. Резиновые материалы

Широкое применение в электротехнической промышленности, особенно при производстве кабельных изделий, получила резина. Резиной называется продукт специальной обработки (вулканизации) смеси каучука и серы с различными добавками.

Любой каучук является полимерным соединением. Макромолекулы каучука состоят из отдельных звеньев, имеющих зигзагообразную форму. Такая форма молекул является причиной высокой эластичности каучуков. Натуральные каучуки обозначаются буквами НК, а синтетические – СК.

В процессе обработки каучука совместно с серой последняя придает структуре сетчатый характер, поскольку образуются мостики между нитевидными молекулами каучука.

Резина отличается высокими эластическими свойствами. Она способна к большим деформациям (относительное удлинение достигает 1000 %), которые практически полностью обратимы.

Кроме отмеченных особенностей, для резиновых материалов характерны высокая стойкость к истиранию, газо- и водонепроницаемость, химическая стойкость, электроизолирующие свойства и небольшая плотность. По назначению, в зависимости от условий эксплуатации, резины разделяют на резины общего и специального назначения [1,3,4,7]. Резины общего назначения могут работать в среде воды, воздуха, слабых растворов кислот и щелочей. Эксплуатируют их при температурах  $-50...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Назначение резин, относящихся к тому или иному виду, отражено в их названии.

### 13. Неорганические неметаллические материалы

#### 13.1. Алмаз и графит, несиликатные материалы

Алмаз является кристаллической модификацией углерода с гранецентрированной кубической решеткой, каждый атом углерода в которой связан прочными ковалентными связями с тремя соседними, расположенными в вершинах тетраэдра. Прочность ковалентной связи, малые расстояния между атомами (0,154 нм) обуславливают максимальную для минералов твердость алмаза (10 единиц по шкале Мооса) и его высокую химическую стойкость. При нагреве до 1800 °С без доступа кислорода алмаз превращается в графит, в присутствии кислорода сгорает при 870°С. Алмаз имеет очень высокую теплопроводность (в 5 раз выше теплопроводности меди), но является диэлектриком. В природе алмазы встречаются в виде монокристаллов, а искусственные (синтетические) алмазы получают в виде мелких кристаллов в основном из графита при температуре 1300...1600 °С и давлении 4,5...8 ГПа. Из алмаза делают резцы, инденторы для измерения твердости, а также абразивные порошки.

Графит представляет интерес и как самостоятельный материал, используемый в технике. Графит, являясь полиморфной модификацией углерода с гексагональной кристаллической решеткой, обладает сочетанием свойств, обусловивших его применение в качестве конструкционного (плавильные тигли, электроды, детали ракет и ядерных реакторов) и антифрикционного (твердые смазки, подшипники и электрошетки) материала.

Графит сочетает высокую жаропрочность и кислотостойкость, электропроводность и теплопроводность. Прочность и модуль упругости графита растут с повышением температуры. Графит не плавится, а возгорается при 3800 °С. Из синтетических волокон графита и тканей специальной термической обработкой получают углеродные волокна и ткани, находящие широкое применение в качестве упрочняющих компонентов композиционных материалов.

Дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ) характеризуется очень низким коэффициентом трения (0,017...0,047), особенно в вакууме, где его термическая стабильность составляет 1100 °С. В связи с этим он является важнейшим компонентом твердосмазочных материалов и покрытий, используемых в ответственных узлах трения механизмов в таких областях, как авиация и космическая техника. Получают его из природного молибдена или синтетическим путем. Для массового применения используют порошок МВЧП (98,5 %  $\text{MoS}_2$ ) с частицами размером 1...7 мкм.

### 13.2. Минеральные материалы на основе силикатов

Материалы минерального происхождения используют как компоненты керамики, стекол, композиционных материалов. Кроме того, они используются и как самостоятельный материал.

*Асбест* – собирательное название материалов на основе природных гидросиликатов. При механическом воздействии асбест способен расщепляться на гибкие, тонкие (до 0,5 мкм) волокна длиной до 18 мм. Предел его прочности достигает 2...4,5 ГПа. Важнейший из видов асбеста – хризолит  $Mg_3 [Si_2O_5] (OH)_4$  характеризуется температурой плавления 1550 °С, огнестоек, устойчив к действию щелочей. Асбест используется для изготовления огнестойких материалов, фильтров, материалов для тормозных накладок и др.

*Кварц* – кристаллическая форма диоксида кремния – один из самых распространенных в земной коре, прочных и стойких материалов. Предел прочности при сжатии достигает 2000 МПа, при растяжении – 100 МПа, температура плавления 1470 °С, плотность 2650 кг/м<sup>3</sup>, твердость по шкале Мооса – 7 единиц. Кварц химически стоек, оптически анизотропен, обладает пьезоэлектрическими свойствами. Встречается в природе как в основном состоянии, так и в форме прозрачных и окрашенных разновидностей (аметист, дымчатый топаз, горный хрусталь и т.п.). В виде монокристаллов кварц применяют в электро- и радиотехнике в качестве элементов аппаратуры (пьезопреобразователей, фильтров, генераторов), дисперсный – в качестве абразивных материалов и др.

*Слюда* – общее название природных алюмосиликатов слоистой структуры с общей формулой  $R_1R_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ , где  $R_1$  – К, Na,  $R_2$  – Al, Mg, Fe, Li. Кристаллы слюды расщепляются на тонкие, упругие и прочные листочки. Температура плавления слюды – 1200...1300 °С, плотность 2200...3300 кг/м<sup>3</sup>, твердость по шкале Мооса – 2,5...3 единицы. Этот материал отличается химической стойкостью, хорошими диэлектрическими свойствами [3]. Молотую слюду используют в качестве компонента пластических масс и резин.

### 13.3. Неорганическое стекло

Неорганическое стекло – твердый некристаллический материал, получаемый переохлаждением расплава стеклообразующих компонентов (оксидов кремния, бора, алюминия фосфора, титана, циркония и др.) и модифицирующих оксидов металлов: лития, калия натрия, кальция, магния, свинца и др.

Процесс перехода системы из жидкого состояния в стеклообразное является обратимым. Ее стеклообразное состояние менее устойчиво, чем кристаллическое, характеризующееся избыточной внутренней энергией системы, что делает возможным ее самопроизвольный переход лишь из стеклообразного в кристаллическое состояние. В структуре неорганического стекла обнаруживаются микрокристаллические образования – кристаллиты, которые внутри имеют кристаллическую решетку, а на периферии их структура менее упорядочена. Прослойки между кристаллитами находятся в стеклообразном состоянии.

Наиболее широко применяется силикатное стекло, основной компонент которого – диоксид ( $\text{SiO}_2$ ). Чистый диоксид кремния в стеклообразном состоянии (кварцевое стекло) имеет каркас из тетраэдров  $[\text{SiO}_4]^{-4}$ , соединенных вершинами. От решетки кристаллического кварца этот каркас отличается тем, что узлы между связями меняются в широких пределах, и поэтому их упорядоченность нарушается (рис. 13.1).

