

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата направления 12.03.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра материаловедения и технологии  
художественных изделий

# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата направления 12.03.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2020

УДК 669.017(073)

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ:** Методические указания к самостоятельной работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *А.В. Сивенков, Л.Г. Борисова*. СПб, 2020. 79 с.

Изложены материалы по основным разделам дисциплины для выработки навыков самостоятельного предметного анализа о составе, строении и свойствах материалов. Для улучшения усвоения материала курса и повышения эффективности преподавания предусмотрены рефераты, позволяющие облегчить усвоение учебного материала и методические указания к их выполнению, а также библиографический список рекомендуемой литературы.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 12.03.01 «Приборостроение» по профилю «Приборы и методы контроля качества и диагностики».

Научный редактор проф. *Е.И. Пряхин*

Рецензент доц. *С.А. Филиппов* (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

© Санкт-Петербургский  
горный университет, 2020

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
для студентов бакалавриата направления 12.03.01*

Сост.: *А.В. Сивенков, Л.Г. Борисова*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
материаловедения и технологии художественных изделий

Ответственный за выпуск *А.В. Сивенков*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 26.05.2020. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 4,7. Усл.кр.-отт. 4,7. Уч.-изд.л. 4,5. Тираж 75 экз. Заказ 299. С 34.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Самостоятельная работа студента является не менее важной, чем аудиторные занятия под руководством преподавателя, так как она вырабатывает навыки самостоятельного предметного анализа о составе, строении и свойствах основных металлических и неметаллических материалов, методах упрочнения металлов и сплавов, рациональных областях применения тех или иных конструкционных и инструментальных материалов, превращениях, происходящих при нагреве и охлаждении материалов, правильного выбора марки материалов, исходя из функционального назначения изделия, а так же разработка процессов упрочняющей технологии.

Для улучшения усвоения материала курса и повышения эффективности преподавания, для студентов предусмотрены выполнения *рефератов*, позволяющие облегчить усвоение учебного материала. Для учета индивидуальных особенностей студентов предусмотрено проведение консультаций.

Материалы для самостоятельного изучения могут использоваться в качестве краткого справочника студентами и аспирантами при выполнении НИР.

### 1. Строение и свойства металлических сплавов

*Механические свойства металлов и принципы их определения*

**Механические свойства** характеризуют поведение материалов при внешнем (механическом) нагружении.

Наиболее общими механическими свойствами являются **прочность и твердость, пластичность и ударная вязкость**.

**Прочность** – способность материала сопротивляться деформации и разрушению под действием внешних нагрузок. Стандартными характеристиками прочности, которые закладываются в конструкторский расчет, являются *условный предел текучести* ( $\sigma_{0,2}$ ) и *предел прочности* ( $\sigma_b$ ). Они определяются по результатам статического растяжения образцов усилием (нагрузкой)  $\vec{P}$ , (рис. 1).

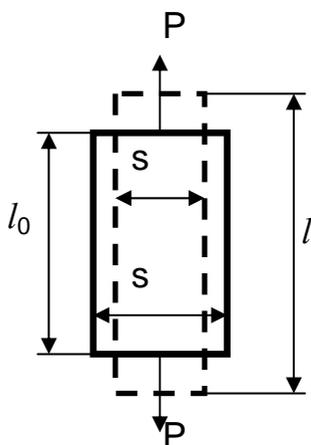


Рис. 1. Схема испытаний образцов на растяжение

Приложение к телу нагрузки вызывает его **деформацию** – изменение размеров (и часто формы) тела. В данном случае величину деформации можно оценить **относительным удлинением**

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $l_0$  и  $l$  длина образца в исходном и деформированном состояниях соответственно.

Реакцией тела на деформацию является возникновение в нем внутренних **напряжений**,

$$\sigma = P/S, \quad (2)$$

стремящихся предотвратить деформацию и, в конечном счете, разрушение образца. При относительно небольших нагрузках **деформация обратимая – упругая** – образец восстанавливает свои размеры (форму) при снятии нагрузки. Упругая деформация подчиняется закону Гука:

$$\sigma = E \cdot \delta, \quad (3)$$

где  $E = const$  – **модуль упругости** (модуль Юнга), характеризующий жесткость материала – сопротивляемость упругой деформации.

Максимальное напряжение, при котором еще выполняется закон Гука, называется пределом упругости ( $\sigma_y$ ).

При значительных нагрузках (когда возникающее в теле напряжение  $\sigma$  становится больше  $\sigma_y$ ) **деформация становится необратимой = остаточной = пластической**, т.е. частично сохраняется при снятии нагрузки.

Напряжение, при котором остаточная деформация составляет 0,2 % ( $\delta=0,2$  %), **называется условным пределом текучести** ( $\sigma_{0,2}$ ).

Максимальное напряжение, которое выдерживает образец до разрушения, называется **пределом прочности или временным сопротивлением** ( $\sigma_b$ ).

Все перечисленные **прочностные характеристики** ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$  и  $E$ ) очень важны, т.к. дают разностороннюю информацию о прочности материала, но, к сожалению, способ их определения трудоемок и весьма дорог. Значительно проще измерение **твердости** ( $H$ ) – **сопротивления местной упругой и пластической деформации**.

Твердость определяется методом вдавливания твердого наконечника – индентора в испытуемый образец (рис. 2) и оценивается по глубине или размеру возникающего отпечатка (углубления).

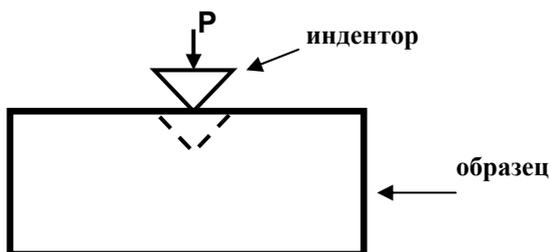


Рис. 2. Схема испытаний образцов на твердость

Приборы для измерения твердости различаются материалом (твердостью) и формой индентора и величиной прилагаемой нагрузки.

Соответственно различают HB, HRB (HRC) и HV – **твердость по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу**, соответственно. HB и HRB (индентор – закаленный стальной шарик) используют для из-

мерения твердости мягких материалов; HRC и HV (индентор – алмазные конус и пирамида соответственно) – для твердых и очень твердых материалов.

**Пластичность** – способность материала пластически деформироваться без разрушения. На явлении пластичности основаны все способы обработки металлов давлением. Величину пластичности определяют по результатам испытаний образцов на растяжение (рис. 1) и оценивают **относительным удлинением** (1) и **относительным сужением**:

$$\Psi = (S_0 - S)/S_0 \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Из формул (1 и 3) очевидно, что характеристики пластичности измеряются в %. **Ударная вязкость** характеризует сопротивление материала хрупкому разрушению.

Поскольку «охрупчиванию» материала при данной температуре способствуют: увеличение скорости нагружения и наличие поверхностных (и внутренних) дефектов типа микротрещин, то ударную вязкость определяют по результатам ударных испытаний образцов по специальным надрезам (рис. 3).

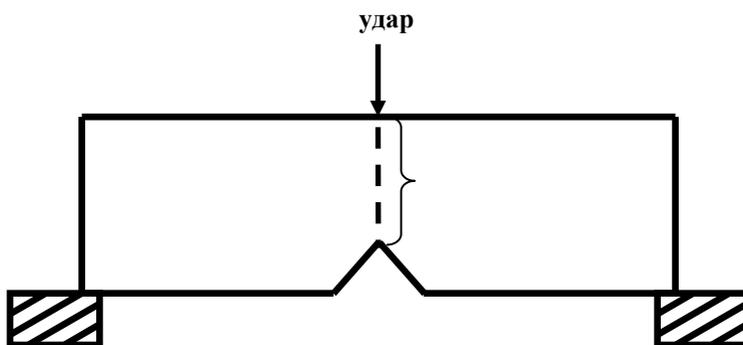


Рис. 3. Схема испытаний образцов на ударную вязкость

Величина ударной вязкости (КС) определяется как работа (А) деформации и разрушения образца, отнесенная к площади его поперечного сечения (S) в месте надреза:

$$KC=A/S. \quad (5)$$

В обозначениях ударной вязкости КСУ и КСV последняя буква указывает форму надреза (испытания образца, показанного на рис. 3, соответствуют КСV). Размерность ударной вязкости Дж/м<sup>2</sup> (1МДж/м<sup>2</sup> = 10 кг·м/см<sup>2</sup>).

Ударная вязкость очень важная характеристика, т.к. от ее величины зависит эксплуатационная надежность изделий. Материалы с малой величиной ударной вязкости являются хрупкими и могут легко разрушаться даже при небольших динамических нагрузках из-за случайных (или технологических) повреждений поверхности деталей или внутренних дефектов структуры.

Знание всей совокупности этих свойств позволяет оценить **конструкционную прочность** – комплексную характеристику работоспособности материала в реальной конструкции.

#### ***Кристаллические решетки металлов***

Металлы обычного способа производства имеют кристаллическое строение. В кристаллах атомы расположены строго упорядоченным образом так, что, если через их центры провести воображаемые линии вдоль трех координатных осей, они образуют пространственную (кристаллическую) решетку (рис. 4).

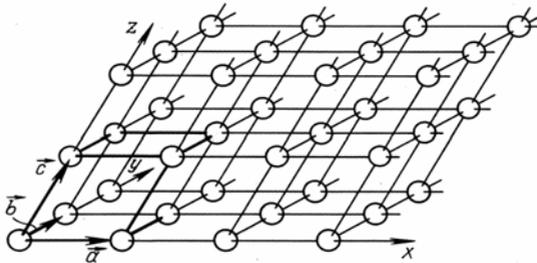


Рис. 4. Пространственная кристаллическая решетка

**Основное свойство кристаллических решеток – их пространственная периодичность.** Это значит, что любую кристаллическую решетку можно представить состоящей из множества одинаковых соприкасающихся микрообъемов, называемых **элементарными**

**ячейками.** В общем случае **элементарная ячейка** представляет собой параллелепипед, построенный на трех векторах  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  (рис. 4).

**Тип кристаллической решетки** определяется формой элементарной ячейки и характером расположения в них атомов. Количественно кристаллические решетки описываются тремя основными характеристиками:

1. **Период (или параметр) решетки** – расстояние между соседними узлами решетки вдоль трех координатных осей. В общем случае решетка характеризуется тремя параметрами – скалярными величинами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (рис. 4). В случае простой кубической решетки (рис. 5) имеется один параметр решетки, равный ребру элементарной ячейки (куба).

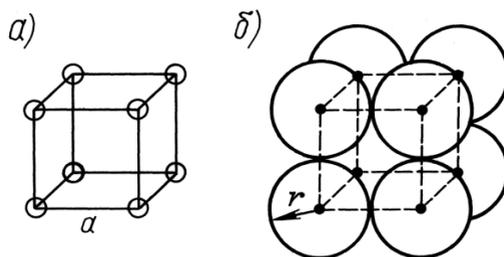


Рис. 5. Элементарная ячейка простой кубической решетки (а) и схема упаковки в ней атомов (б)

Очевидно, что величина параметра решетки очень мала (в металлах  $\approx 0,2 \dots 0,6$  нм;  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ) и определяется рентгеноструктурным анализом.

2. **Координационное число (К)** – число ближайших соседей, окружающих данный атом и находящихся от него на одинаковых расстояниях. Для оценки величины К нужно представить, что элементарная ячейка со всех сторон окружена себе подобными (рис. 6).

Видно, что в простой кубической решетке  $K = 6$ .

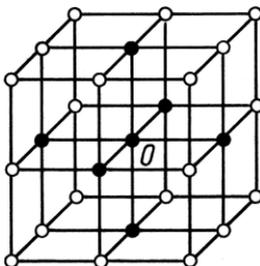


Рис. 6. Определение координационного числа и относительной плотности упаковки в простой кубической решетке

3. **Относительная плотность упаковки решетки атомами** ( $q$ ) – отношение объема, занимаемого атомами в ячейке, к объему самой ячейки, т.е.

$$q = \frac{4/3 \pi \cdot r^3 \cdot n}{a^3} \cdot 100, \quad (6)$$

где  $r$  – радиус атома,  $a$  – параметр решетки (рис. 5),  $n$  – число целых атомов, приходящихся на одну ячейку. Очевидно, что в простой кубической решетке  $n = \frac{1}{8} \cdot 8 = 1$  (см. рис. 6), поэтому легко подсчитать

(учитывая, что  $a = 2r$ ), что в простой кубической решетке  $q = 52\%$ . Такая решетка является «рыхлой», так как 48% ее объема приходится на меж-атомные пустоты.

Металлическим элементам свойственны плотноупакованные решетки с высокой степенью компактности, т.е. с большими значениями  $K$  и  $q$ .

Многие металлы имеют *объемноцентрированную* (ОЦК) и *гранецентрированную* (ГЦК) решетки, их характеристики приведены на рис. 7. Например, ОЦК решетку имеет  $\text{Fe}_\alpha$  (или  $\alpha\text{-Fe}$ ), а ГЦК решетку –  $\text{Fe}_\gamma$  (или  $\gamma\text{-Fe}$ ). Такая способность некоторых веществ иметь различный тип решетки называется полиморфизмом.

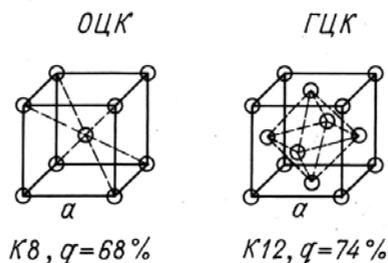


Рис. 7. Объемноцентрированная (ОЦК) и гранецентрированная (ГЦК) решетки

### *Дефекты кристаллической решетки (реальное строение кристаллов)*

В реальных кристаллах всегда имеются отклонения от идеального порядка в расположении атомов, называемые **дефектами решетки**. По геометрии вызываемых ими нарушений решетки дефекты подразделяют на: **точечные, линейные и поверхностные**.

#### *Точечные дефекты*

На рис. 8 показаны различные виды точечных дефектов. Это **вакансии** – пустые узлы решетки, «свои» **атомы в междоузлии** и **атомы примесей** в узлах решетки и междоузлиях.

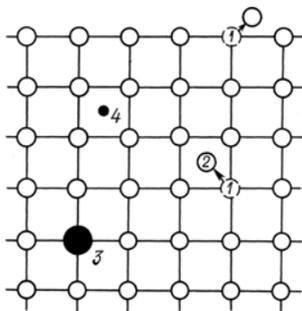


Рис. 8. Типы точечных дефектов кристаллической решетки: 1 – вакансия, 2 – атом в междоузлии, 3 и 4 – атомы примесей в узле и междоузлии соответственно

Вокруг любого точечного дефекта возникает местное искажение решетки радиусом  $R$  в  $1 \dots 2$  периода решетки (см. рис. 9), поэтому, если таких дефектов много, они влияют на характер распре-

деления межатомных сил связи и, соответственно, на свойства кристаллов.

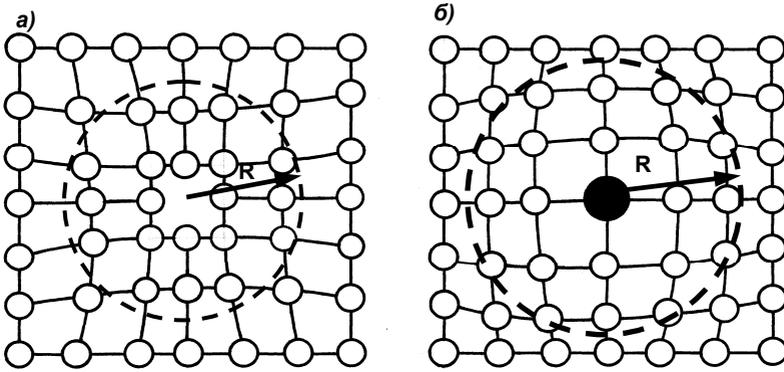


Рис. 9. Локальное искажение кристаллической решетки вокруг вакансии (а) и примесного атома в узле решетки (б)

### Линейные дефекты

Линейные дефекты называются **дислокациями**. Их появление вызвано наличием в отдельных частях кристалла «лишних» атомных полуплоскостей (**экстраплоскости**). Они возникают в процессе кристаллизации металлов (из-за нарушения порядка заполнения атомных слоев) или в результате их пластического деформирования, как показано на рис. 10. Видно, что под влиянием сдвигающего усилия  $\vec{P}$  произошел частичный сдвиг верхней части кристалла вдоль некоторой плоскости скольжения («легкого сдвига») ABCD. В результате образовалась *экстраплоскость* EFGH. Поскольку она не имеет продолжения вниз, вокруг ее края EH возникает упругое искажение решетки радиусом в несколько межатомных расстояний (т.е.  $\approx 10^{-7}$ ), протяженность же этого искажения во много раз больше (может достигать до  $\approx 0,1 \dots 1$  см).

Такое несовершенство кристалла вокруг края экстраплоскости является линейным дефектом решетки и называется **краевой дислокацией**.