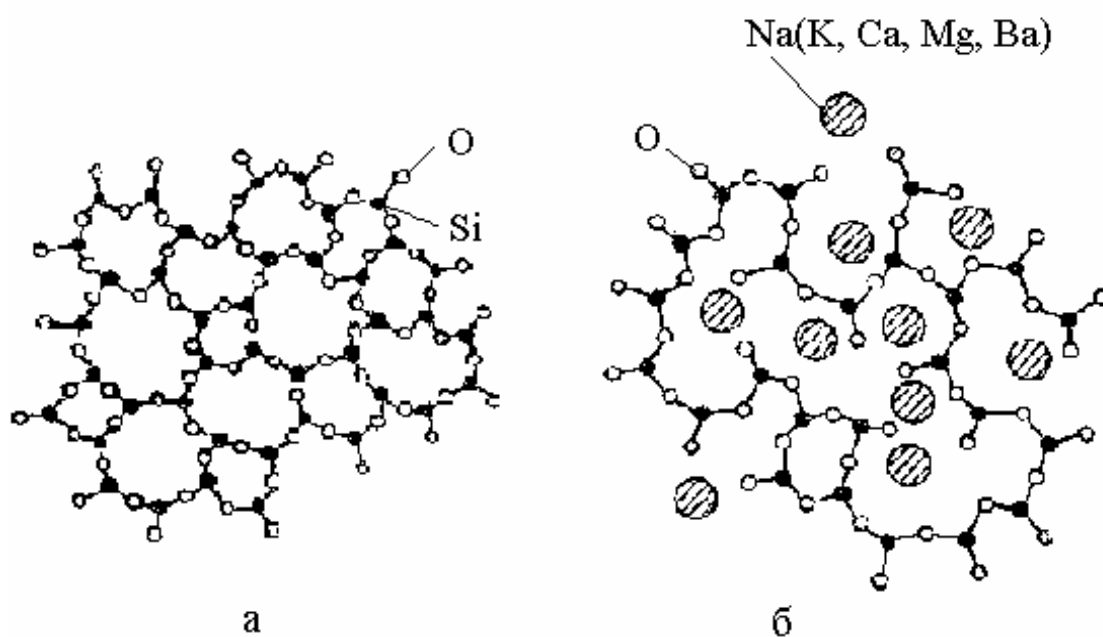


Рис. 13.1. Структура неорганических стекол: а – кварцевых; б – силикатных

Техническое стекло имеет в основном алюмоборосиликатную стеклообразующую основу ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ), модифицированную оксидами металлов, которые облегчают технологию производства стекла и изменяют его физико-механические характеристики. Многокомпонентный состав технических стекол обуславливает разнообразие их свойств и структурную неоднородность, поскольку



расплав при охлаждении расслаивается на две или более фаз, затвердевающих в аморфном состоянии.

### 13.4. Техническая керамика

Керамические материалы получают высокотемпературным отжигом минеральных порошков.

Техническую керамику получают на основе оксидов тугоплавких металлов IV и VI групп периодической системы элементов. Получают из нитридов кремния, бора, алюминия, силицидов, боридов, переходных металлов, галогенидов щелочных и щелочно-земельных металлов.

По структуре керамические материалы представляют собой многофазные системы, в которые входят кристаллические и стекловидная фазы, а также газовые включения. Объёмная доля стекловидной фазы в керамике может достигать до 40 % и по составу обычно отличается от кристаллической. Газовая фаза распределена в порах керамики, её присутствие снижает прочность материала.

Пористую керамику применяют в основном для изготовления огнеупорных материалов, фильтров, диэлектриков. Плотную керамику микрокристаллической структуры (размер зерна 1...5 мкм) применяют как конструкционный материал для изготовления деталей машин, инструментов. Наиболее прочными характеристиками обладает керамика на основе чистых оксидов:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , BeO,  $\text{ZrO}_2$ , MgO, CaO и других металлов (табл. 13.1). Её используют для изготовления резцов, фильер (отверстий, через которые протягивается проволока), сопел, калибров подшипников, печей, тиглей, подложек, микросхем.

Таблица 13.1

#### Основные свойства керамики на основе чистых оксидов

Оксид-основа	Температура плавления $t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$ , при			E, ГПа
			растяжении	сжатии	изгибе	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2050	3990	260	3000	150	382
$\text{ZrO}_2$	2700	5600	150	2100	230	172
BeO	2580	3020	100	800	130	310
MgO	2800	3580	100	1400	110	214
CaO	2570	3350	-	-	80	-

В производстве электротехнического и химического оборудования применяют фарфор – керамический материал с незначительной долей закрытых пор, получаемых на основе смеси:  $\text{SiO}_2$  – 74,8...75,2 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 19,3...21,1 %,  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,7...4,4 %. Он обладает очень высокими электроизоляционными свойствами, механической прочностью и стойкостью во всех кислотах, кроме плавиковой (раствор  $\text{HF}$  в воде).

Технология получения керамических материалов всех видов включает в себя следующие операции: измельчение исходных продуктов, их перемешивание, увлажнение с добавлением временных связывающих, формование изделий (прессованием, литьём, экструзией), низкотемпературный отжиг для удаления связующих и высокотемпературный отжиг для получения требуемого фазового состава.

Основной недостаток керамики – хрупкость. Подавить её можно путем повышения однородности и мелкозернистости структуры керамики (устранение пор, агломератов частиц и химических примесей). Для этого используют тонкий размол исходного порошка, повышение температуры отжига и т.п. Рис. 13.2 иллюстрирует влияние размера микроструктур, формирующих керамику на основе карбида кремния, на ее прочность.

При специфических условиях подготовки сырья и спекания возможно получение керамики с кристаллитами размером 0,3 мкм, которые характеризуются относительным удлинением при растяжении до 100 %. Для обработки такой керамики применяют традиционные методы – экструзию, волочение, ковку.

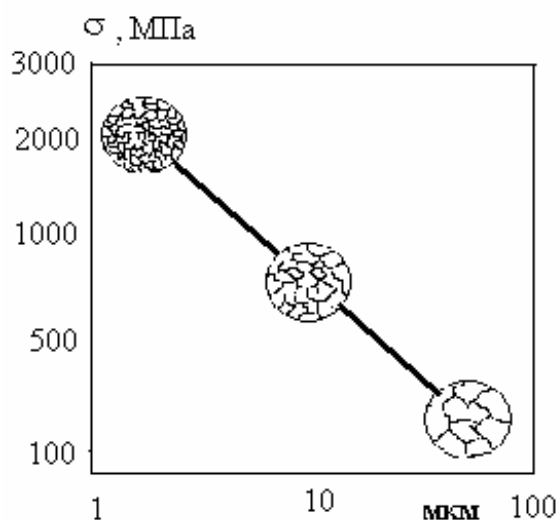


Рис. 13.2. Зависимость прочности керамики на основе карбида кремния от размера микроструктур

### 13.5. Материалы подложек интегральных тонкоплёночных микросхем

Подложка в пленочных интегральных микросхемах является электронно- пассивной (стекло, керамика). Требования к материалу подложки: незначительная стоимость; незначительная шероховатость поверхности; хорошая адгезионная способность; достаточная механическая прочность и устойчивость при воздействии температуры и влажности; высокая теплопроводность; соразмерность температурных коэффициентов линейного расширения материала подложки и осаждаемой пленки; высокое удельное сопротивление  $\rho$ ; лёгкая формуемость (пластичность) и химическая стойкость.

Особенно важным фактором является шероховатость поверхности и теплопроводность. Так как свойства осажденных слоев в значительной степени определяются высотой неровностей подложки, то в зависимости от способа получения слоев они должны находиться в пределах от 0,01 – 1 мкм. Если эти условия не выполняются, то шероховатости на обкладках конденсаторов приводят к высокой напряженности поля и к пробоем. Наилучшую чистоту поверхности имеет стекло огненной плавки (высота микронеровностей около 0,006 мкм (рис. 13.3). Но его теплопроводность составляет только 1/15 – 1/150 теплопроводности керамических подложек  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BeO}$ .

В табл. 13.2 приведены важнейшие свойства материалов подложек интегральных микросхем (ИМ).

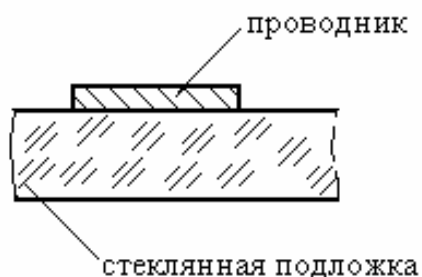


Рис.13.3. Применение стеклянных подложек для тонкопленочных микросхем

Как видно из таблицы, керамика имеет на один, два порядка выше теплопроводность чем стекло. Однако большая шероховатость поверхности керамики не позволят использовать ее для тонкопленочных ИМ. Но для толстопленочных ИМ керамика может быть с успехом применена. Для толстопленочных ИМ наиболее

важным критерием является теплопроводность, т.к. токи, протекающие по проводникам в этих ИМ, значительно больше, чем в тонкопленочных, а следовательно, увеличивается выделение тепла, которое нужно отводить в окружающую среду.

При сравнительном анализе свойств промышленных керамических материалов становится очевидным, что только оксид бериллия (BeO) удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам для систем высокой мощности. Изделия из BeO поставляются толщиной от 0,5 мм во всех формах и размерах согласно требованиям заказчика. В табл. 13.3 указаны данные о подложках из оксида бериллия.

Таблица 13.2

**Свойства материалов подложек  
для тонкопленочных и толстопленочных ИМ**

Материал подложек	Температура размягчения °C	Температура деформации °C	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha$ , $10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/мК при 25°C	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при 25°C
Щелочное стекло	695	490	9,2	0,96	$10^{11}$
Боросиликатное стекло	820	520	0,8...6	0,84...1,3	
Алюмосиликатное стекло	872	613	4,5	1,2	
Кварцевое стекло	1670	1070	0,6	1,4	$10^{16}$
Керамика $\text{Al}_2\text{O}_3$	1600	-	6,7	10...35	$10^{14}$
Керамика BeO	1600	-	6,7	230	$10^{12}$

Таблица 13.3

### Характеристики подложек из оксида бериллия

Цвет подложки	белый
Твердость по Моосу	9
Содержание BeO, %	99,5
Размер зерна, мкм	14... 30
Стойкость к термоудару, циклов	150
Электрическая прочность, кВ/мм	25
Шероховатость, Ra, мкм: номинальная поверхность полированная поверхность	4...6 2...1
Допуск, мкм при толщине 0,5мм	±0,01
При толщине > 1 мм	±0,05...0,1

### 13.6. Ситаллы (стеклокристаллические материалы)

Ситаллы получают на основе неорганических стекол путем их полной или частичной управляемой кристаллизации. Термин “ситаллы” образован от слов: стекло и кристаллы. За рубежом их называют стеклокерамикой и пирокерамами. По структуре и технологии получения ситаллы занимают промежуточное положение между стеклом и керамикой. От неорганических стекол они отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов – более мелкозернистой и однородной микрокристаллической структурой (рис.13.4)

Ситаллы получают путем плавления стекольной шихты специального состава с добавкой нуклеаторов (катализаторов), охлаждения расплава до пластического состояния и формования из него изделий методами стекольной технологии и последующей ситаллизации (кристаллизации). Затем его подвергают чаще всего двухступенчатой термической обработке при температурах 500–700 °С и 900 –1100 °С. На первой ступени происходит образование центров кристаллизации, на второй – рост кристаллов. Содержание кристаллической фазы к окончанию технологического процесса достигает порядка 95 %, размеры оптимально развитых кристаллов составляют 0,05 – 1 мкм. Изменение размеров изделий при кристаллизации не превышает 1 –2 %. Ситалловые изделия получают также методом спекания порошков.

В состав стекла, применяемого для получения ситаллов, входят оксиды  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  и катализаторы кристаллизации в виде солей светочувствительных металлов  $\text{Au}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cu}$ .

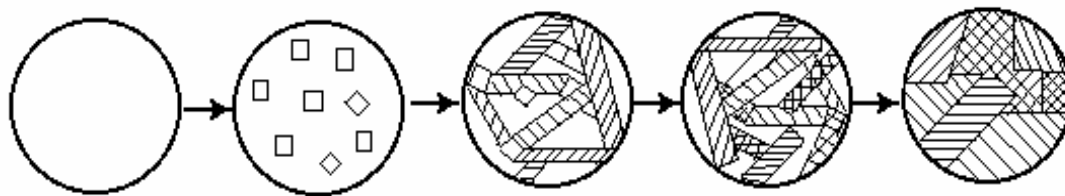


Рис. 13.4. Схема кристаллизации стекла при образовании ситаллов с помощью кристаллизаторов

Плотность ситаллов лежит в пределах  $2400 \dots 2950 \text{ кг/м}^3$ , прочность при изгибе  $\sigma_{\text{изг}} = 70 \dots 350 \text{ МПа}$ , при сжатии  $\sigma_{\text{сж}} = 700 \dots 2000 \text{ МПа}$ , модуль Юнга  $E = 84 \dots 141 \text{ ГПа}$ . Жаропрочность ситаллов под нагрузкой составляет  $1250 \dots 1350 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ситаллы относятся к хрупким материалам. Они весьма износостойки ( $f_{\text{тр}} = 0,07 \dots 0,19$ ). По теплопроводности ситаллы превосходят стекла ( $\lambda = 2 \dots 7 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ). Коэффициент линейного расширения лежит в пределах  $(7 \dots 300) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Ситаллы обладают высокой химической стойкостью к кислотам и щелочам, не окисляются даже при высоких температурах. Они газонепроницаемы и обладают нулевым водопоглощением. Хорошие диэлектрики.

Применение ситаллов определяется их свойствами. Из них изготавливают подшипники, детали радиоэлектроники, сопла реактивных двигателей, точные калибры, фильеры для вытягивания синтетических волокон и др.

## 14. Технические жидкости и газы

### 14.1. Смазочно-охлаждающие и технологические жидкости

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) совмещают свойства смазочных масел и технологических жидкостей. Они одновременно смазывают поверхность инструмента и обрабатываемой детали, улучшая качество обрабатываемой поверхности, отводят тепло, смывают стружку, пыль и другие загрязнения, а также защищают поверхности инструмента и детали от коррозии. Вследствие многофункционального назначения СОЖ для их приготовления используют широкую номенклатуру масел, синтетических жидкостей, водных растворов, присадок и добавок.

К технологическим жидкостям относят разделительные составы, предназначенные для снижения адгезии в контакте пресс-форм и литьевых форм с изделиями из резины и пластических масс. Основой таких составов являются кремнийорганические жидкости или их водные эмульсии. Разделительные составы должны обладать высокой теплостойкостью, инертностью к металлам, низкой летучестью, нетоксичностью и невзрывоопасностью.

Важный вид технологических жидкостей – закалочные среды, приготовляемые на основе масел, водных растворов солей, водорастворимых полимеров.

Моющие жидкости – применяют для промывки деталей и узлов в процессе их производства и ремонта. К таким жидкостям относят водные растворы на основе кальцинированной или каустической соды, солей калия и натрия, а также органические растворители (ацетон, бензин, спирт, спиртобензольные смеси и т.д.) и смеси на основе мыл и стиральных порошков.