Важнейшие механические свойства металлов – прочность и пластичность – определяются наличием дислокаций и их поведени-

ем при нагружении тела. Остановимся на двух особенностях механизма перемещения дислокаций.

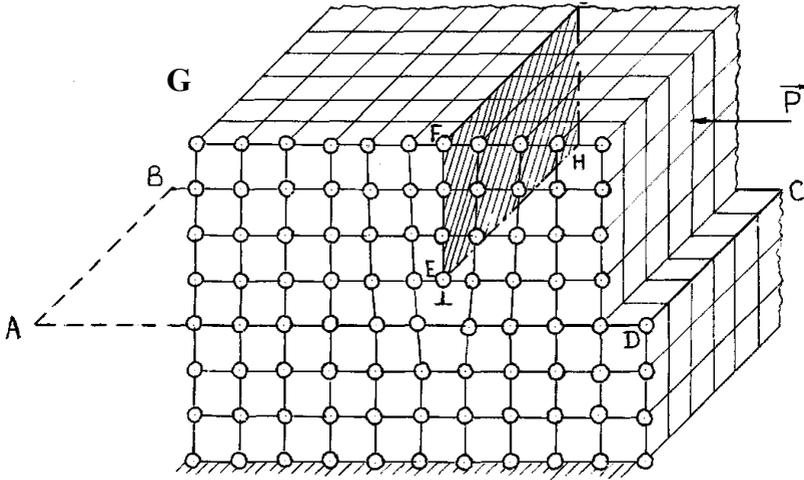


Рис. 10. Образование краевой дислокации ( $\perp$ ) в результате частичного сдвига верхней части кристалла под действием усилия  $\vec{P}$ :  $ABCD$  - плоскость скольжения;  $EFGH$  - экстраплоскость;  $EH$  - линия краевой дислокации

1. Дислокации могут весьма легко (при малой нагрузке  $\vec{P}$ ) передвигаться вдоль плоскости скольжения посредством «эстафетного» перемещения экстраплоскости. На рис. 11 показан начальный этап такого движения (двумерный рисунок в плоскости, перпендикулярной линии краевой дислокации). Под действием усилия  $\vec{P}$  атомы экстраплоскости (1-1) отрывают от плоскости (2-3) атомы (2-2), расположенные выше плоскости скольжения. В результате эти атомы образуют новую экстраплоскость (2'-2'); атомы «старой» экстраплоскости (1-1) занимают освободившиеся места, достраивая плоскость (1'-1'-3).

Этот акт означает исчезновение «старой» дислокации, связанной с экстраплоскостью (1-1), и возникновение «новой», связанной с экстраплоскостью (2'-2'), или, другими словами, передачу «эстафетной палочки» - дислокации на одно межплоскостное расстоя-

ние. Такое эстафетное перемещение дислокации будет продолжаться до тех пор, пока она не дойдет до края кристалла, что будет означать сдвиг его верхней части на одно межплоскостное расстояние (т.е. пластическую деформацию).

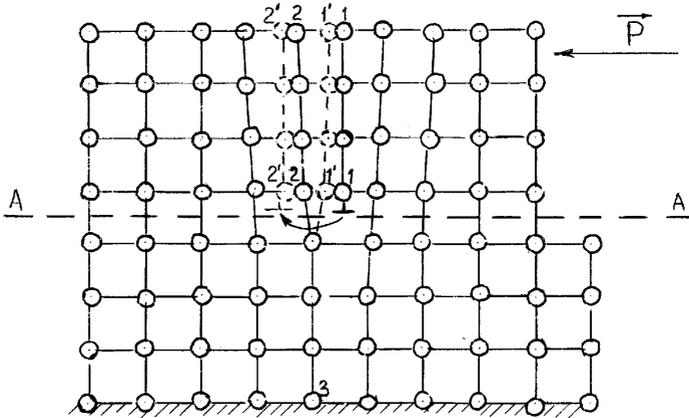


Рис. 11. Начальный этап эстафетного перемещения краевой дислокации ( $\perp$ ):  
 А-А – плоскость скольжения, 1-1 экстраплоскость (исходная позиция)

2. Очевидно, однако, что такая легкость скольжения дислокаций будет наблюдаться лишь в том случае, когда на их пути отсутствуют какие – либо препятствия. Такими *препятствиями являются любые дефекты решетки* (особенно линейные и поверхностные!), а также *частицы других фаз*, если они присутствуют в материале. Эти препятствия создают искажения решетки, преодоление которых требует дополнительных внешних усилий, поэтому могут заблокировать движение дислокаций, т.е. сделать их неподвижными.

#### *Поверхностные дефекты*

Все промышленные металлы (сплавы) являются **поликристаллическими** материалами, т.е. состоят из огромного количества мелких (обычно  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  см), хаотически ориентированных кристалликов, называемых **зернами**. Очевидно, что периодичность решетки, присущая каждому зерну (*монокристаллу*), в таком материале нарушена, поскольку кристаллографические плоскости зерен по-

вернуты относительно друг друга на угол  $\alpha$  (рис. 12), величина которого колеблется от долей до нескольких десятков градусов.

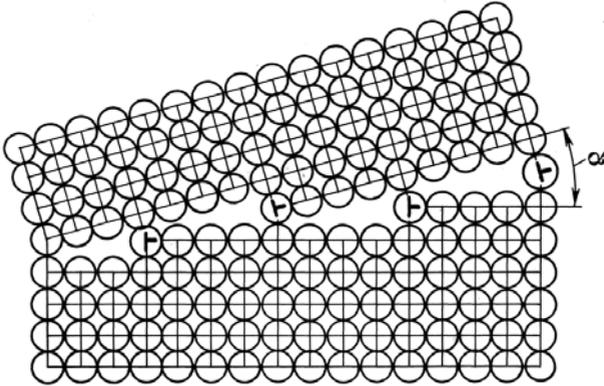


Рис. 12. Схема строения границ зерен в поликристаллическом материале

Граница между зернами представляет собой переходный слой шириной до 10 межатомных расстояний, обычно с неупорядоченным расположением атомов. Это место скопления дислокаций, вакансий, примесных атомов. Поэтому в объеме поликристаллического материала **границы зерен являются двумерными, поверхностными дефектами.**

***Влияние дефектов решетки на механические свойства кристаллов. Пути повышения прочности металлов***

Под прочностью кристаллических тел понимают их сопротивление приложенной нагрузке, стремящейся сдвинуть или, в пределе, оторвать одну часть кристалла относительно другой.

*Наличие в металлах подвижных дислокаций (уже в процессе кристаллизации возникает до  $10^6 \dots 10^8$  дислокаций в сечении, равном  $1\text{ см}^2$ ) приводит к их пониженной сопротивляемости нагрузке, т.е. высокой пластичности и невысокой прочности.*

Очевидно, что наиболее эффективным способом повышения прочности будет удаление дислокаций из металла. Однако такой путь не технологичен, т.к. бездислокационные металлы удастся получать лишь в виде тонких нитей (так называемых «усов») диаметром в несколько микрон и длиной до  $\approx 10$  мкм.

Поэтому **практические способы упрочнения** основаны на *торможении, блокировании подвижных дислокаций путем резкого увеличения числа дефектов решетки (в первую очередь линейных и поверхностных!), а также создании многофазных материалов.*

Такими традиционными **методами повышения прочности** металлов являются:

-пластическое деформирование (явление наклепа или нагартовки),  
-термическая (и химико-термическая) обработка,  
-легирование (введение специальных примесей) и, наиболее общий подход, – это создание сплавов.

Поэтому *вопрос о степени упрочнения необходимо решать индивидуально, исходя из назначения и условий работы изделия.*

### **Строение металлических сплавов**

В конце предыдущей темы отмечалось, что создание *сплавов* – наиболее общий путь повышения прочности металлических материалов. Этот *метод (сплавления)* позволяет получить также более широкий диапазон особых полезных свойств (например, жаропрочность, коррозионную стойкость, тепло – и износостойкость и др.).

**Сплавы** – это материалы, полученные *сплавлением или спеканием* (порошковая металлургия) *двух или более компонентов.*

**Компоненты** – *вещества, образующие сплав*; ими могут быть химические элементы или устойчивые химические соединения.

Структура и свойства сплава определяются в первую очередь природой (типом) фаз, образующихся при сплавлении компонентов.

**Фаза** – *однородная по химическому составу, типу решетки и свойствам часть сплава, отделенная от других частей границей раздела.* В зависимости от характера физико–химического взаимодействия компонентов в металлических сплавах возможны три основных **типа твердых** (кристаллических) **фаз**: 1) химические элементы, 2) химические соединения, 3) твердые растворы.

Основной (матричной) фазой большинства промышленных сплавов являются твердые растворы, поэтому рассмотрим их более подробно.

**Твердые растворы** – это фазы, в которых атомы одного компонента *B* размещены (растворены) в кристаллической решетке другого компонента *A* – «растворителя». По мере увеличения числа

атомов  $B$  в решетке  $A$  химический состав и свойства твердого раствора плавно изменяются (в частности, температура плавления), т.е. это *фазы переменного состава* (в отличие от химических элементов и химических соединений).

Сплав, представляющий собой *твердый раствор*, является *однофазным веществом с решеткой, присущей основному компоненту (растворителю)*. Атомы второго компонента (растворенного) размещены в решетке растворителя, как правило, случайным, неупорядоченным образом.

По способу размещения атомов растворенного вещества ( $B$ ) в решетке  $A$  различают два основных типа твердых растворов – *растворы замещения и внедрения* (рис. 13).

Видно, что при образовании *твердых растворов замещения* атомы  $B$  располагаются в вакансиях решетки компонента  $A$  (рис. 8). При этом количество атомов  $B$  в решетке  $A$  может изменяться в широких пределах (при определенных условиях *возможна даже неограниченная взаимная растворимость компонентов в твердом состоянии*). В случае *твердых растворов внедрения* атомы  $B$  располагаются в междоузлиях решетки  $A$ . Понятно, что это возможно, если размеры атомов  $B$  сравнимы с размерами межатомных пустот решетки  $A$ .

Поэтому растворы внедрения образуют с металлами элементы, имеющие наименьший атомный радиус (H, B, C, N). Такие растворы всегда имеют *ограниченную растворимость*. Очевидно, что растворенные атомы ( $B$ ) являются точечными дефектами, вызывающими искажение решетки  $A$  (рис. 9), поэтому *образование сплавов – твердых растворов должно приводить к повышению прочности исходных компонентов*.

**Химические соединения** обычно имеют фиксированный состав, отвечающий формуле  $A_n B_m$ , где  $n$  и  $m$  – простые числа, причем тип решетки соединения  $A_n B_m$  отличается от решетки исходных компонентов.

В железоуглеродистых сплавах (сталях и чугунах) наиболее важны *соединения металлов* (например, железа) с *углеродом – карбиды*.

Независимо от природы химические соединения в металлических сплавах, как правило, обладают высокой твердостью и хрупкостью (т.е. малопластичны); твердые растворы, напротив, имеют

хорошую пластичность (и вязкость), но невысокую прочность и твердость.

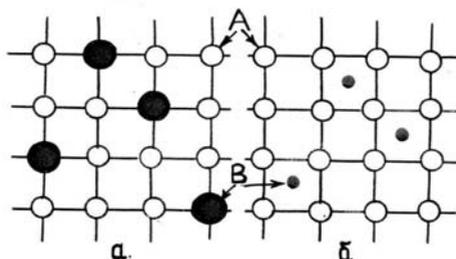


Рис. 13. Твердые растворы замещения (а) и внедрения (б)

Поэтому *оптимальному сочетанию свойств* конструкционных металлических сплавов (высоким значения прочности и ударной вязкости) соответствует структура, в которой дисперсные ( $\approx 10$  нм) частицы твердых химических соединений равномерно и достаточно плотно (на расстояниях  $\approx 20\dots 40$  нм) распределены в пластичной матричной фазе – твердом растворе.

Итак, **свойства сплавов** (данного химического состава) **определяются их структурой**. Чтобы прогнозировать свойства какого-либо сплава, нужно знать его структуру.

*Структуру сплавов различного химического состава можно установить путем анализа соответствующих диаграмм фазового равновесия или диаграмм состояния.* Под состоянием понимают наличие тех или иных фаз в сплаве *данного химического состава при данной температуре*. То есть **диаграммы состояния** строятся в координатах «температура–химический состав сплавов системы А–В». Линии диаграмм состояния – это *линии фазовых превращений* («критические линии»), при пересечении которых фазовый состав (структура) сплавов обязательно изменяется.

## 2. Влияние химического состава и термической обработки на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов

*Стали и чугуны. Диаграмма состояния «железо–цементит». Формирование равновесной структуры углеродистых сталей*

При сплавлении железа с углеродом (С) образуется *карбид железа*  $Fe_3C$ , называемый *цементитом* он содержит 6,67 % С.

Промышленные сплавы железа с углеродом содержат до  $\approx 4\%$  С, поэтому их структуру изучают с помощью *диаграммы состояния «Железо–цементит»* ( $Fe-C$ ), т.е. компонентами данной системы являются Fe и  $Fe_3C$  (рис. 14).

На этом рисунке обозначены *фазы* во всех областях диаграммы, а под рисунком указаны *структуры* сплавов с различным содержанием углерода при нормальных температурах.

На диаграммах состояния верхняя система линий (в данном случае ABCD) называется линией *ликвидус* (лат. – жидкий), выше нее любой сплав находится в жидком состоянии. На рис. 14. **Ж** – жидкая фаза (расплав) - жидкий раствор С в Fe.

Система линий диаграммы непосредственно под ликвидусом (в данном случае ANJESF) называется линией *солидус* (лат. – твердый), ниже нее любой сплав – в твердом состоянии.

В системе Fe- $Fe_3C$  существуют **три твердые** (кристаллические) **фазы**: **цементит** – химическое соединение (на диаграмме его однофазная «область» - линия – DFKL) и твердые растворы С в Fe – **аустенит** (область GNJES) и **феррит** (0GPO). Наличие двух твердых растворов является следствием полиморфизма железа – его способности существовать в двух модификациях ( $\alpha$  и  $\gamma$ ) при различных температурах. В интервале температур  $0...911\text{ }^\circ\text{C}$ , а также  $1392...1539\text{ }^\circ\text{C}$  это  $\alpha$ -Fe (или  $Fe_\alpha$ ) с ОЦК решеткой в интервале  $911...1392\text{ }^\circ\text{C}$  железо имеет ГЦК решетку – это  $\gamma$ -Fe (или  $Fe_\gamma$ ).

Соответственно при сплавлении железа с углеродом образуются два твердых раствора внедрения С в Fe: **феррит (Ф)** – раствор С в  $\alpha$ -Fe и **аустенит (А)** – раствор С в  $\gamma$ -Fe.

Из диаграммы  $Fe-C$  (см. рис. 14) видно, что окончательная структура (при нормальных температурах) практически всех сплавов (правее т. Q, т.е.  $>0,01\%$ С) формируется из двух фаз: Ф и Ц.

**Феррит** – твердый раствор на основе  $\alpha$ -Fe, содержащий  $< 0,02\%$ С, очень мягкая (твердость  $HB \leq 800$ ) и пластичная (относительное удлинение  $\delta \geq 30\%$ ) фаза.

**Цементит** – карбид железа, напротив, *очень тверд* ( $HB \approx 8000$ ) и *хрупок* ( $\delta \approx 0\%$ ). Такие характеристики Ф и Ц обу-

словливают существенную зависимость механических свойств железуглеродистых сплавов от содержания С.

До сих пор были обсуждены только однофазные области диаграммы  $Fe-C$ . На рис. 14 показаны также двухфазные области (заметим, что из логических соображений в любой двухфазной области находятся те фазы, которые расположены слева и справа от данной области).

Отсюда отметим, что *свойства сплавов зависят не только от фазового состава, но и от конкретной структуры сплавов. Чтобы установить структуру сплава, нужно проследить, какие превращения происходят в нем при медленном охлаждении из жидкого состояния до комнатной температуры.*

Рассмотрим этот процесс на примере **сталей** – сплавов с содержанием углерода от 0,02 до 2,14 % С.

**Формирование равновесной структуры углеродистых сталей в процессе кристаллизации**

Из диаграммы  $Fe-C$  следует, что все стали в результате затвердевания (т.е. непосредственно ниже линии солидус NJBE) приобретают однофазную аустенитную структуру (А). Видно также, что при дальнейшем охлаждении они пересекают ряд линий диаграммы, значит в них происходят *превращения в твердом состоянии.*

*Эти превращения вызваны явлением полиморфизма железоуглеродистых сплавов (а также уменьшением растворимости С в А (линия ES) и Ф (линия PQ) с понижением температуры). Как следует из диаграммы  $Fe-C$ , эти превращения в сталях заканчиваются на линии PSK (727 °С), т.к. ниже этой температуры какие – либо критические линии отсутствуют.*

На примере стали, содержащей 0,8 %С (т. S), видно, что *превращение, происходящее при  $T \leq 727$  °С, заключается в распаде аустенита на смесь феррита и цементита:*



где индексы S и P показывают содержание С в аустените и феррите соответственно (в цементите оно не указывается, т.к. при любой температуре равно 6,67 %С).