Смазочные масла. Смазочными маслами называют вещества, обладающие смазочным действием, т.е. способностью снижать трение, уменьшать скорость изнашивания и устранять заедание трущихся поверхностей. Большинство смазочных материалов, за исключением твердых смазок (графит, дисульфид молибдена), являются жидкими. При этом они, как правило, имеют многокомпонентный состав, в том числе и с включением твердых добавок. Почти все смазки созданы на основе масел различного происхождения.

Главными видами смазочных масел являются минеральные (нефтяные) и синтетические.

Некоторые марки смазочных масел: И – 5А, И – 20А, И – 100А (индустриальные), Т22 – турбинные.

Пластические смазки получают введением в жидкие масла твердого загустителя, присадки и наполнители. Типичными представителями пластических смазок являются: солидол С; ЦИАТИМ – 221; ЦИАТИМ – 201; ЦИАТИМ – 205; ОКБ – 122 – 7; графитол.

## **14.2. Специальные технические жидкости и газы**

Специальные жидкости характеризуются несжимаемостью или сжимаемостью, летучестью или неиспаряемостью, защитными свойствами или стабильностью характеристик и т.д. К ним относятся амортизационные жидкости, гидравлические масла, демпфирующие жидкости, вакуумные масла и другие жидкости, приготовляемые в

основном на базе минеральных масел и кремний органических жидкостей.

Газы и их смеси имеют широкое применение в качестве топлив при газоплазменной резке, плазмообразующих сред в процессах ионно-плазменной обработки, сварочных газов, хладоагрегатов в холодильных установках и др.

*Азот* применяют для создания нейтральной атмосферы при термообработке металлов.

*Аммиак* используют в качестве хладоагрегата в холодильных установках и др.

*Аргон* применяют для создания нейтральной атмосферы внутри герметичных газонаполненных приборов, при сварке и пайке металлов, а также для образования плазмы при ионно-плазменной обработке; ацетилен при сварке и резке металлов.

*Водород* используют при автогенной резке и химико-термической обработке сталей.

*Кислород* применяют для автогенной резки и сварки, при интенсификации термических и металлургических процессов.

*Криптон и ксенон* – в электровакуумной технике для наполнения различных приборов; *метан и пропан* – при химико-термической обработке и в качестве топлива при пламенной закалке.



## Глава V. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 15.1. Общие сведения и историческая справка

К композиционным материалам могут быть отнесены многие природные материалы. Оптимальное сочетание и расположение твердых и мягких, жестких и эластичных составляющих характерно для строения древесины, костей человека и животных. Например, в костях имеются тонкие и прочные нити фосфатных солей, связанных пластичным материалом – коллагеном. В стволах деревьев волокна целлюлозы связаны пластичным веществом – лигнином. Композиционную структуру имеют гранит, многие разновидности кремнезема.

Человек начал применять принцип армирования в глубокой древности. В Шумерии и Вавилоне около 6 тыс. лет назад в глиняные строительные кирпичи и гончарные изделия для уменьшения их усадки и растрескивания при обжиге добавляли измельченные камни, солому, ветки. В середине XV в. при постройке храма Василия Блаженного в Москве русские зодчие Барма и Постник применили армированные железными полосами каменные плиты.

Проборазом современных композиционных материалов считается железобетон. Первый патент на изготовление цветочных кадок из материала, сочетавшего металлическую проволоку и цемент, был получен в 1867 г. парижским садовником Ж. Монье. Армированные стеклянными волокнами полиэфирные материалы впервые применены в конструкции самолета в 1942 г., а несколько позже было начато и промышленное производство стеклопластиков. Современные высокопрочные композиты на полимерной и металлической матрицах, армированные высокомолекулярными волокнами и “усами”, начали широко использовать в начале 70 - х годов прошлого века.

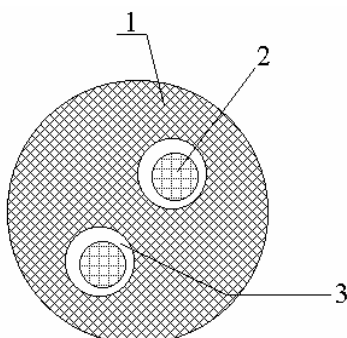
### 15.2. Основные определения и классификация

Композиционные материалы – это конструкционные материалы сложного состава, получаемые путём объёмного сочетания разнородных компонентов (фаз) с границей раздела между ними (рис.15.1).

Рис.15.1.

Композиционный материал:

1 – матрица, 2 – армирующие элементы,  
3 – зона раздела фаз



Компонент, непрерывный в объёме композиционного материала, называют матрицей. Матрица связывает композицию и придаёт ей форму. Другие компоненты (арматура, наполнители) распределены в матрице. Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические материалы. Армирующие элементы (наполнители) вводят в композиционный материал не только с целью увеличения прочности, но также для увеличения жесткости и пластичности; изменения плотности, электрических, теплофизических и других характеристик в различных направлениях и отдельных местах изделия. На границе матрицы и арматуры располагаются тонкие слои – зоны раздела фаз.

Классификация композиционных материалов по типу матрицы:

- полимерные (термопласты, реактопласты, смеси);
- металлические (в том числе методом порошковой металлургии);
- неорганические (полимеры, минералы, керамика, углерод);
- комбинированные (полиматричные).

Наполнители – дисперсные и коротковолокнистые вещества, введение которых позволяет достичь не более чем 1,5 – 2 кратного повышения прочности матрицы.

Арматура – высокопрочные волокна, усы, ткани, которые повышают прочность материала в 2 – 10 и более раз по сравнению с прочностью матрицы. В композиционном материале могут находиться и наполнители, и армирующие элементы. Композиты могут содержать армирующие и наполняющие компоненты различных размерностей. В матрице армирующие элементы могут быть расположены хаотически, но чаще их стараются разместить в определенном порядке (рис.15.2).

Композиционные материалы, имеющие одинаковые свойства во всех направлениях, называют изотропными. К ним относят хаотически наполненные порошками, короткими волокнами и чешуйками композиты. Материалы, свойства которых неодинаковы по различным направлениям, называют анизотропными. Это композиты с армирующими элементами в виде непрерывных волокон, пластин, тканей, сеток. При выборе схемы прочностного расчета высокопрочные композиционные материалы делят на три группы: с одноосным, двухосным (плоскостным) и трехосным (объемным) армированием (рис.15.3).

На рис. 15.4 показана зависимость прочности материала от расположения армирующих волокон [1].

По типу материала матрицы различают: металлические композиты (медь, алюминий, сталь, вольфрам, титан, а также получаемые методом порошковой металлургии); неорганические

(керамика и минералы – техническая керамика, стекло, углерод); полимерные (полиамиды, эпоксидные компаунды, фторопласт и др.); комбинированные (полиматричные).