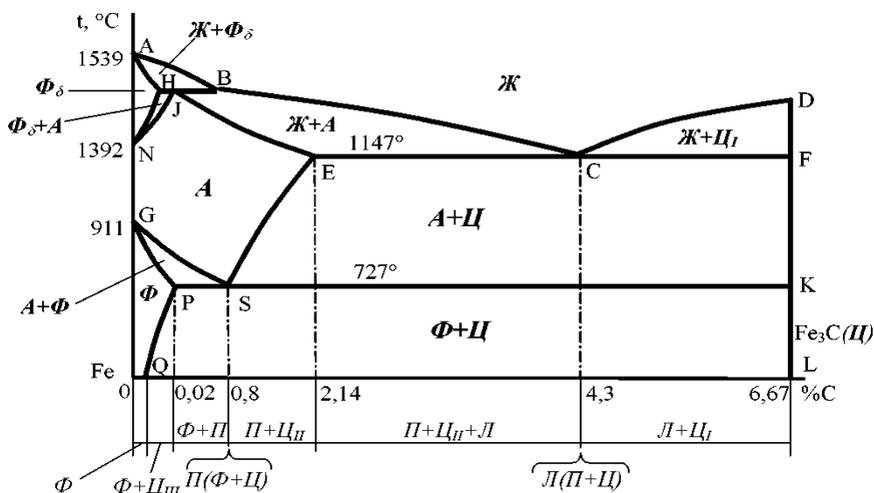


Рис. 14. Диаграмма состояния «Железо-цементит»: внизу под диаграммой – обозначения структур сплавов с различным содержанием углерода при нормальных температурах

Такое превращение, когда при постоянной температуре из одной твердой фазы образуются две другие (при фиксированных составах фаз) называется **эвтектоидным**.

В *железоуглеродистых сплавах эвтектоидное превращение называется перлитным*, поскольку в результате него образуется **перлит** - *чередующаяся смесь тонких кристаллов (пластинок) феррита и цементита* – структура, напоминающая перламутровый (жемчужный) узор раковин.

В зависимости от содержания С *углеродистые стали делятся на доэвтектоидные (0,02...0,8 %С), эвтектоидные (≈0,8 %С), заэвтектоидные (0,8...2,14 %С).*

Из приведенного выше обсуждения очевидно, что *равновесная структура эвтектоидной стали – перлит* (рис. 15, в).

В доэвтектоидных сталях помимо **перлита (П)** в структуре содержатся кристаллы **избыточного феррита**, образовавшиеся из аустенита при охлаждении между линиями GS и PS (рис. 15, б).

В *заэвтектоидных сталях* перлитному превращению предшествует выделение вторичного цементита ( $\text{Ц}_{\text{II}}$ ) из *аустенита*, поскольку предельное содержание С в А уменьшается с понижением температуры (по линии ES). Поэтому *структура заэвтектоидных сталей состоит из зерен перлита, разделенных сеткой кристаллов  $\text{Ц}_{\text{II}}$*  (рис. 15, г).

Таким образом, **основной структурной составляющей углеродистых сталей в равновесном состоянии является перлит** (рис. 15). *Эвтектоидная сталь содержит одну структурную составляющую (П), все остальные стали по две: доэвтектоидные П + Ф, заэвтектоидные П +  $\text{Ц}_{\text{II}}$* . В сплавах, содержащих < 0,02 %С (левее т. Р, рис. 14), перлит в структуре отсутствует, т.к. в процессе охлаждения они не пересекают линию перлитного превращения (PSK). Эти сплавы называются **техническим железом** в отличие от химически чистого Fe, представленного на диаграмме Fe – C вертикалью ANG0). *Структура технического Fe – феррит* (хотя в сплавах, содержащих 0,01...0,02 %С присутствует небольшое количество третичного цементита –  $\text{Ц}_{\text{III}}$ ).

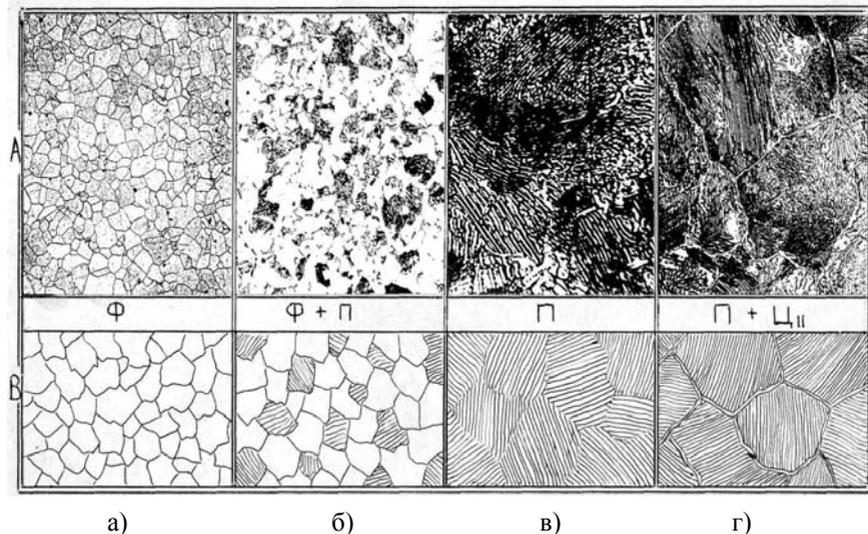


Рис. 15. Структура технического железа (а), доэвтектоидной (б), эвтектоидной (в), заэвтектоидной (г) сталей

Заметим, что несмотря на разнообразие структур, (обусловленное тем, что сплавы с разным содержанием углерода пересекают при охлаждении различные линии диаграммы Fe–Ц), фазовый состав сплавов, содержащих  $>0,01\%C$ , одинаков –  $\Phi + \Psi$ .

### **Зависимость механических свойств железоуглеродистых сплавов от содержания углерода**

Из диаграммы Fe–Ц (рис. 14) следует, что структуры практически всех ( $>0,01\%C$ ) сплавов при нормальных температурах формируются из двух фаз – феррита ( $\Phi$ ) и цементита ( $\Psi$ ). Очевидно, что с увеличением содержания углерода в структуре сплавов возрастает количество твердого и хрупкого  $\Psi$  и уменьшается количество мягкого, пластичного  $\Phi$ . Твердые частицы  $\Psi$  повышают сопротивление сплава пластической деформации. Поэтому с **увеличением содержания углерода растут твердость (НВ) и прочность ( $\sigma_b$ ) сплавов, падают их пластичность ( $\delta$ ,  $\psi$ ) и ударная вязкость (КСУ)** – рис. 16. Отмечалось, что и прочность ( $\sigma_b$ ) и твердость (НВ) характеризуют сопротивление материала пластической деформации. Поэтому между  $\sigma_b$  и НВ существует закономерная связь

$$\sigma_b = a \cdot \text{НВ}, \quad (7)$$

где  $a = \text{const}$ , отличающаяся для различных сплавов (для сталей  $a \approx 0,3$ ). С этим связана одинаковая линейная зависимость  $\sigma_b$  и НВ от содержания углерода.

Однако, как видно из рис. 16, в сплавах, содержащих  $> 0,8\%C$ , прочность при растяжении падает, а твердость продолжает расти. Это обусловлено охрупчивающим влиянием сетки  $\Psi_{II}$  в заэвтектоидных сталях, которое не сказывается при измерениях твердости, т.к. при этом работает не все сечение образца (как при определении  $\sigma_b$ ), а лишь локальная область под индентором.

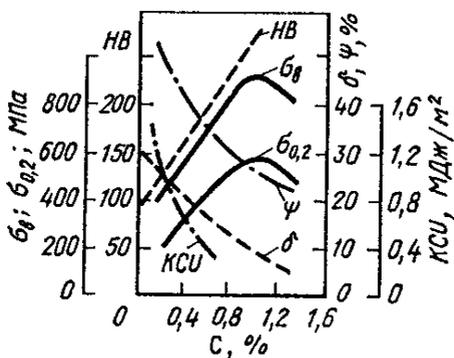


Рис. 16. Зависимость механических свойств углеродистых сталей в равновесном состоянии от содержания углерода

### 3. Классификация и маркировка углеродистых сталей

Выше была представлена классификация углеродистых сталей по равновесной структуре, это: доэвтектоидные стали (структура  $\Phi + П$ ), эвтектоидные ( $П$ ) и заэвтектоидные ( $П + Ц_{II}$ ).

Видно, что достоинством сталей с большим содержанием углерода ( $\geq 0,7\%C$ ) является высокая твердость, поэтому такие стали относятся к группе **инструментальных** (т.к. основное требование для большинства видов инструмента – именно высокая твердость). Маркировка этих сталей **У7, У8, У10, ..., У13** (ГОСТ 1435–90), где цифры показывают содержание углерода в десятых долях %.

**Конструкционные стали** используют для разнообразных по назначению изделий, работающих при сложных, в том числе, динамических нагрузках. Такие стали должны обладать оптимальным сочетанием прочности и ударной вязкости, поэтому, в основном, это мало – и среднеуглеродистые стали. Они подразделяются на **стали обыкновенного качества** общего назначения (марки **Ст0, Ст1, Ст2, ..., Ст6** ГОСТ 380–94) и **качественные конструкционные стали** (марки **08, 10, 15, 20, 25, ..., 40, 45, ..., 85** ГОСТ 1050–88).

Содержание углерода в сталях обыкновенного качества изменяется от  $\approx 0,1\%$  до  $0,5\%$  и в среднем возрастает с увеличением

цифры в марке (соответственно изменяются свойства согласно рис. 16). Из этих сталей обычно изготавливают малонагруженные изделия, не подвергаемые упрочняющей термической обработке.

В марках качественных конструкционных сталей цифры показывают содержание углерода в сотых долях % (например, в стали 45...0,45 %С). Эти стали применяют для ответственных изделий, которые для получения оптимальных механических свойств подвергаются упрочняющей термической обработке, состоящий из закалки и отпуска.

### **Структура и свойства чугунов**

Сплавы, содержащие  $C > 2,14$  % (правее т. Е на диаграмме «Железо-цементит», см. рис. 14), называются чугунами.

Чугуны, кристаллизующиеся в соответствии с диаграммой Fe-Ц, называются **белыми** (из-за светлого оттенка излома, обусловленного большим количеством цементита в структуре). Из диаграммы Fe-Ц следует, что затвердевание этих сплавов происходит при  $T \leq 1147$  °С непосредственно ниже линии *солидус* ECF в результате превращения



**Такое превращение** (затвердевание жидкой фазы в смесь двух твердых при фиксированном составе фаз и постоянной температуре) **называется эвтектическим**, а **образующаяся смесь кристаллов – эвтектикой** (греч. – «легко плавящаяся» – из диаграммы Fe-Ц видно, что чугуны имеют наименьшую температуру плавления среди железоуглеродистых сплавов).

Эвтектика в белых чугунах называется **ледебуритом** (по фамилии исследователя – Ледебура). В момент образования она состоит из аустенита и цементита, но при  $T \leq 727$ °С аустенит превращается в перлит (напомним, что PSK – линия эвтектоидного – перлитного превращения). Поэтому *при нормальных температурах ледебурит (Л)* – сложная структурная составляющая; представляет собой светлую цементитную основу с темными включениями перлитных зерен.

*По структуре белые чугуны делятся на доэвтектические со структурой Л+П+Ц<sub>ц</sub>, эвтектические– Л и заэвтектические– Л+Ц<sub>ц</sub>.*

Наличие легкоплавкой эвтектики (ледебурита) в белых чугунах обеспечивает их высокие литейные свойства. Механические же

свойства этих сплавов можно оценить, экстраполировав зависимости, показанные на рис. 16, на содержание углерода  $> 2,14 \%$ .

Видно, что белые чугуны обладают очень высокой твердостью, но низкими значениями пластичности, ударной вязкости и прочности, что является следствием большого количества цементита в структуре. Поэтому *белые чугуны как конструкционные материалы не используются*. На практике в качестве дешевых литейных конструкционных материалов широко применяются **серые чугуны**.

*Принципиальное отличие структуры серых чугунов от белых в том, что углерод в них находится не в химически связанном состоянии (т.е. в виде  $Fe_3C$  – цементита), а в свободном – в виде включений графита различной формы.*

*Уровень механических свойств серых чугунов зависит от двух основных структурных факторов:*

- 1) **формы (и количества) графитных включений,**
- 2) **структуры металлической основы.**

По первому признаку эти сплавы делятся:

1) на собственно **серые чугуны (СЧ)**, в которых графит имеет форму длинных заостренных пластин. Разновидностью этих чугунов являются модифицированные СЧ, в которых пластинки графита мелкие и имеют завихренную форму;

2) **высокопрочные чугуны (ВЧ)** с шаровидным (глобулярным) графитом;

3) **ковкие чугуны (КЧ)** с хлопьевидным графитом.

Очевидно, что *механические свойства чугуна данного вида (т.е. с определенной формой графитных включений) определяются структурой металлической основы*, т.к. от феррита к перлиту увеличивается содержание углерода, соответственно растут твердость и прочность, падают пластичность и ударная вязкость (рис. 16).

*Свойства чугунов с данной структурой металлической основы зависят от формы графитных включений.* По сути, любые серые чугуны представляют собой углеродистые доэвтектоидные (Ф+П), эвтектоидные (П) стали или техническое железо (Ф) с включениями графита. Очевидно, что графит уменьшает прочность и пластичность металлической основы. Поэтому чугуны имеют более низкие механические свойства по сравнению с углеродистыми ста-

лями. Однако от сталей они отличаются более высокими литейными свойствами, низкой стоимостью, нечувствительностью к дефектам поверхности, демпфирующими и антифрикционными свойствами.

*На практике все ответственные стальные изделия подвергаются специальной упрочняющей термической обработке, в результате которой качественный характер зависимостей механических свойств от содержания углерода (рис. 16) сохраняется, но количественные показатели вследствие структурных превращений существенно изменяются.*

#### **4. Упрочняющая термическая обработка сталей (влияние структурных превращений при закалке и отпуске на свойства стали)**

*Свойства стали с данным содержанием углерода могут изменяться в широких пределах в результате термической обработки.*

Для получения оптимальных механических свойств все ответственные стальные изделия из качественных углеродистых и, тем более, легированных сталей обязательно подвергаются **упрочняющей термической обработке**, состоящей из закалки и отпуска.

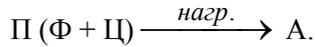
##### ***Закалка (превращения в стали при охлаждении)***

**Закалка** – это нагрев стали до аустенитного состояния, выдержка и последующее ускоренное охлаждение со скоростью  $V \geq V_{кр}$  ( $V_{кр}$  – «критическая скорость закалки», см. ниже) с целью максимального повышения твердости и прочности. Подчеркнем сразу, что эффективное упрочнение стали при закалке обусловлено явлением полиморфизма этих сплавов.

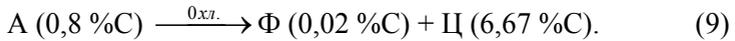
Обсудим последовательность структурных превращений, происходящих в стали в процессе закалки, на примере эвтектоидной стали (0,8 %С). Для удобства обсуждения «стальной угол» диаграммы «Железо – цементит».

Исходная структура эвтектоидной стали - перлит- эвтектоидная смесь кристаллов феррита и цементита (рис. 15), в сокращенной записи – П(Ф+Ц).

При нагреве сталей под закалку в них происходят превращения. Так эвтектоидная сталь при  $t > A_1$  (727 °С) приобретает однофазную аустенитную структуру, т.е.



Выше отмечалось, что при последующем охлаждении аустенит при  $t \leq A_1$ , становится неустойчивым и распадается на смесь феррита и цементита, т.е.



Время начала и конца этого распада дается «**диаграммой изотермического превращения переохлажденного аустенита** («С – диаграмма»).

Левая С – образная линия характеризует время ( $\tau$ ) начала, а правая – конца распада аустенита на смесь Ф и Ц в зависимости от температуры изотермической выдержки, обозначенные буквами «н» и «к» соответственно.

Слева от линии «н» аустенит может какое-то время сохраняться в переохлажденном (относительно критической температуры  $A_1=727^\circ\text{C}$ ), а значит неравновесном, неустойчивом состоянии. Правее линии «к» распад аустенита завершается.

Степень дисперсности (величина, обратная размеру зерна) образующейся в результате ферритоцементитной смеси (Ф+Ц) зависит от конкретной температуры  $t$ , при которой происходит распад переохлажденного аустенита, или, что то же – *от степени его переохлаждения*

$$\Delta t = A_1 - t. \quad (10)$$

С понижением температуры распада (увеличением  $\Delta t$ ) быстро уменьшается скорость диффузионного роста образующихся кристаллов, т.е. происходит измельчение ферритоцементитной смеси, соответственно возрастает ее твердость.