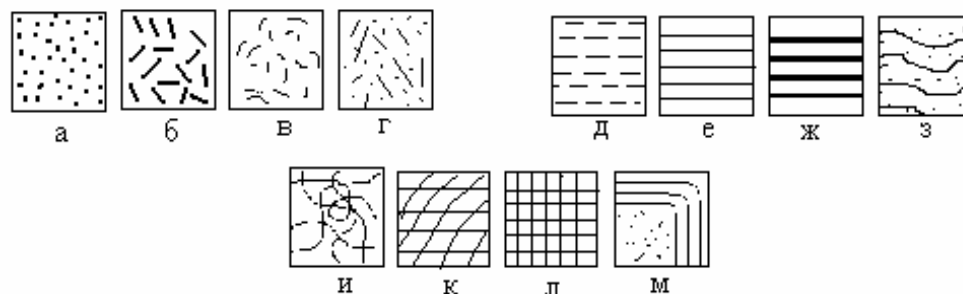


Рис. 15.2. Простейшие случаи хаотичного (а – г, и), одноосного (д – з) и сложноориентированного (к – м) расположения наполнителей и армирующих элементов в матрице композиционного материала: а – порошка; б – коротких волокон; в – чешуек; г – смеси порошка с короткими волокнами; д – коротких волокон; е – длинных волокон; ж – тканей и фольг; и – длинных скрученных волокон

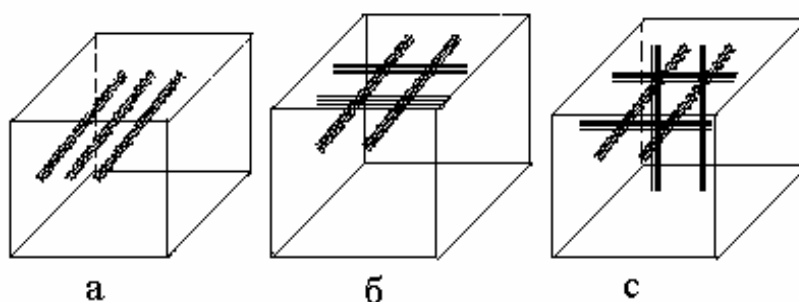


Рис.15.3. Схемы армирования композиционных материалов волокнистыми (одномерными) элементами:  
а – одноосное; б – двухосное; в – трехосное

### 15.3. Композиционные материалы на полимерной матрице

Матрицами композиционных материалов на полимерной основе могут быть любые материалы на основе органических полимеров (поливинилхлорид, полистирол, полиэтилен, фенолформальдегидные смолы, эпоксидные, полиэфирные, кремнийорганические смолы). В качестве наполнителей и армирующих элементов используют материалы в любой форме, относящиеся к любому типу рассмотренных ранее материалов.

В качестве примера рассмотрим механические характеристики некоторых волокнистых композиционных полимерных материалов:

бороволокниты: КМБ – 3к  $\Rightarrow \rho=2 \text{ т/м}^3$ ,  $\sigma_{\text{в}}=1300 \text{ МПа}$  (при растяжении), что примерно соответствует широко применяемой в настоящее время стали 30 ХГСА; модуль упругости  $E=260 \text{ ГПа}$  (при растяжении) выше чем у стали;  $\varepsilon = 0,3 - 0,4 \%$  (при растяжении);

карбоволокниты (углепласты) – представляют собой композиции, состоящие из полимерной матрицы и упрочнителей в виде углеродных волокон. КМУ – 1у  $\Rightarrow \rho=1,47 \text{ т/м}^3$ ,  $\sigma_{\text{в}}=1020 \text{ МПа}$  (при растяжении),  $E=180 \text{ ГПа}$  (при растяжении),  $\varepsilon=0,6 \%$  (относительное удлинение при разрыве). Обладают высоким динамическим и статическим сопротивлением усталости. При этом обеспечивается хорошая износостойкость.

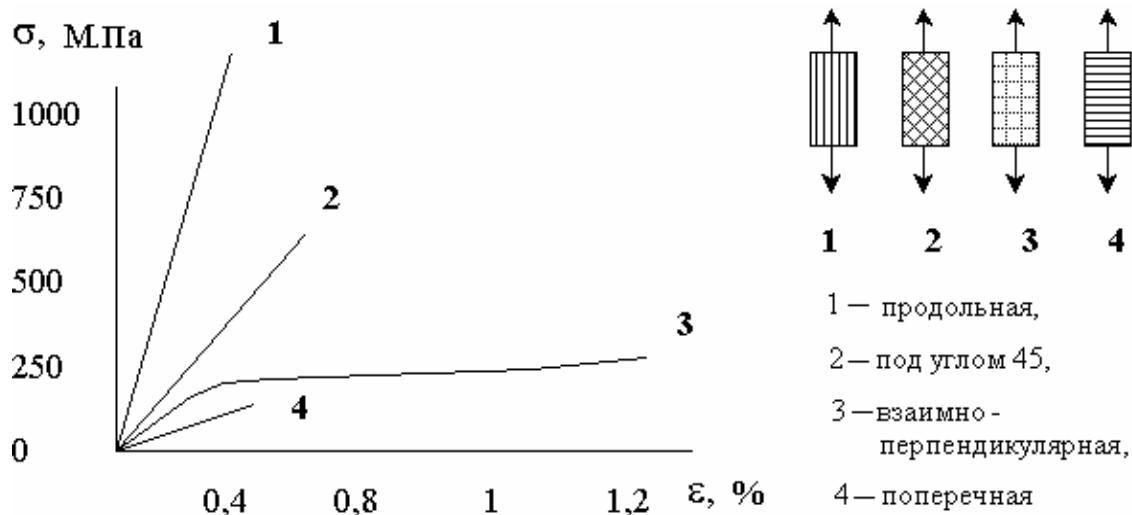


Рис. 15.4. Зависимость предела прочности эпоксидного углепластика от вида арматуры (от расположения армирующих волокон)

## 15.4. Эвтектические композиционные материалы

Эвтектическими композиционными материалами (КММ) называют сплавы эвтектического или близкого к нему по составу, в которых армирующей фазой служат ориентированные волокнистые или пластинчатые кристаллы, образовавшиеся в процессе направленной кристаллизации.

Структура таких материалов формируется естественным путем, а не в результате искусственного введения армирующих компонентов в матрицу. Проблемы химической несовместимости между матрицей и упрочняющей фазой не существует вследствие равенства химических

потенциалов компонентов и равновесных условий кристаллизации таких систем.

Технология формирования эвтектических КММ включает операции, сущность которых заключается в создании плоского фронта кристаллизации, т.е. плоской поверхности раздела между расплавом компонентов КММ и кристаллизующимся телом. Для формирования изделия используют два метода:

### **1. Метод Бриджмена.**

Метод Бриджмена состоит в том, что расплав вытягивается из зоны нагрева с постоянной скоростью. Форма фронта кристаллизации зависит от скорости вытяжки и от условий теплообмена, регулируемых подбором кристаллизатора, системой экранов и т.д.

### **2. Метод зонной плавки.**

Метод зонной плавки заключается в расплавлении участка прутка с помощью электронно-лучевого (или индукционного) нагрева и перемещении расплавленной зоны по длине прутка (рис.15.5). Для выравнивания температуры и состава расплава части прутка, разделенные зоной расплавленного металла, вращают.