В связи с этим принято различать *три структуры перлитного типа: перлит, сорбит, троостит*. Они имеют одинаковое строение (это смеси пластинок Ф и Ц), но отличаются степенью дисперсности, а значит и твердостью.

Все эти структуры получаются в результате *превращения перлитного типа*. Его протекание вызвано полиморфизмом железа и сплавов на его основе – сталей. *Характерной чертой этого превращения яв-*

ляется его диффузионный механизм (благодаря высоким температурам  $\approx 500 \dots 720^\circ\text{C}$  и достаточно длительным временным выдержкам). Это видно из реакции, где несовпадение химического состава участвующих фаз означает активную диффузию атомов углерода.

На практике различные типы перлитных структур получают обычно не при изотермических выдержках, а при непрерывном охлаждении стали из аустенитного состояния с различными скоростями. Степень дисперсности образующихся при этом ферритоцементитных смесей (и соответственно, тип перлитной структуры) зависит от величины скорости охлаждения  $V$ . Эта зависимость отчетливо проявляется, когда на  $C - \tau$  диаграмму наносят кривые охлаждения  $t=f(\tau)$ , наклон которых характеризует величину скорости охлаждения, так как

$$V = \frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \operatorname{tg} \alpha \quad (11)$$

Очевидно, что на рис. 17  $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$ . Из рисунка следует, что чем больше скорость охлаждения, тем при более низкой температуре происходит распад переохлажденного аустенита, тем более дисперсной и твердой получается перлитная структура: при скорости  $V_1$  – перлит,  $V_2$  – сорбит,  $V_3$  – троостит.

Видно также, что при скорости  $V \geq V_4$  аустенит не успевает превратиться ни в одну из перлитных структур, так как при таком быстром охлаждении «проскакивает» область высоких температур, в результате его диффузионный распад на феррит и цементит становится невозможным.

*Минимальная скорость охлаждения, при которой не происходит распада аустенита на смесь  $\Phi + \text{Ц}$ , называется критической скоростью закалки  $V_{\text{кр}}$  (она характеризуется наклоном линии  $V$ , касательной к кривой начала распада  $A$  на  $\Phi$  и  $\text{Ц}$ , т.е.  $V_{\text{кр}} = V_4$ ).*

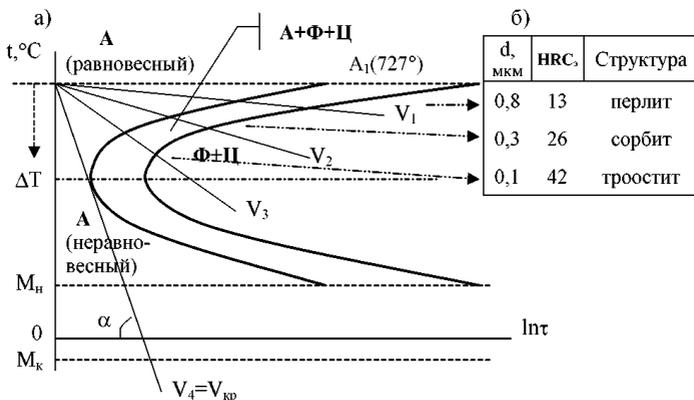


Рис. 17. Диаграмма изотермического превращения переохлаждения аустенита (эвтектоидная сталь) с нанесенными на нее кривыми охлаждения (а) и усредненные характеристики перлитных структур (б);  $d$  – «межпластичное расстояние» - средняя суммарная толщина соседних пластинок феррита и цемента

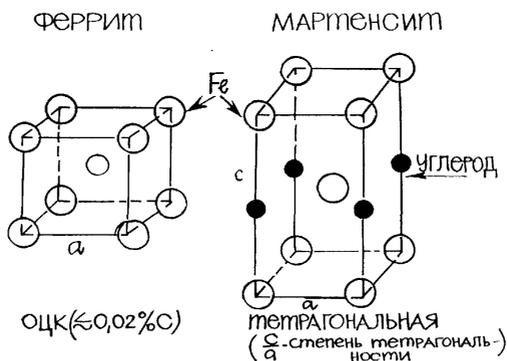


Рис. 18. Кристаллические решетки феррита и мартенсита

Таким образом, при охлаждении стали со скоростью  $V \geq V_{кр}$  аустенит переохлаждается до таких низких температур, где диффузия атомов практически отсутствует. Если бы стали не обладали полиморфизмом, закалка приводила бы к сохранению аустенитной структуры.

Наличие полиморфизма вызывает  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение аустенита, но, в отличие от перлитного превращения, **бездиффузионным мартен-**

**ситным путем** при охлаждении в интервале  $M_n \dots M_k$  (температуры начала и конца мартенситного превращения соответственно, рис. 17).

Равновесная  $\alpha$  - фаза в сталях – это феррит – твердый раствор углерода в  $\alpha$  - железе, содержащий  $C \leq 0,02$  %. Из-за бездиффузионного характера мартенситного превращения содержание углерода в исходной  $\gamma$  - фазе (аустените) и конечной  $\alpha$  - фазе должно быть одинаково. Но, так как в аустените углерода гораздо больше (0,8 %), в результате закалки  $\alpha$  – фаза оказывается пересыщенной углеродом; она называется **мартенситом**.

Таким образом, **мартенсит, как и феррит – твердый раствор углерода в  $\alpha$ -Fe, но в отличие от феррита он пересыщен углеродом.**

Вследствие этого пересыщения *решетка мартенсита становится тетрагональной* (в отличие от ОЦК решетки феррита – рис. 18), она характеризуется двумя параметрами  $c$  и  $a$ ; очевидно, что **степень тетрагональности  $c/a > 1$** .

Образование мартенсита с тетрагональной решеткой приводит к появлению сильных внутренних напряжений, резкому повышению плотности дислокаций и степени дисперсности структуры, соответственно значительно возрастает твердость и прочность. Очевидно, что действие перечисленных упрочняющих факторов тем эффективнее, чем больше углерода в стали, так как возрастает степень пересыщения решетки мартенсита углеродом, увеличиваются степень тетрагональности и внутренние напряжения. Поэтому *твердость закаленной стали (мартенсита) растет с увеличением содержания в ней углерода* – рис. 19.

На этом же рисунке для сравнения приведены твердости перлитных структур в эвтектоидной стали, а также зависимость твердости сталей в отожженном состоянии от содержания углерода (рис. 16).

Из рис. 19 отчетливо видно, что:

1) степень упрочнения стали в результате закалки (характеризуется разницей между двумя зависимостями  $HRC_3 = f(C)$ ) возрастает пропорционально содержанию в ней углерода;

2) мартенсит – самая твердая из всех структур, которые могут быть получены из переохлажденного аустенита.

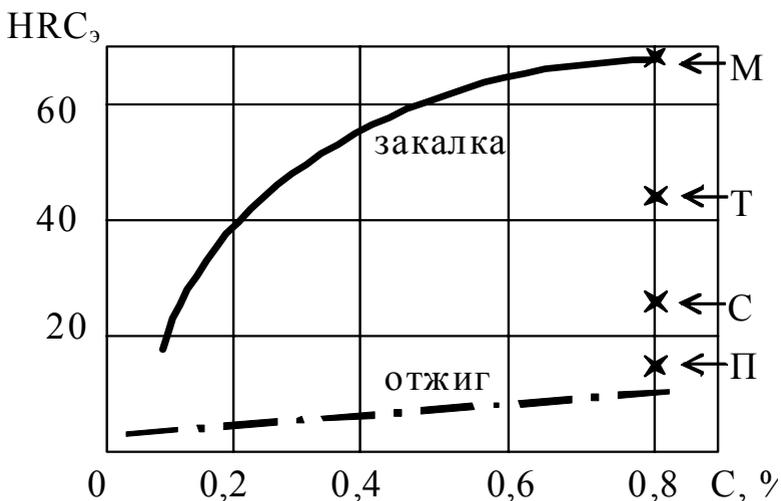


Рис. 19. Влияние содержания углерода на твердость стали в закаленном и отожженном состоянии. Для сравнения наряду с твердостью мартенсита (М) приведены значения твердости перлита (П), сорбита (С), троостита (Т) эвтектидной стали

Это основное достоинство мартенсита (закаленной стали), но, к сожалению, он обладает повышенной хрупкостью, которая растет с увеличением содержания углерода в стали. Поэтому *после закалки на мартенсит стали необходимо подвергать отпуску, главная цель которого повышение пластичности и ударной вязкости закаленной стали.*

### 5. Отпуск (превращения в закаленной стали при нагреве)

Мартенсит, получаемый в результате закалки неравновесная, неустойчивая структура, поэтому он может длительно сохраняться лишь при достаточно низких температурах ( $\leq 100 \dots 150^\circ\text{C}$ ), где диффузия атомов незначительна.

При нагреве закаленной стали в докритическом интервале температур ( $t < A_1 = 727^\circ\text{C}$ ) в ней развиваются диффузионные процессы, постепенно приближающие структуру и свойства стали к равновесному состоянию – это **процессы отпуска.**

Структура и свойства стали при отпуске зависят от температуры нагрева. Соответственно различают **три вида отпуска: низкий** ( $\approx 200^\circ\text{C}$ ), **средний** ( $\approx 400^\circ\text{C}$ ), **высокий** ( $\approx 600^\circ\text{C}$ ).

**При низком отпуске** существенных изменений в структуре еще не происходит (структура - **мартенсит отпуска**), лишь уменьшается степень тетрагональности, частично снимаются внутренние напряжения, незначительно понижается твердость и повышается пластичность. Низкий отпуск применяют в тех случаях, когда от изделий в первую очередь требуется высокая твердость (режущий, измерительный и холодноштамповый инструмент, детали шариковых подшипников, шестерни после цементации и т.п.).

**При среднем отпуске** избыточный углерод в виде мельчайших частиц цементита практически полностью покидает решетку мартенсита. Решетка мартенсита обезуглероживается и превращается в ОЦК решетку феррита (степень тетрагональности  $c/a = 1$ ).

В результате образуется феррито – цементитная смесь, называемая **трооститом отпуска**. Твердость и прочность заметно понижаются, повышается ударная вязкость. Такая структура при твердости HRC<sub>3</sub> 35...45 обеспечивает наибольшую упругость стали, поэтому средний отпуск обычно применяют для пружин, рессор, мембран, ударного инструмента.

**При высоком отпуске** изменений в фазовом составе (Ф+Ц) уже не происходит (см. диаграмму Fe–Ц), но развиваются диффузионные процессы укрупнения и округления частиц цементита, что сопровождается дальнейшим снижением прочности и твердости, повышением пластичности и ударной вязкости. Соответствующая структура называется **сорбитом отпуска**.

Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется **улучшением**. Она применяется для ответственных изделий (валов, рычагов, зубчатых колес и т.п.), изготавливаемых из среднеуглеродистых (0,3...0,5 % С) **улучшаемых сталей**, так как обеспечивает в этом случае наилучший комплекс механических свойств – максимальную ударную вязкость при достаточно высокой прочности. Высокие механические свойства сорбита отпуска обусловлены малыми размерами и округлой формой частиц цементита (в отличие от сорбита закалки, в

котором острые концы пластинок цементита играют роль концентраторов напряжений, способствующих зарождению микротрещин).

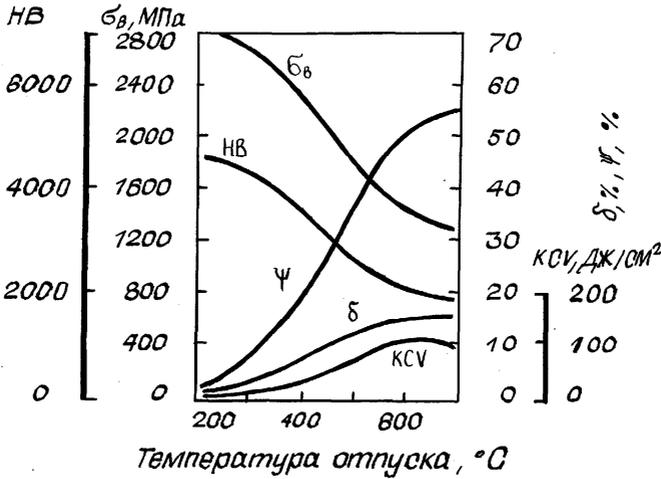


Рис. 20. Зависимости механических свойств закаленной стали от температуры отпуска (сталь 45)

На рис. 20 в качестве примера показано изменение механических свойств стали 45 в зависимости от температуры отпуска.

Заметим, что с повышением температуры отпуска свойства приближаются к значениям, соответствующим отожженному (равновесному) состоянию, но не достигают их даже при высоком отпуске (в частности, сохраняется более высокая твердость и прочность).

## 6. Влияние легирования на структуру и свойства сталей

Оптимальный комплекс механических свойств достигается завершающей термической обработкой стальных изделий, состоящей из закалки и отпуска. Высокий уровень механических свойств углеродистых сталей в термически упрочненном состоянии позволяет использовать их для широкого круга изделий различного назначения (деталей и инструмента). Эти стали технологичны (хорошо свариваются и обраба-

тываются давлением и резанием) и экономичны, поэтому на их долю приходится около 80 % общего объема производства сталей.

Однако *существенным недостатком углеродистых сталей является их невысокая прокаливаемость* ( $\leq 12$  мм) – способность приобретать мартенситную структуру при закалке на определенную глубину изделия. Это ограничивает размеры (сечение) изделий, упрочняемых термической обработкой.

Этот недостаток устраняется легированием стали. Сталь, в которую специально, в определенных концентрациях вводятся примеси – легирующие элементы – **называется легированной**.

Введение даже небольшого количества легирующих элементов влияет на температуры и кинетику (скорость) фазовых превращений и, соответственно, на режимы термической обработки сталей. Значительное легирование специальными элементами может привести к качественному изменению структуры и свойств сталей (появлению особых физико-механических свойств).

### **Классификация легированных сталей по структуре. Влияние легирующих элементов на полиморфизм железа**

Структура и свойства легированных сталей зависят не только от содержания углерода, но также от индивидуальных особенностей и количества легирующих элементов.

В углеродистых сталях температуры полиморфных превращений (критические точки G и N в железе, см. рис. 14; в сталях их принято обозначать A<sub>3</sub> и A<sub>4</sub> соответственно) зависят от содержания углерода в соответствии с диаграммой «Железо–цементит».

Легирующие элементы, растворяясь в  $\alpha$  и  $\gamma$ -модификациях Fe, влияют на положение критических точек (A<sub>3</sub> и A<sub>4</sub>), что в свою очередь определяет область существования  $\alpha$ -фазы (феррита) и  $\gamma$ -фазы (аустенита) – рис. 21.

Видно, что элементы I группы повышают A<sub>4</sub> и понижают A<sub>3</sub>, соответственно сужая область  $\alpha$ -фазы и расширяя  $\gamma$ -область (рис. 21,а). Из таких элементов наибольшее практическое значение имеют Ni и Mn (подобным образом влияет и углерод – см. диаграмму «Железо–цементит», рис. 14).

Элементы II группы снижают  $A_4$ , повышают  $A_3$ , в результате расширяется область  $\alpha$ -фазы (рис. 21,б). В основном это элементы, имеющие ОЦК решетку подобно  $\alpha$ -Fe (Cr, W, V, Mo, Ti и др.).

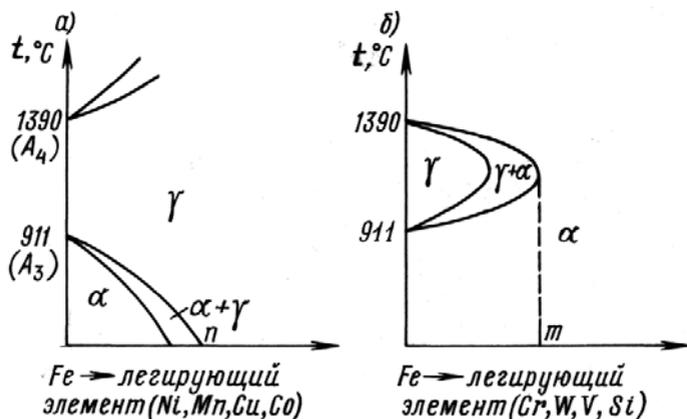


Рис. 21. Влияние легирующих элементов (л.э.) на полиморфизм железа и структуру легированных сталей

Видно, что, если содержание легирующих элементов превышает концентрацию  $x$ , то стали при любой температуре имеют аустенитную (рис. 21,а) либо ферритную (рис. 21,б) структуры. Обычно это стали, которые в результате сильного легирования приобретают особые свойства, например, коррозионностойкие стали аустенитного и ферритного классов. Очевидно, что такие стали при закалке не претерпевают мартенситного ( $\gamma \rightarrow \alpha$ ) превращения и значит, не упрочняются термической обработкой.

В легированных сталях помимо этих трех классов возможны также стали с **аустенитной** и **ферритной** структурами. Как отмечалось, такое принципиальное изменение структуры качественно изменяет свойства высоколегированных сталей.

**Влияние легирующих элементов на кинетику распада аустенита и температуру мартенситного превращения (классификация сталей по структуре нормализации)**

Остановимся на двух важных закономерностях, проявляющихся при легировании сталей.

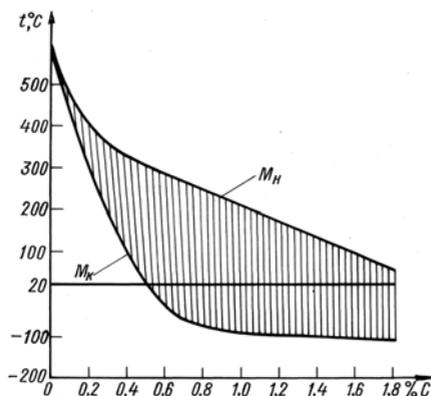


Рис. 22. Влияние содержания углерода на температуры начала ( $M_n$ ) и конца ( $M_k$ ) мартенситного превращения

1. Очевидно, что по сравнению с углеродистыми сталями диффузионная подвижность атомов в легированных сталях подавлена и в тем большей степени, чем выше концентрация легирующих элементов.

2. Все легирующие элементы (кроме Co и Al), подобно углероду (рис. 22), снижают (в различной степени) температуры начала ( $M_n$ ) и конца ( $M_k$ ) мартенситного превращения. Скорость охлаждения образцов стали из аустенитного состояния на спокойном воздухе называется **нормализацией**.

При относительно небольшом количестве легирующих элементов охлаждение на воздухе приводит к распаду аустенита на феррито-карбидные смеси (перлитному превращению; такие стали относят к **перлитному классу** (их большинство, так как из-за небольшого легирования они наиболее дешевы). При повышенном содержании легирующих элементов  $V_{\text{охл.}} \geq V_{\text{кр.}}$ , а так как  $M_n > 20$  °С, нормализованная сталь при комнатной температуре приобретает мартенситную структуру – это **стали мартенситного класса**. При большом содержании легирующих элементов (особенно Ni, Mn)  $M_n$  сдвигается в область отрицательных тем-

ператур, поэтому после нормализации сталь сохраняет аустенитную структуру (аустенитный класс).

### **Влияние легирующих элементов на критическую скорость заковки и прокаливаемость стали**

Величину прокаливаемости обычно оценивают критическим диаметром ( $D_{кр}$ ) – *максимальным диаметром образца, приобретающим мартенситную структуру по всему сечению при заковке в данном охладителе.*

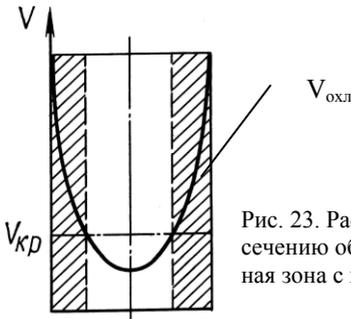


Рис. 23. Распределение скорости охлаждения ( $V_{охл}$ ) по сечению образца при заковке (заштрихована закаленная с мартенситной структурой)

Поскольку основное требование заковки на мартенсит  $V_{охл} \geq V_{кр}$ , то *прокаливаемость зависит от соотношения скорости охлаждения  $V_{охл}$  и критической скорости заковки  $V_{кр}$ , величина которой определяется химическим составом стали.*

Очевидно, что скорость охлаждения образца (изделия) уменьшается от поверхности к сердцевине (рис. 23).

Если в сердцевине образца  $V_{охл} < V_{кр}$ , это приводит к несквозной заковке. При несквозной прокаливаемости в поверхностном слое образуются мартенсит, в сердцевине (где  $V_{охл} < V_{кр}$ ) пластинчатые структуры перлитного типа (например, сорбит заковки). В результате возникает неоднородность механических свойств по сечению детали, которая сохраняется и после отпуска. Например, после высокого отпуска в поверхностном слое получится сорбит отпуска (зернистый сорбит), а структура сердцевины не изменится, и будет иметь пониженные механические свойства. Например, ударная вязкость улучшенной (заковка + высокий отпуск) стали 45 с диаметром образца 10 мм (сквозная заковка) составляет  $KCU = 1 \text{ МДж/м}^2$ , а при  $\varnothing = 100 \text{ мм}$  (несквозная прокаливаемость)  $KCU = 0,5 \text{ МДж/м}^2$ .

Поэтому для ответственных изделий должны применяться стали со сквозной прокаливаемостью.

Из рис. 23 очевидно, что **основной путь повышения прокаливаемости – это уменьшение  $V_{кр}$** . В предыдущем разделе говорилось о том, что легирование приводит к смещению линий С- диаграммы вправо, а это означает уменьшение  $V_{кр}$  (напомним, что величина  $V_{кр}$  определяется наклоном касательной к кривой начала распада аустенита на феррито-карбидные смеси).

Помимо повышения прокаливаемости легирование играет и еще одну важную положительную роль, так как, снижая  $V_{кр}$ , позволяет производить более «мягкую» закалку по сравнению с углеродистыми (нелегированными) сталями. Если для получения мартенсита в углеродистых сталях их необходимо охлаждать очень быстро в воде ( $V_{охл} \approx 600^\circ\text{C}/\text{с}$ ), то в легированных тот же результат может быть достигнут при более медленном охлаждении в масле ( $V_{охл} \approx 150^\circ\text{C}/\text{с}$ ) или даже (для некоторых высоколегированных, например, быстрорежущих сталей) на воздухе ( $V_{охл} \approx 3 \dots 30^\circ\text{C}/\text{с}$ ).

Если в стали данного химического состава температура  $M_k$  опускается ниже комнатной, то при закалке (закалочная среда при  $t = 20^\circ\text{C}$ ) часть аустенита сохраняется, не превращаясь в мартенсит, - это «**остаточный аустенит**».

Согласно рис. 22 он появляется в структуре закаленных углеродистых сталей, содержащих  $C \geq 0,5\%$  и его количество возрастает с увеличением содержания углерода (пропорционально заштрихованному на рис. 22 интервалу  $\Delta t = 20^\circ\text{C} - M_k$ ).

Поскольку легирующие элементы дополнительно снижают  $M_n$  и  $M_k$  (особенно эффективно Mn, Cr, Ni) то в закаленных легированных сталях сохраняется много остаточного аустенита. Остаточный аустенит ухудшает механические и эксплуатационные свойства изделий, поэтому для его устранения применяют «**обработку холодом**» - охлаждение изделий сразу после закалки до температур, возможно близких к  $M_k$ . Для этого используют, например, жидкий аммиак ( $-33^\circ\text{C}$ ), жидкий азот ( $-196^\circ\text{C}$ ) и другие охлаждающие среды.

Обработку холодом используют главным образом для деталей типа шестерен, режущих и измерительных инструментов, изготавливаемых из высоколегированных сталей.

Заметим, что в некоторых случаях остаточный аустенит играет положительную роль, уменьшая деформацию изделий при закалке (например, длинномерного режущего и измерительного инструмента).

*Классификация по назначению и маркировка легированных сталей*

Высокоуглеродистые ( $C \geq 0,7 \%$ ) легированные стали – инструментальные, стали с меньшим содержанием углерода – конструкционные.

Наиболее многочисленные группы конструкционных сталей – это **цементуемые** ( $C 0,10 \dots 0,25 \%$ ) и **улучшаемые** ( $C 0,30 \dots 0,50 \%$ ).

**Цементуемые** стали применяются в основном для деталей типа шестерен, которые после цементации (диффузионного насыщения поверхности изделия углеродом), закалки и низкого отпуска приобретают высокую твердость и износостойкость наружного слоя (структуру высокоуглеродистого мартенсита) и сохраняют хорошую вязкость сердцевины, препятствующую хрупкому разрушению зубьев шестерни.

**Улучшаемые** стали используются для ответственных нагруженных изделий, работающих при динамических нагрузках, которые для получения оптимального сочетания прочности и ударной вязкости подвергают **улучшению** – *закалке и высокому отпуску*.

В марках конструкционных сталей число в начале марки указывает содержание углерода в сотых долях процента (как в качественных углеродистых конструкционных сталях). Далее следуют легирующие элементы, которые обозначаются русскими буквами, обычно – первыми в названии элемента. Например, **Cr** буквой X, **Ni** – H, **Ti** – T, **V** – Ф, **Co** – K, **Mo** – M, **W** – B, но есть и исключения: **B** – P, **Al** – Ю, **Si** – C, **Mn** – Г; буква **A** в конце марки означает сталь **высокого качества** (в таких сталях ограничено количество вредных примесей S и P  $\leq 0,025 \%$  каждого из этих элементов).

*Цифры после каждой буквы указывают содержание данного элемента в процентах, если цифра отсутствует, то среднее количество этого элемента – 1 %.* Например, в стали 18X2H4MA – в среднем 0,18 % C; 2 % Cr, 4 % Ni, 1 % Mo,  $\leq 0,025 \%$  S и  $\leq 0,025 \%$  P.

Механические свойства цементуемых сталей даны после закалки и низкого отпуска, улучшаемых – после закалки и высокого отпуска (т.е. в улучшенном состоянии).

Помимо цементуемых и улучшаемых к конструкционным принадлежат также:

1) **строительные** (низколегированные) **стали**, содержащие до 0,2 % С и небольшое количество недорогих легирующих элементов (обычно до 2...3 % Мn и Si), 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 17ГС и др. Они используются в машиностроении, строительстве, магистральных газо – и нефтепроводах и т. п.; обладают хорошей свариваемостью, малой склонностью к хрупким разрушениям, хладостойкостью. Изделия из этих сталей обычно не подвергаются термической обработке.

2) **рессорно-пружинные стали** содержат 0,5...0,7 % С и небольшое количество легирующих элементов (Mn, Si, V); например, 50С2, 60СГ, 60С2ХФА, 70С3А и др. После закалки и среднего отпуска (на структуру троостит отпуска) приобретают высокий предел упругости и предел текучести  $\sigma_{0,2}$  до 1200...1700 МПа; применяются в транспортном и станкостроении для рессор, пружин, различных упругих элементов.

3) **подшипниковые стали** содержат 0,95...1,05 % С, 0,4...1,7 % Cr, 1,7 % Мn, 0,85 % Si; например, ШХ6, ШХ15, ШХ15ГС и др. Буква Ш обозначает шарикоподшипниковую сталь, цифры – содержание Cr в десятых долях процента.

После закалки и низкого отпуска эти стали имеют структуру мартенсита с включениями мелких вторичных карбидов, обладают высокой твердостью (62...64 HRC<sub>3</sub>) и износостойкостью; применяются для деталей подшипников качения.

Основная цель легирования этих сталей – повышение прокаливаемости. Чем больше легирующих элементов, тем больше критический диаметр закаливаемых деталей, тем более крупный подшипник может быть изготовлен из данной стали.

Помимо рассмотренных выше наиболее распространенных групп сталей к конструкционным относятся также **высокопрочные, износостойкие, коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные стали**, а также **стали** (и железосодержащие сплавы) **с особыми физическими свойствами**.

Теперь – несколько слов о *классификации и маркировке инструментальных легированных сталей*. Выше уже отмечалось, что к инструментальным углеродистым и легированным сталям от-

носятся в основном стали с большим содержанием углерода ( $\geq 0,7\%C$ ), поскольку после закалки и низкого отпуска они должны обладать высокой твердостью (60...65 HRC<sub>3</sub>) и износостойкостью. Это **стали для режущего и измерительного инструмента** (ГОСТ 5950–2000) большинство из них содержит небольшое количество легирующих элементов (в сталях повышенной прокаливаемости до  $\approx 5\%$ ). *Цифры в начале марки этих сталей показывают содержание углерода в десятых долях процента*, например, в марках 9XC, 11XF, 13X – 0,9; 1,1 и 1,3 % C соответственно. Если среднее содержание углерода  $\approx 1\%$ , то цифра в начале марки обычно отсутствует X, XBГ, XB4.

Наилучшими свойствами в группе сталей для режущего инструмента обладают **быстрорежущие стали** (ГОСТ 19265–73). В результате сильного легирования карбидосодержащими элементами – (W, Mo, Cr, V) они приобретают высокую **теплостойкость – способность сохранять высокую твердость** (до 58 HRC<sub>3</sub>) и **износостойкость при длительном нагреве** до  $\approx 620\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В марках этих сталей (P18, P6M3, P6M5, P9K5,...) после буквы P (от англ. rapid – быстрый, скорый) число показывает содержание основного легирующего элемента W в процентах.

В результате сильного легирования в закаленных быстрорежущих сталях остается много (до 30 %) остаточного аустенита, поэтому для его устранения используют обработку холодом или трехкратный отпуск при  $t \approx 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Твердость быстрорежущих сталей после такой термообработки 63...65 HRC<sub>3</sub>. Инструмент из этих сталей используют для обработки на высоких скоростях резания, а также труднообрабатываемых материалов (например, высоколегированных коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов с аустенитной структурой).

Помимо сталей для режущего и измерительного инструмента по назначению различают штамповые стали для **холодного и горячего деформирования металлов**.

Для **холодного деформирования** в первую очередь требуется высокая твердость инструмента, поэтому используются в основном те же стали, что и для режущего инструмента (ГОСТ 5950-2000) с содержанием углерода  $\approx 1\%$  (X, XBСГ, XBВФ, X12M), имеющие твердость 60...63 HRC<sub>3</sub> после закалки и низкого отпуска. В тех случаях, когда от инструмента требуется повышенная вязкость (удар-

ные нагрузки) используют стали с меньшим (0,5...0,7 %) содержанием углерода (6ХВ2С, 7ХГ2ВМ).

В гораздо более тяжелых условиях работают стали **штампов горячей обработки давлением**. Их структуры, механические и эксплуатационные свойства не должны изменяться (ухудшаться) при нагревании до 400...600 °С. Помимо тепло – и окалинотойкости эти стали должны обладать **разгаростойкостью** – *устойчивостью к образованию поверхностных («разгарных») трещин*, стимулируемых многократными циклами нагрев ↔ охлаждение. Комплекс этих свойств достигается применением сталей с пониженным содержанием углерода (0,3...0,6 %) – 3Х2В8Ф, 4Х5В2ФС, 5ХНМ, обрабатываемым на структуру троостита или сорбита отпуска (температура отпуска ≈ 500...630 °С) и твердость 42...50 HRC,

## 7. Порошковые материалы

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

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

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

При формовании заготовок из порошков определенного химического состава прессованием им придают форму и размеры го-

товых деталей, после чего направляют на спекание. При спекании непрочные прессованные заготовки превращаются в прочное спеченное тело со свойствами, приближающимися к свойствам беспористого компактного материала. Температура спекания деталей из конструкционных материалов на основе железа с добавками графита, никеля и других компонентов составляет 1100-1200 °С. Температура спекания изделий антифрикционного назначения на основе железа составляет 1000-1050 °С, на основе бронзы – 850-950 °С. Спекание проводят в течение 0,5-1,5 ч в нагревательных печах, как правило, в защитной атмосфере или в вакууме для предотвращения окисления частиц порошка. Для получения более высоких характеристик механических и служебных свойств материалов и повышения точности размеров после формования и спекания дополнительно производят горячее прессование, штамповку, прокатку.

### **Конструкционные материалы**

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

Порошковые стали по механическим свойствам могут не уступать литым и кованым сталям соответствующего состава. Так мартенситностареющие стали, благодаря возможности повышения содержания титана до 2-3 % имеют  $\sigma_b$  до 2000 МПа при  $KCU = 30-40$  Дж/см<sup>2</sup>.

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

Перспективно использование порошков титана и его сплавов для изготовления тяжело нагруженных деталей. Высокие механиче-

ские свойства порошковых изделий на основе титана ( $\sigma_{\text{в}} = 650-900$  МПа,  $\delta = 8-16\%$ ) позволили применить их для изготовления шатунов автомобильных двигателей.

### **Антифрикционные материалы**

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

Антифрикционные порошковые материалы характеризуются низким коэффициентом трения, хорошей износостойкостью, способностью легко прирабатываться к валу и выдерживать значительные нагрузки. Они обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными антифрикционными материалами. Их износостойкость в несколько раз выше, чем у бронз и баббитов. Они работают при более высоких скоростях и давлениях. Наличие в структуре пористости, регулируемой в широких пределах (до  $35\%$ ), позволяет их предварительно пропитывать смазочными маслами. Поэтому пористые подшипники могут работать длительное время без дополнительной смазки. Эффект самосмазываемости в пропитанных маслом пористых подшипниках без подвода смазки извне может сохраняться в течение 3000-5000 ч.