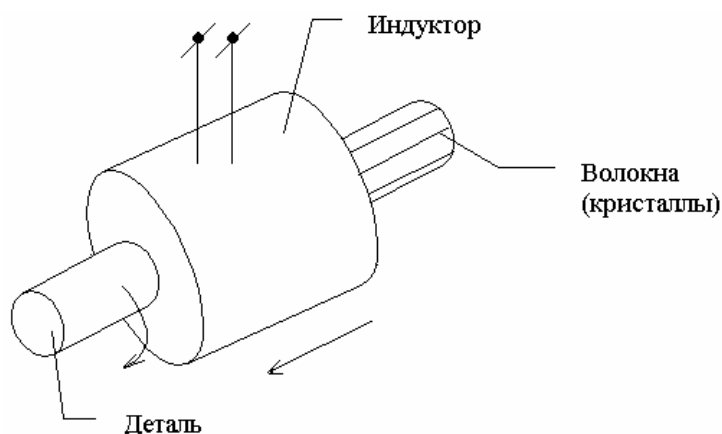


Рис.15.5.Схема формиро-вания пластинчатых кри-сталлов методом зонной плавки

Достоинством эвтектических КММ является технологичность их изготовления – изделие формируется за одну операцию. Недостаток – малое содержание армирующей фазы (объемная доля волокон – 35 %), низкая скорость растяжения кристаллов.

Номенклатуру эвтектических композиционных материалов делят на две части. Первую составляют материалы конструкционного назначения – на основе легких сплавов, жаропрочные, на основе тугоплавких металлов. Вторую группу составляют материалы с

особыми физическими свойствами – полупроводниковые, ферромагнитные и др.

Типичными представителями материалов второй группы являются сплавы, имеющие структуру полупроводниковой матрицы из антимонида индия InSb (табл. 15.1), армированной волокнами проводников (Sb, NiSb, FeSb, MnSb, CuSb).

Табл. 15.1

**Электрические свойства эвтектических КММ**

Сплав	$\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$
<i>Sb</i>	$4,4 \cdot 10^{-7}$
<i>InSb</i>	$1 \cdot 10^{-4}$
<i>InSb – Sb</i>	$3,05 \cdot 10^{-6}$

Электропроводность таких сплавов вдоль волокон сурьмы [4] на порядок выше, чем по нормали к ним. Анизотропия теплопроводности, термоэлектрических и других физических свойств выражена слабее. При ориентации волокон параллельно вектору электрической напряженности электромагнитного поля (рис.15.6) происходит поглощение энергии последнего, при ориентации волокон по нормали – энергия электромагнитного поля не поглощается.

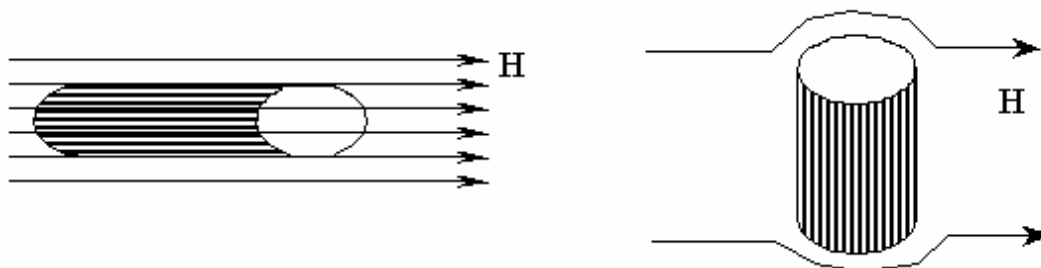


Рис. 15.6. Схема взаимодействия эвтектических КММ с электромагнитным полем

Такие сплавы применяют в электронной технике для изготовления бесконтактных переменных сопротивлений и переключателей электрических цепей, для измерения и регулирования постоянных токов, в детекторах излучения и др.

Эвтектические КММ, в которых одна или обе фазы ферромагнитны, обладают высокими показателями магнитных свойств (табл.15.2). Магнитно-твердыми материалами являются сплавы, матрица которых армирована ориентированными ферромагнитными волокнами с диаметром, близким к размеру доменов (около 1 мкм).

Сплавы с обеими ферромагнитными фазами характеризуются большой остаточной индукцией и высокой коэрцитивной силой. КММ, состоящий из магнитно-мягкой матрицы и неферромагнитного упрочнителя, относят к магнитно-мягким материалам. Магнитные КММ применяют в технике для изготовления магнитопроводов, носителей информации (магнитные диски) и т.п.

Таблица 15.2

#### Магнитные свойства эвтектических сплавов

Материал	Тип фаз магнит.	H <sub>c</sub> , А/м
<b>Магнитно-твёрдые</b>		
Sm <sub>2</sub> CO <sub>17</sub>	ФМ – ФМ	3920
Fe Sb – Fe	ФМ – ФМ	41432
Bi – MnBi	ДМ – ФМ	320000
AuCo – Co	ПМ – ФМ	3600
<b>Магнитно-мягкие</b>		
Fe – NiC	H <sub>c</sub> , А/м	B,Тл
90% – 10%	120	1,98
Co – NbC	3200	1,58
90% – 10%		
(Fe – Co) – NbC	656	2,22
41%+50%+9%		

#### 15.5. Волокнистые материалы на металлической матрице

Технология формирования волокнистых композиционных материалов включает процесс прессования, прокатки, совместной вытяжки, экструзии, сварки, напыления или осаждения, а также пропитки.

КММ из алюминия и высокомодульных волокон характеризуются высокой удельной прочностью и жесткостью, высокой жаропрочностью и анизотропией механических свойств. КММ типа алюминий – бор имеют высокую электро- и теплопроводность, пластичность, ударную вязкость и абразивную стойкость. Материалы, упрочняемые стальной проволокой, перспективны в различных отраслях благодаря сравнительно малой стоимости. Полуфабрикаты из материала алюминий – бор получают методами напыления или электролитического осаждения матричного материала на армирующие волокна.

Особенностью КММ на основе магния является термическая стабильность вплоть до температуры начала размягчения матрицы. По удельным показателям прочности и жесткости эти материалы превосходят большинство КММ, в том числе на основе алюминия. Их армируют волокнами бора, карбида кремния, оксида алюминия, углеродными волокнами, проволокой из стали, титана, с которыми магниевые сплавы практически не реагируют. КММ на основе магния эффективны в высоконагруженных конструкциях, применяются в космической технике, при строительстве ядерных реакторов и т.д.

Более высокой жаропрочностью, чем никелевые сплавы, отличаются КММ на основе никеля.



## Глава VI. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ И МЕДИЦИНЫ

Особое место среди приборов занимают биотехнические и медицинские аппараты и системы. В процессе создания таких приборов и систем важнейшую роль играют материалы. Так, для искусственных сосудов, клапанов сердца, суставных и других протезов допустимы только материалы, обладающие совместимостью с живой тканью организма.

### 16.1. Материалы для хирургического инструмента

Для изготовления скальпелей, микроигл используют стали, обладающие требуемой твердостью, стойкостью к коррозии, износостойкостью. В этом ряду стоят следующие марки коррозионно-стойких сталей: аустенитная сталь X13 (аналог в Англии AJSJ300), 3X13, 4X13, 30X13 (AJSJ420), 40X13, 08X18T1 (у стали 08X18T1 лучше штампуемость), 12X18H9T.

Для изготовления микроигл используют также аустенитную сталь 12X18H10T, высокопрочную пружинную проволоку 40KHXMБТЮ.

Для изготовления скальпелей применяют стали У12А, 100X13М, сталь мартенситного класса 50X14МФ (твердость поставки 18...22, закалка с охлаждением в масле индустриальном 20 до HRC 53...58).

Для микроинструмента и имплантантов применяют титановые сплавы ВТ1–0, ВТ6, ВТ14, обладающие высокой коррозионной стойкостью и биологической совместимостью.