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

## **Фрикционные материалы**

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

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

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

## **Пористые фильтрующие элементы**

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

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

## **Инструментальные порошковые стали**

Получение порошков быстрорежущих сталей осуществляется методами газового и водного распыления. Основные технологические операции получения порошковых заготовок инструмента методом газового распыления производятся в следующей последовательности (процесс ASEA-Stora): 1) распыление расплава азотом; 2) рассев фракций; 3) загрузка в контейнер; 4) вакуумирование, заполнение азотом и заварка контейнера; 5) холодное гидростатическое прессование (ХИП) контейнера; 6) нагрев контейнера; 7) горячее изостатическое прессование (ГИП) контейнера; 8) пластическое деформирование заготовки; 9) изготовление окончательного сорта; 10) передача прутков на изготовление инструмента. Схема процесса приведена на рис. 24.

Недостаток быстрорежущих сталей обычного передела заключается в неравномерном распределении карбидов. В порошковых сталях карбидной ликвации нет. Порошковая металлургия обеспечивает снижение потерь материала, уменьшение энергозатрат, а также необходимое изменение химического состава. За счет измельчения структуры и более равномерного распределения карбидов износостойкость порошковой быстрорежущей стали выше, чем обычной, в 1,5-3 раза.

Как правило, при производстве порошковой быстрорежущей стали используются порошки с размером частиц менее 600 мкм. Температура спекания зависит от содержания углерода. Для стали с  $C = 1\%$  она составляет 1240 °С, при увеличении содержания углерода до  $C = 1,6\%$  - 1200 °С.

Порошковую быстрорежущую сталь подвергают термической обработке. Режимы ее те же, что и обработка стали обычного передела: отжиг, закалка и трехкратный отпуск. Температура нагрева при закалке порошковых сталей несколько ниже.

Порошковая металлургия обеспечивает мелкозернистую структуру изделий, повышает их прочность и вязкость, а также износостойкость (табл.1).

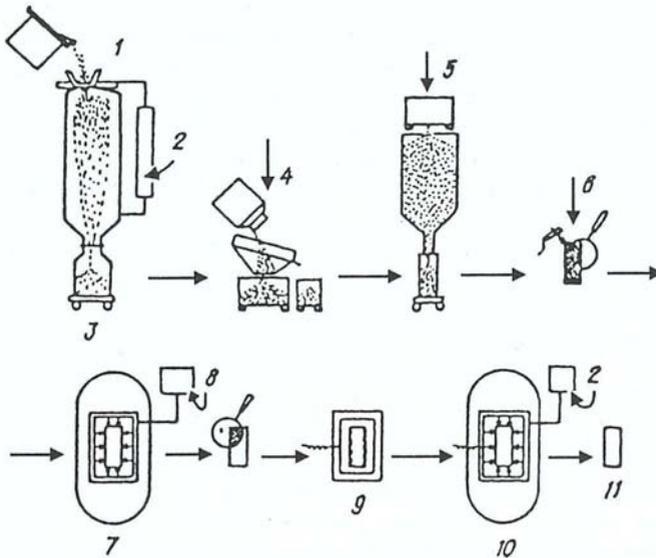


Рис. 24. Схема способа «ASEA-Stora»; 1 – заливка расплава; 2 – подача газа; 3 – распыление; 4 – рассев; 5 – заполнение контейнера порошком; 6 – заварка верхней крышки контейнера и контроль герметичности; 7 – ХИП; 8 – контроль герметичности; 9 – предварительный нагрев; 10 – ГИП; 11 – прессование заготовок

Таблица 1

**Свойства порошковой быстрорежущей стали 10P6M5K5**

Способ изготовления	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Массовая доля С, %	Номер аустенитного зерна	Вторичная твердость HRC <sub>3</sub>	HRC <sub>3</sub> после отпуска 4 ч при T, °C		$\sigma_{изг}$ , МПа	КС, кДж/м <sup>2</sup>
					620	630		
ГИП + ковка	8,175-8,180	1,0-1,1	12	67-68	59	58	3500-4000	250-300
			11	68-69	62	60	3000-3300	250-280
Горячая экструзия	8,170-8,180	1,03-1,10	11	67,5	59,5	58,5	3180-3510	170-190
			10	68,5	61	60	3150-3380	150-170
			11	68,5	63	61	2350-2650	110-150
Обычная технология	8,156-8,170	1,0-1,1	10	67-68	59	58	2500-3000	100-180
			9	68-69	62	60	2100-2500	50-120

### ***Карбидостали***

Карбидостали называют порошковые материалы, состоящие из легированной стальной матрицы и карбидов с массовой долей от 20 до 70 %. В качестве карбидной составляющей чаще всего применяют карбид титана. Матрица из легированной стали выполняет роль связки с равномерно распределенными в ней карбидами.

Приготовление порошковой смеси состоит в смешивании порошка TiC с порошком стали-связки заданного состава либо со смесью порошка железа с порошками легирующих компонентов.

В качестве металла-связки обычно используются легированные инструментальные стали марок X12M, X4H2MB, X6B3M, 5X6BM2, P6M5K5. В табл. 2 представлены характеристики свойств спеченных карбидосталей после закалки и отпуска. Карбидостали после закалки и отпуска обладают высокой твердостью и износостойкостью. По комплексу свойств они занимают промежуточное положение между твердыми сплавами и быстрорежущими сталями.

Таблица 2

**Свойства карбидосталей, спеченных в вакууме**

Марка стали	Массовая доля TiC, %	HRC <sub>Э</sub> , после				$\sigma_{изг}$	$\sigma_{сж}$
		спекания	отжига	закалки	отпуска		
X12M	50	62	47	70	70	1200	3100
	30	55	31	66	63	1500	2000
X4H2MB	50	63	54	72	71	1100	3600
	30	57	42	66	65	1400	2200
X6B3M	30	58	38	68	67	1230	3100
	10	47	15	57	56	1320	2500
5X6BM2	30	58	37	67	67	1250	2900
	10	48	18	56	55	1350	2300

### ***Антифрикционные сплавы, припой, легкоплавкие сплавы***

В машиностроении применяют как подшипники качения, так и подшипники скольжения. Подшипники скольжения применяют в виде вкладышей. Для их изготовления используют антифрикционные сплавы.

Основные требования, предъявляемые к **антифрикционным сплавам**, – низкие значения коэффициента трения со стальной поверхностью вала и высокая износостойкость подшипников. Для их удовлетворения необходимо, чтобы поверхности вала и вкладыша

были разделены пленкой смазки. Мягкая основа прирабатывается к валу и вместе с твердыми включениями образует оптимальный антифрикционный микрорельеф с пространством для удерживания смазочных материалов (так называемый принцип Шарпи).

Бронзовые вкладыши применяют для подшипников более ответственного назначения, используемых в быстроходных двигателях, при высоких удельных давлениях и значительных динамических нагрузках. Для изготовления бронзовых вкладышей применяют оловянные и свинцовые бронзы, например марок БрОС8-12 (8 % Sn, 12 % Pb), БрОС5-25 (5 % Sn, 25 % Pb), БрС30 (30 % Pb). В оловянных бронзах твердый раствор применяется в качестве мягкой основы (на шлифе он имеет вид темных овальных дендритов), а ( $\alpha+\beta$ )-эвтектоид (светлые участки) – твердых включений.

Таблица 3

**Химический состав и назначение баббитов (ГОСТ 1320-74)**

Марка баббита	Содержание, %					Условия работы и назначение
	Sn	Sb	Cu	Pb	Прочие	
Б88	Ост.	7,3-7,8	2,5-3,5	-	-	Большие скорости и высокие динамические нагрузки. Подшипники для быстроходных и среднеоборотных дизелей
Б83	-	10-12	5,5-6,5	-	-	Большие скорости и средние нагрузки. Подшипники турбин малооборотных дизелей, гребных валов
Б83С	-	9-11	5-6	1,0-1,5	-	Большие скорости и средние нагрузки. Подшипники турбин малооборотных двигателей, гребных валов
БН	9-11	5-6	1,5-2,0	1,0-1,5	0,1-0,7 Cd 0,1-0,5 Ni 0,5-0,9 As	Средние скорости и средние нагрузки. Подшипники компрессоров
Б16	15-17	15-17	1,5-2,0	Ост.	-	Моторно-осевые подшипники электровозов, путевых машин, детали паровозов.
БС6	5,5-6,5	5,5-6,5	0,1-0,3	-	-	Подшипники автотракторных двигателей

В чисто свинцовой бронзе БрС30 (70 % Cu, 30 % Pb) получают мягкую медную основу с еще более мягкими включениями свинца, так как свинец совершенно не растворим в меди. Такие антифрикционные сплавы характеризуются высокими значениями предела выносливости, пластичности и теплопроводности.

Обычно применяют баббиты на оловянной либо свинцовой основе (табл. 3). Наилучшими антифрикционными и механическими свойствами обладают оловянные баббиты.

Для более легких условий работы применяют баббиты, у которых значительная часть олова заменена свинцом. Например, баббит Б16 имеет меньшую пластичность и как более хрупкий материал не может использоваться для высоконагруженных машин.

На рис. 25, а приведена микроструктура баббита Б83. В мягкой основе  $\alpha$ -твердого раствора Sb и Cu в олове темно-серого цвета распределены более твердые светлые крупные квадратные кристаллы  $\beta$ -фазы SnSb и дисперсные включения соединения  $Cu_3Sn$ .

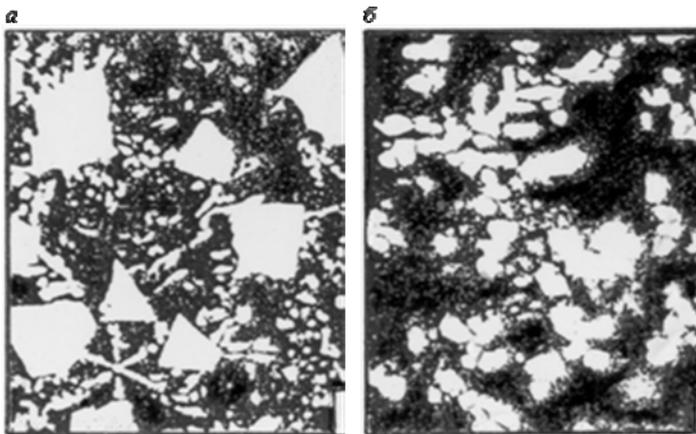


Рис. 25. Микроструктура баббитов Б83 (а); БКА (б)

Сплавы, применяемые для пайки металлов, называют *припоями*. Припои должны обладать сравнительно невысокой температурой плавления и в расплавленном состоянии хорошо смачивать паяемый материал.

Припои бывают двух видов: мягкие и твердые. Мягкие оловянные припои имеют низкую температуру плавления (200-300 °С) и обеспечивают лишь герметичность спая без высоких механических свойств ( $\sigma_{\text{в}} = 50-70$  МПа). ПОС-60, в производстве обычно называемый третником, из мягких припоев является наиболее легкоплавким. Его температура плавления составляет около 185 °С. Кроме оловянно-свинцовых мягких припоев, применяют оловянно-цинковые, содержащие 40, 60, 90 % Sn (марки ПОЦ-40, ПОЦ-60, ПОЦ-90). Они имеют более высокую прочность по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями.

Твердые припои имеют высокую температуру плавления, их применение для пайки сложнее, но спай имеет значительно более высокие механические свойства. В качестве твердых припоев используют латуни Cu-Zn или сплавы Cu-Zn-Ag – так называемые серебряные припои с температурой плавления около 800 °С. Серебряные припои маркируют буквами ПСр и цифрой, показывающей среднее содержание серебра в процентах, например ПСр-25, ПСр-50.

К *легкоплавким* относят сплавы с температурой плавления ниже температуры плавления их основной составляющей – олова (232 °С). В их состав входят металлы с низкой температурой плавления: Pb, Cd, Bi, Zn, образующие с оловом многокомпонентные эвтектики. Маркируются легкоплавкие металлы буквой Л и цифрой, показывающей температуру плавления сплава в градусах Цельсия: Л199 (Sn – 8,9 % Zn), Л130 (52 % Sn, 30 % Pb, 13 % Cd, 5 % Bi). Широко известен сплав Вуда на основе висмута Л68 (12,5 % Sn, 25,0 % Pb, 12,5 % Cd, 50,0 % Bi), названный по имени его изобретателя американского химика и археолога Б. Вуда.

## 8. Неметаллические материалы

Неметаллические материалы (пластмасса, резина, керамика, стекло, клей, лакокрасочные покрытия, древесина, ткань и др.) в качестве конструкционных материалов служат важным дополнением к металлам, в ряде случаев с успехом заменяют их, а иногда неметаллические материалы сами являются незаменимыми. Двигатели внутреннего сгорания из керамики обходятся без водяного охлаждения,

что невозможно при изготовлении их из металла; обтекатели ракет делают только из неметаллических материалов (графита, керамики). Трудно представить домашнюю утварь, аудио- и видеотехнику, компьютеры, спортивное снаряжение, автомобили и другую технику без неметаллических материалов – пластмасс, ламинатов, керамики, резины, стекла и другие.

Достоинством неметаллических материалов является сочетание требуемого уровня химических, физических и механических свойств с низкой стоимостью и высокой технологичностью при изготовлении изделий сложной конфигурации. Трудоемкость при изготовлении изделий из неметаллических материалов в 5-6 раз ниже, и они в 4-5 раз дешевле по сравнению с металлическими. В связи с этим непрерывно возрастает использование неметаллических материалов в машиностроении автомобилестроении, авиационной, пищевой, холодильной и криогенной технике и другие.

### **Материалы на основе полимеров. Характеристика полимеров. Состав и строение полимеров**

В основе неметаллических материалов лежат полимеры. *Полимерами* называются высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных маломолекулярных звеньев (*мономеров*) одинакового строения. Макромолекулы представляют собой длинные цепи из мономеров, что определяет их большую гибкость. Отдельные атомы в мономерах соединены между собой довольно прочными ковалентными химическими связями. Между макромолекулами полимеров действуют значительно более слабые физические связи. Например, мономеры этилена  $C_2H_4$  или хлорвинила  $C_2H_3Cl$  после разрыва двойных ковалентных связей и образования одинарных молекул (меров) создают цепь из мономеров, т. е. полимеры, которые называются соответственно полиэтилен и поливинилхлорид (рис. 26).

Особенностью молекул полимеров является их большая молекулярная масса ( $M \geq 5 \cdot 10^3$ ). Соединения с меньшей молекулярной массой ( $M = 5000-500$ ) называются *олигомерами*, у низкомолекулярных соединений  $M \leq 500$ . Это разделение по молекулярной массе условно, так как в ряде случаев к полимерам относятся соединения с  $M = 2 \cdot 10^3$  и выше (полиэтилен и др.).

Различают *природные* и *искусственные* (или *синтетические*) *полимеры*. К полимерам, встречающимся в природе, относятся натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, шерсть и т. д. Однако ведущее место занимают синтетические полимеры, получаемые в процессе химического синтеза из низкомолекулярных соединений.

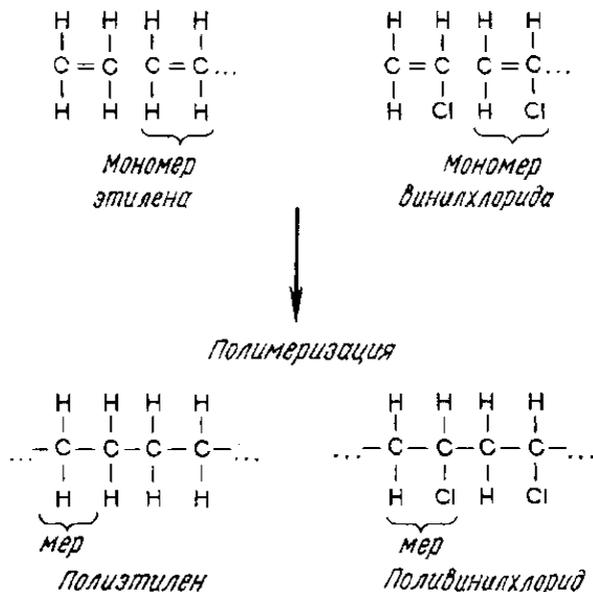


Рис. 26. Схема полимеризации полиэтилена и поливинилхлорида

**Полимеризация** – это процесс соединения маломолекулярных соединений в высокомолекулярные с образованием длинных законченных (замкнутых) цепей. Величиной степени полимеризации является количество мер в молекуле полимера. В большинстве полимеров их количество составляет от 1000 до 10000 единиц. В результате полимеризации получают такие часто применяемые полимеры, как полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, политетрафторэтилен, полибутадиен и др.

**Поликонденсация** – это ступенчатая реакция, заключающаяся в соединении большого количества одинаковых мономеров или двух раз-

личных групп (А и В) мономеров в макромолекулы (поликонденсаты) с одновременным образованием побочных продуктов (вода, аммиак, хлороводород, диоксид углерода, метиловый спирт и др.).

**Полиприсоединение** – процесс образования полимера в результате реакции множественного присоединения иономеров, содержащих предельные реакционные группы к мономерам, содержащим непредельные группы (двойные связи или активные циклы). В отличие от поликонденсации полиприсоединение протекает без выделения побочных продуктов.