### 16.2. Материалы для искусственных сосудов и других имплантантов

В этой группе материалов большое место занимают полимерные материалы и композиционные материалы на полимерной основе (табл.16.1)

Таблица 16.1

**Материалы имплантантов на полимерной основе [11]**

Наименование материала	Обозначение документа	Марка материала	Назначение материала
Полиметилметакрилат	ТУ 6–01–544–75	Дакрил 2М0	Пластины для замещения дефектов черепа
Полиметилметакрилат	ТУ15809–70	СТ–1 ЛСО–М	Контактные линзы Литнзы для корректирующих и солнцезащитных очков

Продолжение табл. 16.1

Наименование материала	Обозначение документа	Марка материала	Назначение материала
Сополимер N – винилпирролидона и метилметакрилата	ТУ 42–2–361–80	ППМ – 1	Штифты для остеосинтеза
Композиция на основе этилового эфира цианакриловой кислоты	ТУ 64–7–66–80		Клей медицинский МК–2 для бесшовного соединения тканей организма
Фторопласт - 4	ГОСТ 10007– 80		Детали кислородно-дыхательной аппаратуры. Детали протезов клапанов сердца. Фетр медицинский для внутреннего протезирования. Основа протезов кровеносных сосудов. Сетка безузелковая для внутреннего протезирования
Нить лавсановая, окрашенная, зеленая	ТУ 606–32–60–72		Нити хирургические
Нить полиэфирная комплексная	ТУ 606-487–75		Нити хирургические Протезы кровеносных сосудов
Нить фторлоновая	ОСТ 6–05–09–85		Протезы кровеносных сосудов

### 16.3. Материалы для искусственных клапанов сердца и медицинских изделий сердечно-сосудистой хирургии

Специальное конструкторское бюро медицинской тематики Кирово-Чепецкого химкомбината имеет большой опыт производства искусственных клапанов сердца. Основные изделия медицинского назначения этого предприятия: искусственный клапан сердца ЛИКС-2

(рис.16.1), искусственный клапан сердца КАРБОНИКС-1, кольцо опорное митральное КОМП - 01, фетр медицинский из фторопласта-4.



Дисковый искусственный клапан сердца ЛИКС-2 получил широкое распространение при замене естественных клапанов сердца человека, благодаря малой массе, удовлетворительным гемодинамическим характеристикам и низкому профилю.

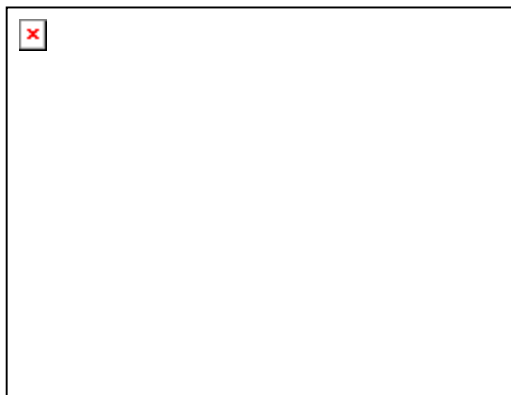
*Рис. 16.1. Искусственный клапан сердца ЛИКС-2*

Клапаны ЛИКС-2 применяются в клиниках с 1983 года. На настоящее время потребителям отправлено более 20000 клапанов. В 1996 году искусственные клапаны сердца ЛИКС-2 получили Сертификат соответствия России.

Запирающий элемент клапана выполнен из изотропного пиролитического углерода медицинского назначения – углеситалла. Мелкозернистая структура углеситалла позволяет получать полированные поверхности высокого класса чистоты с хорошими тромборезистентными свойствами. Корпус с ограничителями хода диска выполнен из одного куска технически чистого титана специального медицинского назначения, обладающего высокой биологической инертностью и хорошими физико-механическими показателями. Высокий класс чистоты поверхностей с повышенными тромборезистентными свойствами достигается оригинальной методикой электрополирования, которая разработана в СКБ МТ. Анализ отдаленных (более 10 лет) результатов клинического применения клапанов ЛИКС-2 подтверждает высокую эффективность и надежность конструкции.

Искусственный клапан сердца КАРБОНИКС-1 (рис.16.2) является дальнейшим развитием конструкций двухстворчатых клапанов. В 1990 году после всесторонних исследований в лабораторных и клинических условиях клапаны КАРБОНИКС-1 получили разрешение на применение. Клапан экспортируется в 17 стран Европы, Африки, Азии и Америки под торговой маркой JYROS. Технические решения конструкции клапана защищены авторским

свидетельством и патентами РФ, патентами США, Японии и Европейским патентом. В 1996 году искусственные клапаны сердца КАРБОНИКС-1 получили Сертификат соответствия России.



**Рис. 16.2.** Искусственный клапан сердца КАРБОНИКС-1

Наибольший опыт (более 5 лет) применения клапанов КАРБОНИКС-1 (JYROS) — в Англии, где в шести центрах установлено более 400 протезов. Выживаемость составила 89 %, а для пациентов, выписанных из больниц — 96,6 %. 85 % пациентов улучшили свое состояние по классификации N.Y.H.A., по крайней мере, на один класс.

Использование колец опорных митральных КОМП-01 в медицинской практике позволяет устранить недостаточность митрального и трикуспидального клапанов сердца путем дилатации фиброзных колец клапанов и сохранить естественный клапан сердца пациента. Кольца опорные митральные КОМП-01 (рис. 16.3) состоят из рентгеноконтрастного кольца и вязаного покрытия. Рентгеноконтрастное кольцо выполнено из резиновой смеси на основе силиконового каучука. Наличие рентгеноконтрастного кольца позволяет контролировать перемещение фиброзного кольца клапана сердца. Вязаное покрытие выполнено из полиэфирной нити. Каждое кольцо КОМП-01 поставляется на оправке из поликарбоната, состоящей из кольца и калибра. Разрешены к применению в медицинской практике приказом Минздрава России № 386 от 20.03.86. С 1999 года кольца опорные митральные имеют Сертификат соответствия России.



Рис. 16.3. Кольца опорные митральные КОМП–01

Фетр медицинский из ФТОРОПЛАСТА-4 (рис.16.4) используется для лечения дефектов межжелудочковой перегородки сердца, в качестве подкладочного материала под хирургические нити и в качестве материала каркасных имплантантов. Волокнистая структура фетра с определенной плотностью обеспечивает прорастание имплантанта в организме. Высокая прочность на разрыв фетра медицинского из фторопласта-4 позволяет надежно закрепить имплантант нитью при хирургических операциях. Фетр медицинский изготовлен из 100 % волокна фторопласта-4 и выпускается в виде пластин размером 90х90 мм. Толщина пластин: 1,0; 1,5; 2,0 мм. Разрешен к применению в медицинской практике приказом Минздрава России № 177 от 23.02.76. С 1999 года ФЕТР МЕДИЦИНСКИЙ имеет Сертификат соответствия России.



Рис. 16.4. Пластины фетра медицинского из фторопласта - 4

Углеситалл УСБ – изотропный пироуглеродный материал (рис. 16.5), получаемый путем направленной кристаллизации при пиролизе углеводородов с добавлением хлоридов металлов. Обладает высокими физико-механическими и антифрикционными свойствами, устойчив к высоким температурам и агрессивным средам, биологически инертен, газонепроницаем. Углеситалл применяют для изготовления уплотнений, работающих в высокоагрессивных средах: деталей для химической аппаратуры, устройств для разлива цветных металлов, индикаторных электродов, электродов для хемотропных приборов. Углеситалл широко применяется в изделиях медицинской техники, в частности, для изготовления деталей искусственных клапанов сердца. Углеситалл УСБ допущен Министерством

здравоохранения России к имплантации в сердце человека. Физические свойства углеситалла УСБ приведены в табл. 16.2.



Рис. 16.5. Поверхность углеситалла при 5000 увеличении

Таблица 16.2

<i>Физико-химические свойства Углеситалла "УСБ-Т" и "УСБ-М"</i>	
<b><i>Плотность, кг/м<sup>3</sup></i></b>	<b><i>1800 – 2100</i></b>
<b><i>Предел прочности <math>\sigma_b</math>, кг/мм<sup>2</sup>, 0-200 °С:</i></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• при растяжении</li> <li>• при изгибе</li> <li>• при сжатии</li> </ul>	<b><i>10</i></b> <b><i>20</i></b> <b><i>50</i></b>
<b><i>Модуль упругости, Па</i></b>	<b><i><math>(2,5 - 2,7) \cdot 10^{10}</math></i></b>
<b><i>Коэффициент Пуассона</i></b>	<b><i>0,27</i></b>
<b><i>Микротвердость, кг/мм<sup>2</sup>:</i></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• УГЛЕСИТАЛЛ "УСБ-Т"</li> <li>• УГЛЕСИТАЛЛ "УСБ-М"</li> </ul>	<b><i>110 (не менее)</i></b> <b><i>85 – 120</i></b>
<b><i>Удельное электросопротивление, Ом·мм<sup>2</sup>/м</i></b>	<b><i>15</i></b>
<b><i>Коэффициент термического расширения, 1/град</i></b>	<b><i><math>5,5 \cdot 10^{-6}</math></i></b>
<b><i>Коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·град</i></b>	<b><i>25</i></b>

"УСБ-Т" и "УСБ-М" выпускается в виде пластин размерами 35х60х6 мм (не более). Пример записи обозначения пластины из

углеситалла марки "УСБ-Т" длиной 24 мм, шириной 24 мм и толщиной 5 мм при заказе: Пластина "УСБ-Т" 24×24×5 ТУ 044–38–95.

#### **16.4. Материалы электродов для электрокардиографов и электроэнцефалографов**

Основные требования к электродам: малое контактное сопротивление, малая и стабильная поляризация, надежность крепления.

В настоящее время известны следующие материалы для электродов:

1. AgCl – хлорсеребряные электроды. Один из самых распространенных электродных материалов.
2. Серебро, золото, платина (Ag, Au, Pt). Хорошие характеристики, но дорогие. Часто медные и латунные электроды покрывают Ag, Au, Pt.
3. Графит (C) – углеродные электроды (УЭ). УЭ имеют практически нулевую поляризацию, но достаточно высокое контактное сопротивление.
4. Нержавеющая сталь. Электроды оборачиваются гигроскопическим материалом и смачиваются раствором NaCl. Характеристики хуже, чем у первых трех, но дешевле и не ржавеет.
5. Проводящая керамика. Обладает отличными электрическими свойствами, но требует сложного ухода и часто выходит из строя при использовании ненадлежащего геля.
6. Токопроводящая резина. Приемлемые электрические характеристики, но свойства нестабильны, резина быстро стареет. Практически не применяется.

#### **16.5. Сплавы и изделия с памятью формы в медицине**

“Эффект памяти механической формы” заключается в свойстве пластически деформированного при повышенных температурах образца, а затем деформированного при данной температуре до потери первоначальной формы, восстанавливать ее при повторном нагреве.

Деформирование при повышенных температурах проводят в диапазоне температур существования в материале, из которого изготовлен образец, устойчивой фазы. Низкотемпературное деформирование осуществляют при температурах фазового превращения или близких к ним. Важнейшим компонентом сплавов с “эффектом памяти формы” является термоупругий мартенсит.

Необходимым условием существования термоупругого мартенсита является когерентность (согласованность) кристаллических

решеток мартенсита и матричной фазы (рис. 16.6). Рост кристаллов мартенсита заканчивается при нарушении когерентности межфазных границ. Новые фазы в системе растут при уменьшении свободной энергии системы  $\Delta F$ . Если увеличение энергии упругой деформации  $\Delta F_E$  и уменьшение свободной химической энергии  $\Delta F_V$  уравнивается,  $\Delta F = 0$ . В этом случае прекращается рост кристаллов мартенсита. Установившееся равновесие фаз зависит от температуры, т.е. является термоупругим. Температурный гистерезис превращения мартенсита в сплавах с “эффектом памяти формы” обычно невелик. “Эффект памяти механической формы” в металлических материалах обусловлен образованием двойников в решетке при механической нагрузке и исчезновением их при нагревании.

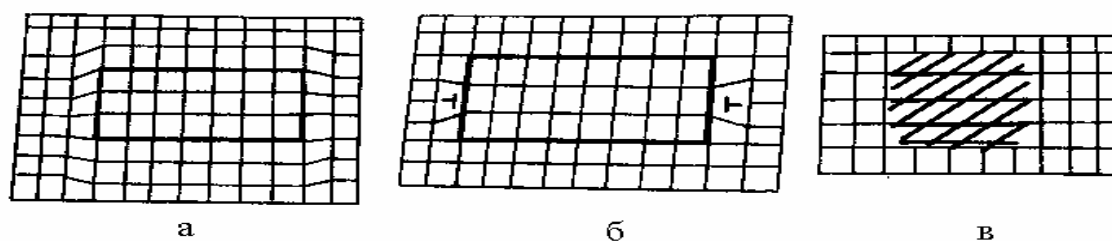


Рис. 16.6. Структура межфазных границ в сплаве: а – когерентных, б – частично когерентных, в – некогерентных

“Эффект памяти механической формы” характерен для ряда сплавов: Ti – Ni, Ti – Au, Ti – Pd, Ti – Pt, Au – Cd, Cu – Zn. Наиболее типичным представителем таких материалов является сплав Ti – Ni (нитинол).

Температурный интервал реализации “эффекта памяти” в интервалах 550 – 600 °С. Материал имеет следующие характеристики:  $E=66.7...72,6$  МПа,  $G=22,5...24,5$  ГПа,  $\sigma_B=735...970$  МПа,  $\delta=2...27$  %;  $\rho = 65...76$  мк Ом·см, температура плавления –  $T_{пл} = 1250...1310$  °С., плотность – 6440 кг/м<sup>3</sup>.

Сплавы с эффектом памяти используют для изготовления экстракторов различной конструкции для безоперационного удаления камней, преимущественно из нижнего и среднего отделов мочеточников (урологический аппарат “Захват-М” - изделие Республиканского инженерно-технического центра СО РАН, г. Томск), дилататоров и каркасов, используемых при холецистогастроанастомозе, почечно-кишечном анастомозе, опухоли ворот печени, бужировании холедоха и печеночного протока и т.п.



В космической технике эти материалы применяют для изготовления самораскрывающихся антенн космических кораблей в устройствах пожаротушения и др.

Анатолий Николаевич Гормаков

## **Материаловедение**

Учебно - методическое пособие

Научный редактор доктор технических наук, профессор  
В.С. Дмитриев

Набор и компьютерная верстка Гормаков А.Н.

Редактор Р.Д. Игнатова

Подписано к печати 20.05.2003

Формат 60x84/16. Бумага ксероксная

Печать RISO. Усл. печ. л. 6,98. Уч.- изд. л. 6,32.

Тираж 170 экз. Заказ № . Цена свободная.

Издательство ТПУ. 634050, Томск, пр. Ленина,30.