По составу все полимеры делятся на органические, элементоорганические и неорганические. *Органические* полимеры, составляющие наиболее обширную группу соединений, состоят из атомов углерода, водорода, серы и галогенов. *Элементоорганические* соединения содержат в составе основной цепи, кроме перечисленных, атомы кремния, титана, алюминия и других элементов, сочетающихся с органическими радикалами. В природе таких соединений нет. Это чисто синтетические полимеры. Их характерными представителями являются кремнийорганические соединения, основная цепь которых построена из атомов кремния и кислорода. *Неорганические* полимеры (силикатное стекло, керамика, слюда, асбест и др.) не содержат атомов углерода. Основой их являются оксиды кремния, алюминия, магния и др.

В зависимости от того, как ведут себя полимеры при нагреве, они делятся на *термопластичные* и *терморезактивные*.

### **Основные свойства полимеров**

Полимеры могут находиться в твердом и жидком состояниях (газообразное состояние для них не характерно), кристаллическом и аморфном фазовых состояниях, а также в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем деформационных физических состояниях. Полимеры имеют высокую стойкость в таких средах, как щелочи и концентрированные кислоты. В отличие от металлов они не подвержены электрохимической коррозии.

Полимерные материалы подразделяются на *твердые* с модулем упругости  $E = 1-10$  ГПа (пластмассы, волокна, пленки) и *мягкие* высокоэластичные материалы с модулем упругости  $E = 1-10$  МПа

(резины). Механизм и закономерности разрушения тех и других существенно различны.

Для полимеров характерна ярко выраженная анизотропия свойств, снижение прочности и развитие ползучести при длительном нагружении. Вместе с тем полимеры обладают высоким сопротивлением усталости. Для полимеров характерна более резко выраженная температурная зависимость механических свойств по сравнению с металлами.

### **Пластические массы. Общая характеристика пластмасс**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Красители и пигменты* придают желаемую окраску пластмассам. Для пластмасс характерны следующие свойства:

- низкая плотность (обычно 1,0-1,8 г/см<sup>3</sup>, в некоторых случаях до 0,02-0,04 г/см<sup>3</sup>);
- высокая коррозионная стойкость. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей. Большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении;
- высокие диэлектрические свойства;
- хорошая окрашиваемость в любые цвета. Некоторые пластмассы могут быть изготовлены прозрачными, не уступающими по своим оптическим свойствам стеклам;
- механические свойства широкого диапазона. В зависимости от природы выбранных полимеров и наполнителей пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими. Ряд пластиков по своей механической прочности превосходит чугун и бронзу. При одной и той же массе пластмассовая конструкция может по прочности соответствовать стальной;
- антифрикционные свойства. Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов (оловянистых бронз, баббитов и др.). Например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без смазки;
- высокие теплоизоляционные свойства. Все пластмассы, как правило, плохо проводят теплоту, а теплопроводность таких тепло-

изоляторов, как пено- и поропласты, почти в 10 раз меньше, чем у обычных пластмасс;

- высокие адгезионные свойства;

- хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки) – литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений в вакууме.

### **Термопластичные пластмассы (термопласты)**

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

*Полиэтилен* имеет линейную структуру макромолекул  $[-CH_2-CH_2-]$  и является продуктом полимеризации этилена. Свойства полиэтилена зависят от условий полимеризации. По способу изготовления различают полиэтилен низкой плотности (0,918-0,930 г/см<sup>3</sup>), получаемый полимеризацией при высоком давлении (ГОСТ 16337-77Е), и полиэтилен высокой плотности (0,946-0,970 г/см<sup>3</sup>), получаемый полимеризацией при низком давлении (ГОСТ 16338-85Е). Полиэтилен высокой плотности имеет степень кристалличности до 75-95 %. Чем выше плотность и степень кристалличности полиэтилена, тем выше его прочность, модуль упругости и теплостойкость. Разрушающее напряжение при растяжении полиэтилена низкой плотности составляет 10-17 МПа, полиэтилена высокой плотности – 18-35 МПа. Полиэтилен имеет высокие диэлектрические свойства, практически не поглощает влагу.

Полиэтилен (ГОСТ 25951-83, ГОСТ 20477-86, ГОСТ 10354-82) выпускается в виде пленок толщиной 0,03-0,30 мм, шириной 1400 мм и длиной 30 м, а также в виде листов толщиной 1–6 мм и шириной до 1400 мм. Полиэтилен применяют для изоляции электропроводов и кабелей, в качестве упаковочного материала для пищевых продуктов, для защиты от коррозии магистральных нефте- и газопроводов, в качестве заменителя стекла, для изготовления предметов домашнего обихода, для защиты металлов от коррозии. Полиэтиленовые трубы могут работать при температурах до –60 °С, они не подвержены почвенной коррозии.

*Полипропилен* является полимером полипропилена  $[-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-]$ .

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

Детали из полипропилена изготавливают штамповкой, литьем под давлением, пневматическим и вакуумным прессованием; полиэтилен можно сваривать, напылять на металл, ткань, картон. Он легко подвергается механической обработке на токарных, фрезерных, сверлильных станках. Отходы при производстве полипропилена и отработавшие изделия из него используют для повторной переработки.

*Полистирол* (ГОСТ 20282-86Е) относится к числу наиболее известных и широко применяемых пластмасс. Его макромолекула имеет следующую формулу:  $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]_n$ .

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

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

*Пенополистирол* получают из эмульсионного полимера прессовым и беспрессовым методами. Пенополистирол применяют для теплоизоляции холодильников и торгового оборудования. Для производства изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, используют обычно суспензионный полистирол. При получении пенополистирола прессовым методом (пенополистирол марок ПС-1 и ПС-4) используют эмульсионный тонкодисперсный полистирол, смешивают его с порообразующим компонентом, прессуют, а затем вспенивают в специальных обогреваемых камерах. Если же пенополистирол получают беспрессовым методом из блочно-суспензионного стирола, он называется стиропор. Его полимеризацию проводят при  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  с непрерывным перемешиванием.

*Пенопласт мипора* изготавливается на основе эмульсионных карбомидоформальдегидных олигомеров. Он обладает исключительно малой плотностью (не более  $0,02 \text{ г/см}^3$ ; разрушающее напряжение при сжатии  $2,2\text{-}5,0 \text{ МПа}$ ). Коэффициент теплопроводности мипоры близок к коэффициенту теплопроводности воздуха и равен  $0,023 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Мипора в 10 раз легче пробки, имеет хорошую стойкость против горения. При контакте с пламенем мипора обугливается, но не загорается. В мипоре газонаполненные ячейки не сообщаются между собой. Это позволяет использовать мипору в качестве теплоизоляционного материала. Недостатками мипоры являются большая хрупкость и водопоглощение. Для уменьшения хрупкости к мипоре добавляют глицерин, но даже это не всегда помогает. От проникновения влаги мипору защищают водонепроницаемыми пленками.

*Пластмассы на основе поливинилхлорида* (ГОСТ 5960-72, ГОСТ 9639-71, ГОСТ 9998-80, ГОСТ 16214-86, ГОСТ 16272-79) имеют хорошие электроизоляционные свойства. Они стойки к воз-

действию химикатов, не поддерживают горения, атмосферо-, водо-, масло- и бензостойки. Поливинилхлорид имеет химическую формулу  $[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$ . Непластифицированный поливинилхлорид называется *винипластом*. Винипласты имеют высокую механическую прочность и упругость, но сравнительно малопластичны.

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

*Полиамиды* (ГОСТ 10589-87, ГОСТ 17648-83) включают группу известных термопластичных пластмасс (таких, как нейлон, капрон и др.). Макромолекула полиамида состоит из амидной  $-\text{NH}-\text{CO}-$  и метиленовой  $-\text{CH}_2$  групп и имеет общий вид  $[-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)-]_n$ , где метиленовые группы повторяются от 2 до 100 раз. Ориентированные полиамиды характеризуются высокой прочностью на растяжение (более 400 МПа), ударопрочностью, способностью к поглощению вибрационных нагрузок.

*Полиуретаны* (ТУ 6-05-221-479-79) – наиболее ценные и широко производимые промышленностью термопластичные полимеры. Полиуретаны содержат уретановую группу  $[-\text{NH}-\text{COO}-]_n$ . Они характеризуются высоким модулем упругости, износостойкостью, вязким коэффициентом трения, стойкостью к вибрациям, атмосферостойкостью, а также стойкостью к воздействию масла и бензина. Изделия из полиуретана можно эксплуатировать при понижении температуры до  $-60 \dots -70$  °С.

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

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

*Поликарбонат* (ТУ 6-06-68-89, ТУ 6-06-95-90) – термопластичный полимер на основе дифенилпропана, выпускаемый под на-

званием дифлон. Поликарбонат характеризуется низкой водопоглощаемостью и газопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами, высокой жесткостью, теплостойкостью и химической стойкостью, не имеет запаха и вкуса, физиологически безвреден, бесцветен, прозрачен, хорошо окрашивается.

### **Термореактивные пластмассы (реактопласты)**

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

*Фенопласты* (бакелиты, феноло-формальдегидные смолы) являются термоупрочняемыми пластмассами. Неупрочненные смолы получают при поликонденсации фенола с формальдегидом. Существует два основных типа феноло-формальдегидных смол: новолаки и резолы.

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

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

Неупрочненная смола получается при поликонденсации формальдегида с карбамидом (смола карбамидоформальдегидная) или меламином (смола меламиноформальдегидная).

Теплостойкость упрочненных аминопластов около 100-120 °С. Образец, внесенный в огонь, начинает гореть не более чем через 1 минуту. Вынутый из пламени, он не гаснет, но горит медленно (в действительности горят наполнители, сама смола негорю-

ча). Огонь имеет желтый цвет (меламиновая смола) или желтый с зеленовато-голубой каймой (карбамидная смола). Остаток после горения растресканный, разбухший и покрыт по краям характерным белым налетом. Во время горения отчетливо чувствуется запах формальдегида и карбамида.

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

*Асбоволокниты* обладают хорошими фрикционными (тормозными) свойствами и теплостойкостью, но по водостойкости и диэлектрической прочности уступают пластмассам с порошковым наполнителем.

*Стекловолокониты* негорючи, стойки к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойки, имеют стабильные размеры. Некоторые марки стекловолоконитов применяются для изготовления силовых электротехнических деталей в машиностроении, а также крупногабаритных изделий простых форм (кузовов автомашин, лодок, корпусов приборов и т. п.). Стекловолокониты имеют высокие физико-механические характеристики и применяются для изготовления деталей высокого класса точности и сложной конфигурации. Стекловолокониты могут работать при температурах от -60 до +200 С, имеют прочность при разрыве 80-500 МПа.

В качестве связующих смол волоконитов и стекловолоконитов применяются полиэфировые и эпоксидные смолы.

*Полиэстры* (полиэфировые смолы) являются полимерами, полученными из высокоосновных кислот (например,  $\text{HOOC-R}_1\text{-COOH}$ ) и высокогидроксильных спиртов (например,  $\text{HO-R}_2\text{-OH}$ ) путем поликонденсации. Если группы R не содержат многократных связей, то речь идет о насыщенном полиэстре, чаще термопластичном, иногда упрочняемом (например, в случае применения третичного гидролизного спирта). Если группы R содержат многократные связи, полиэстр является ненасыщенным и химически упрочняемым.

Пластик на основе бумаги – *гетинакс* (ГОСТ 2718-74) – применяют в качестве электроизоляционного материала, работающего длительно при температурах от -65 до +105 °С, а также как конструкционный и декоративный материал. Гетинаксы широко

применяют в электрических машинах, трансформаторах (в качестве высоковольтной изоляции) и других аппаратах, при производстве телефонной арматуры, в радиотехнике (для изготовления печатных схем). Из гетинакса изготавливают панели, щитки, прокладки, крышки, шайбы, малонагруженные изделия и т. д.

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

ДСП обычно изготавливают в форме плит или тонких листов. Их получают горячим прессованием лущеного древесного шпона, пропитанного полимерным связующим. При производстве ДСП чаще используют березовый или буковый шпон, в качестве связующего используют водно-спиртовые растворы олигомеров. Древесно-слоистые пластики выпускают различных марок и маркируют ДСП-А, ДСП-Б, ДСП-В и т. д. Они различаются направлением волокон шпона в различных слоях. В ДСП-А – во всех слоях волокна шпона расположены параллельно (иногда четыре слоя с параллельным расположением волокон чередуются с одним слоем).

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

*Стеклотекстолитами* (ГОСТ 10292-74Е, ГОСТ 12652-74) называют слоистые пластики на основе тканых стекловолокнистых материалов. Они характеризуются высокой тепло- и холодостойкостью, стойкостью к действию окислителей и других химически активных реагентов, высокими механическими свойствами.

### *Резины*

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

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

Главным исходным компонентом резины, придающим ей высокие эластические свойства, является каучук. Каучуки бывают натуральные (НК) и синтетические (СК). Натуральный каучук получают коагуляцией латекса (млечного сока) каучуконосных деревьев, растущих в Бразилии, Юго-Восточной Азии, на Малайском архипелаге. Синтетические каучуки (бутадиеновые, бутадиен-стирольные и др.) получают методами полимеризации.

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

#### *Клеящие материалы*

Клеями называют сложные вещества на основе полимеров, способные при затвердевании образовывать прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам. По сравнению с другими видами соединений (клепкой, сваркой, механическим креплением) клеевые соединения имеют ряд преимуществ. Клеи позволяют соединять разнородные материалы (металл, керамику, пластмассу, дерево) в различных сочетаниях. Клеевые швы атмосферостойки, не подвержены коррозии, позволяют обеспечивать герметичность соединений.

#### *Лакокрасочные материалы*

Лакокрасочные материалы представляют собой многокомпонентные составы, в жидком состоянии наносимые на поверхность изделий и высыхающие с образованием пленок, удерживаемых силами адгезии. Высохшие пленки называют лакокрасочными покрытиями. Назначение лакокрасочных покрытий – защита металлов от коррозии, дерева и тканей – от гниения и набухания. Кроме того, они служат декоративным целям, придавая изделиям желаемый внешний вид. В некоторых случаях покрытия могут иметь специальные свойства: электроизоляционные, теплозащитные, светостой-

кие и др. Защитные покрытия в несколько раз увеличивают срок службы аппаратуры, металлоконструкций и оборудования.

Основными требованиями, предъявляемыми к лакокрасочным покрытиям, являются высокая адгезия к защищаемым поверхностям; близкие значения температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и металла; высокая плотность, беспористость, водо- и газонепроницаемость; высокая эластичность пленки при достаточной твердости и механической прочности; теплостойкость, химическая стойкость и светостойкость.

### *Стекло*

Стекло – это однородное аморфное вещество, получаемое при затвердевании расплава оксидов. В составе стекла могут присутствовать оксиды трех типов: *стеклообразующие*, *модифицирующие* и *промежуточные*. Стеклообразующими являются оксиды кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка. К модифицирующим оксидам, введение которых понижает температуру плавления стекла и существенно меняет его свойства, относятся оксиды щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg, Ba) металлов. Промежуточными являются оксиды алюминия, свинца, титана, железа. Они могут замещать часть стеклообразующих оксидов. Стеклообразующий каркас стекла представляет собой непрерывную пространственную решетку, в узлах которой расположены ионы, атомы или группировки атомов (рис. 27). Химический состав стекла можно изменять в широких пределах. Поэтому и свойства стекла могут быть различными. По химическому составу в зависимости от природы стеклообразующих оксидов различают *силикатное*, *алюмосиликатное*, *боросиликатное*, *алюмоборосиликатное* и другие виды стекла.

В зависимости от содержания модификаторов стекло может быть щелочным и бесщелочным.

Плотность стекла составляет 2,2-8,0 г/см<sup>3</sup>. Стекло высокой плотности содержит значительные количества оксидов свинца и бария.

Стекло – жесткий, твердый, но очень хрупкий материал. Стекло хорошо сопротивляется сжатию ( $\sigma_{сж} = 400-600$  МПа), но характеризуется низким временным сопротивлением при испытаниях на растяжение (30-90 МПа) и изгиб (50-150 МПа). Более прочным является бесщелочное и кварцевое стекло.

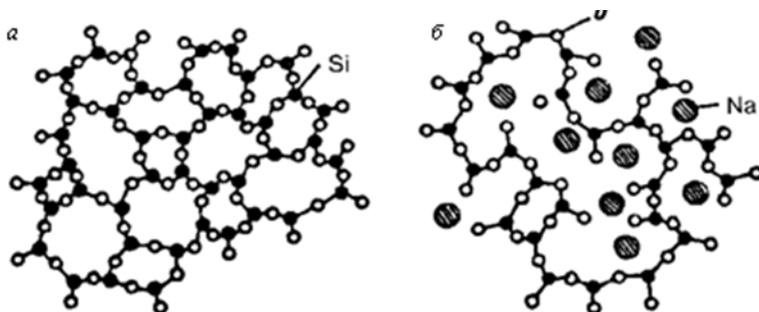


Рис. 27. Схема непрерывной структурной сетки стекла  
*a* – кварцевого; *б* – натрийсиликатного

*Керамические и композиционные материалы. Керамическая технология и классификация керамики*

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

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

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

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

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

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

Принципиальными недостатками керамики являются ее хрупкость и сложность обработки. Керамические материалы плохо работают в условиях механических или термических ударов, а также при циклических условиях нагружения. Им свойственна высокая чувствительность к надрезам. В то же время керамические материалы обладают высокой жаропрочностью, превосходной коррозионной стойкостью и малой теплопроводностью, что позволяет с успехом использовать их в качестве элементов тепловой защиты.

При температурах выше 1000 °С керамика прочнее любых сплавов, в том числе и суперсплавов, а сопротивление ползучести и жаропрочность ее выше. К основным областям применения керамических материалов относятся режущий инструмент, детали двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей и др.

#### *Режущий керамический инструмент*

Режущая керамика характеризуется высокой твердостью, в том числе при нагреве, износостойкостью, химической инертностью к большинству металлов в процессе резания. По комплексу этих свойств керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы (табл. 4).

Высокие свойства режущей керамики позволили существенно повысить скорости механической обработки стали и чугуна (табл.4).

Таблица 4

**Сравнительные значения свойств инструментальных материалов**

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

Таблица 5

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

Обрабатываемый материал	Твердость	Скорость резания, м/мин, инструментом, оснащенным	
		керамикой	твердым сплавом
Углеродистая сталь	150-250 HB	250-300	100-200
Легированная сталь	46-56 HRC	100-160	25-65
Серый чугун	120-240 HB	300-400	100-200
Высокопрочный чугун	160-300 HB	200	50-100

Для изготовления режущего инструмента широко применяется керамика на основе оксида алюминия с добавками диоксида циркония, карбидов и нитридов титана, а также на основе бескислородных соединений – нитрида бора с кубической решеткой ( $\beta$ -BN), обычно называемого кубическим нитридом бора, и нитрида кремния  $Si_3N_4$ . Состав и свойства основных марок режущей керамики приведены в табл. 6. Режущие керамические пластины используются для оснащения различных фрез, токарных резцов, расточных головок, специального инструмента.

Таблица 6

**Свойства основных марок режущей керамики**

Фирма-изготовитель	Марка	Состав основной фазы	Твердость		Прочность при изгибе, МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Средний размер зерен, мкм
			HRA	HV			
ВНИИТС (Россия)	BO-13	$Al_2O_3$	92	-	450-500	3,96	1-3
	ВОК-60	$Al_2O_3+TiC$	94	-	600-650	4,25	1-3
«Feldniuhle» (Германия)	SN60	$Al_2O_3+ZrO_2$	-	2200	600	3,97	2
	SN20	$Al_2O_3+TiC$	-	2100	600	4,28	2
	SN100	$Si_3N_4+Y_2O_3$	-	1700	800	3,30	-
«Hertel» (Германия)	AC5	$Al_2O_3+ZrO_2$	-	1700	500	4,00	1,8
	MC2	$Al_2O_3+TiC$	-	2000	-	4,25	-
	HC1	$Si_3N_4$	-	1500	800	3,30	-
«Sandvik Ceramant» (Швеция)	CC620	$Al_2O_3+ZrO_2$	-	1650	-	-	2-3
	CC650	$Al_2O_3+ZrO_2+TiO$	-	1800	400-500	4,27	-
	CC680	$Si_3N_4$	91,2	1500	-	-	
«Krupp-Widia» (Германия)	Widalox	$Al_2O_3+ZrO_2+TiO$	-	1730	650	4,12	-
«NGK» США	CX2	$Al_2O_3+TiN$	-	-	750	4,15	-
Россия	Эльбор	-	-	-	700	3,45	-

### *Композиционные материалы. Общая характеристика и классификация*

Традиционно применяемые металлические и неметаллические материалы в значительной мере достигли своего предела конструктивной прочности. Вместе с тем развитие современной техники требует создания материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред, излучений, глубокого вакуума и высоких давлений.

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

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, часто называемые *упрочнителями*. Они имеют высокую прочность, твердость и модуль упругости. По типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяют на *дисперсноупрочненные, волокнистые* и *слоистые* (рис. 28).

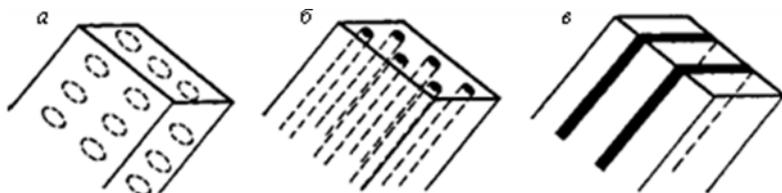


Рис. 28. Схемы строения композиционных материалов:  
*а* – дисперсноупрочненные; *б* – волокнистые; *в* – слоистые

#### *Дисперсноупрочненные композиционные материалы*

При дисперсном упрочнении частицы блокируют процессы скольжения в матрице. Эффективность упрочнения при условии минимального взаимодействия с матрицей зависит от вида частиц, их объемной концентрации, а также от равномерности распределения в матрице. Применяют дисперсные частицы тугоплавких фаз типа  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , BN, SiC, имеющие малую плотность и высокий модуль упругости. КМ обычно получают методом порошковой металлур-

гии, важным преимуществом которого является изотропность свойств в различных направлениях.

В промышленности обычно применяют дисперсноупрочненные КМ на алюминиевой и реже – никелевой основах. Характерными представителями этого вида композиционных материалов являются материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые состоят из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1 мкм в присутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче и в ней повышается содержание оксида алюминия.

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

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

#### *Волокнистые композиционные материалы*

Помимо обеспечения прочности и монолитности конструкции матрица должна иметь необходимую пластичность и быть работоспособной в той температурной области, для которой предназначен КМ.

Для изготовления КМ, применяемых при температурах ниже 200 °С, используют полимерные матрицы. К таким композитам относятся стеклопластики, армированные короткими стеклянными волокнами в матрице из полиэфирной смолы. Стеклопластики применяют для изготовления корпусов автомобилей, лодок, некоторых бытовых приборов. В качестве матриц также используют термореактивные полимеры, в которых поперечные связи между основными цепями формируют жесткую структуру с трехмерной сеткой. Таки-

ми полимерами являются эпоксидные смолы, которые благодаря поперечным связям имеют более высокую термостойкость.

Волокна сматывают с бобин, подвергают поверхностной обработке, улучшающей адгезию, протягивают в ванну, где их покрывают полимерной смолой. Смола скрепляет волокна в плоский жгут – ленту. Готовые ленты собирают в слоистый листовый материал (аналог фанеры) или же наматывают в более сложные формы. Собранный в листы или намотанный материал отверждают термообработкой. Слои можно накладывать поочередно с разным направлением волокон и формировать в композите клетчатую структуру арматуры. Это придает материалу жесткость.

#### *Слоистые композиты*

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

#### *Свойства и применение композиционных материалов*

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

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема выбора материалов в процессе конструирования различных изделий является весьма сложной задачей. Ее решение зависит от грамотного учета множества факторов, определяющих эксплуатационные и технологические свойства материала, сведения о сталях и сплавах с особыми свойствами, цветных сплавах и других материалах, а также его стоимость и экономичность технологий изготовления и упрочняющей обработки изделия.

В связи с этим строгого алгоритма решения проблемы выбора материалов не существует. Задача решается исходя из знаний, в первую очередь, основных закономерностей материаловедения и технологии конструкционных материалов, каждый раз обращая особое внимание на **связь трех С: Состав – Структура – Свойства**.

## ПРИМЕРНАЯ ТЕМА РЕФЕРАТОВ

### САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №1

#### **Кристаллическое строение и свойства металлов**

1. Исследование механических свойств.
2. Исследование макро- и микроструктуры (металлографический анализ).
3. Фазовый анализ. Определение структуры вещества и периодов решетки различных фаз в смеси. Чувствительность метода определения вещества в смеси.
4. Рентгеноструктурный анализ. Экспериментальные особенности метода поликристаллов.
5. Макроскопический анализ. Неоднородность, созданная термической или химико-термической обработкой.
6. Операции количественной металлографии.
7. Основные геометрические типы структур.
8. Методы количественной металлографии: Метод анализа по площадям. Точечный метод.

9. Методы количественной металлографии: Линейный анализ. Анализ многофазно-полиэдрической структуры. Анализ ориентированной структуры.

10. Просвечивающая электронная микроскопия. Подготовка образца: электрохимическое или химическое травление при приготовлении тонкого образца и метод реплик.

11. Микродифракция. Определение структуры, размеров и распределения структурных составляющих.

12. Растровая электронная микроскопия. Общие сведения.

13. Растровая электронная микроскопия. Подготовка образцов. Способы создания изображения.

14. Применение растровой микроскопии для исследования изломов разрушенных образцов.

15. Рентгеноструктурный анализ. Качественный и количественный фазовый анализ.

16. Рентгенометрические справочники. Картотека JCDD.

17. Дифрактометры. Приготовление образцов. Методы получения рентгенограмм.

18. Прецизионное измерение периодов кристаллической решетки. Построение диаграмм состояния металлов.

19. Анализ твердых растворов. Определение типа твердого раствора, процессов упорядочения и процессов распада (выделения фаз).

20. Анализ макронапряжений, микронапряжений, дисперсности. Анализ текстур, возникающих при производстве материалов.

## САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №2

### **Химико-термическая обработка стали и другие методы получения износостойких покрытий. Классификация легированных сталей**

1. Отпуск закаленной стали. Виды отпуска: низкий, средний, высокий.

2. Структура и свойства стали после различных видов отпуска.

3. Примеры применения упрочняющей термической обработки стальных изделий в различных отраслях машиностроения.

4.Цели легирования стали. Наиболее распространенные легирующие элементы.

5.Влияние легирующих элементов на полиморфные превращения в железе и свойства феррита. Взаимодействие легирующих элементов с углеродом.

6.Влияние легирующих элементов на превращение переохлажденного аустенита и прокаливаемость стали.

7.Распределение легирующих элементов в стали.

8.Основы рационального выбора материалов и методов упрочнения деталей машин и инструмента.

9.Классификация чугунов.

10.Процесс графитизации. Влияние состава чугуна на процесс графитизации.

11.Серый чугун.

12.Высокопрочный чугун с шаровидным графитом.

13.Ковкий чугун. Отбеленные и другие чугуны.

14.Старение.

15.Обработка стали холодом.

16.Упрочнение методом пластической деформации.

17.Классификация легированных сталей.

18.Углеродистые стали.

19.Цементуемые и улучшаемые стали.

20.Улучшаемые легированные стали.

### САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №3

#### **Основы рационального выбора материалов и методов упрочнения деталей машин. Технология сварочного производства.**

1.Отделочные способы: обкатывание и раскатывание, алмазное выглаживание.

2.Упрочняющие способы обработки.

3.Современное состояние, место и значение сварочного производства в машиностроении, перспективы его развития.

4.Свариваемость однородных и разнородных материалов, сварные швы и соединения.

5. Виды дефектов сварных соединений. Особенности сварки конструкционных, высоколегированных сталей, чугуна, титана, медных и алюминиевых сплавов.

6. Контроль качества сварных соединений.

7. Дуговая сварка. Электрическая сварочная дуга.

8. Ручная дуговая сварка, производительность. Область применения.

9. Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. Области применения.

10. Сварка в атмосфере защитных газов, сущность и схема процесса. Применяемые защитные газы.

11. Сварка неплавящимся и плавящимся электродами.

12. Ручная, автоматическая и полуавтоматическая сварка.

13. Электрошлаковая сварка. Сущность и схема процесса.

14. Сварка и обработка металлов плазменной струей.

15. Сварка электронным лучом в вакууме, сущность и схема процесса. Лазерная сварка.

16. Газовая сварка и резка, сущность и схема процесса. Аппаратура для газовой сварки.

17. Резка металлов: кислородная, плазменная, воздушно-дуговая, сущность и схемы процесса.

18. Электрическая контактная сварка, сущность и схема процесса, разновидности. Сварка аккумулированной энергией.

19. Наплавка износостойких и других специальных сплавов.

20. Пайка твердыми и мягкими припоями. Области применения.

#### САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №4

### **Технология обработки конструкционных материалов резанием. Неметаллические материалы и технология их переработки в изделия**

1. Классификация материалов лезвийных инструментов. Назначение твердых сплавов при обработке резанием.

2. Износостойкие покрытия режущих инструментов. Сравнительные оценки режущих свойств инструментальных материалов.

3. Требования к процессу резания: общие сведения о резании материалов, тепловой баланс процесса резания, изнашивание и стойкость инструмента, наростообразование при резании металлов.

4. Деформация металла при обработке резанием.

5. Элементы резания и геометрия срезаемого слоя. Обрабатываемость металлов резанием.

6. Требования к подшипниковым сплавам. Баббиты, их состав, структура, свойства и наиболее распространенные марки.

7. Антифрикционные бронзы и чугуны. Порошковые (металлокерамические) антифрикционные материалы.

8. Виды композиционных материалов, их классификация, строение и свойства, преимущества и недостатки.

9. Полимеры: основные понятия; особенности высокомолекулярного строения полимеров.

10. Физические состояния полимеров – стеклообразное, высокоэластичное, вязкотекучее.

11. Типичные диаграммы растяжения термопластичных и терморезистивных полимеров в стеклообразном состоянии.

12. Полимерные армированные материалы.

13. Виды и назначение неметаллических материалов.

14. Физико-механические свойства термопластов. Штамповка листовых термопластов, их сварка.

15. Терморезистивные полимеры или смолы, их физико-механические свойства. Терморезистивные пластмассы с наполнителями из пресс-порошков, волокнитов и слоистых пластиков.

16. Виды и свойства металлокерамических материалов. Холодное и горячее прессования порошков.

17. Требования к металлическим защитным покрытиям. Методы нанесения металлических защитных покрытий.

18. Гальванические покрытия. Особенности цинкования, кадрирования, никелирования, хромирования, оловянирования.

19. Термодиффузионные покрытия алюминием, хромом, кремнием. Покрытия, получаемые методом погружения в расплавленные металлы.

20. Плакирование. Металлизация напылением. Неорганические покрытия. Органические покрытия.

## Методические указания к выполнению и оформлению самостоятельной работы

Рекомендуется следующая примерная структура оформления:

**1. Введение.** Должна быть оценена и обоснована актуальность вопроса.

**2. Литературный обзор.** Следует указать, какие стороны вопроса в литературных источниках освещены довольно полно, а каких данных недостаточно.

**3. Основная часть работы.** Необходимо описать и обосновать все важные вопросы темы как наиболее информативного и доступного. Следует учитывать: материал объекта, его конструкцию, состояние контролируемой поверхности, условия работы объекта, доступность объекта, технико-экономические показатели.

**4. Выводы.** Следует сформулировать выводы, вытекающие из результатов работы кратко, в форме тезисов.

**5. Список использованной литературы.** В конце работы должен быть помещен список использованной литературы, содержащий наименования только тех источников, на которые имеются в тексте ссылки.

**6. Работа должна быть** напечатана на бумаге формата А4, иметь титульный лист. Листы должны быть сшиты. Объем работы – не менее 10 листов.

### Библиографический список

#### Основная литература

1. Солнцев Ю.П. Материаловедение: Учебник для ВУЗов /Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. 4-е изд., перераб. И доп. СПб.: Химиздат. 2007. 783 с. <http://www.twirpx.com/file/199191/>.

2. Материаловедение /под общ.ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 575 с.

#### Дополнительная литература

3. Гуляев А.П. Металловедение: Учебник для ВУЗов /А.П. Гуляев. М.: Металлургия. 2015. 542 с.

4. Солнцев Ю. П. Материалы для низких и криогенных температур: энциклопедический справочник / Ю.П. Солнцев, Б.С. Ермаков, О.И. Слепцов. СПб.: Химиздат. 2008. 768 с.

**Базы данных, электронно-библиотечные системы, информационно-справочные и поисковые системы**

5. Марочник сталей и сплавов <http://www.splav-kharkov.com/main.php>.

6. Марочник сталей и сплавов [http://metallicheckiy-portal.ru/marki\\_metallov](http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov).

7. Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана [сайт]. URL: <http://www.bmstu.ru/>. (дата обращения: 29.12.2010).

8. Металлургический классификатор [сайт]: URL: <http://www.metalweb.ru>. (дата обращения: 29.12.2010).

9. Полнотекстовые базы данных, библиотека СПГИ URL:<http://kodeks.spmi.edu.ru:3000>. (дата обращения: 29.12.2010).

10. ФАК.RU (Факультет РУ) [сайт]: базы данных ВУЗов России по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование». – URL: <http://www.fak.ru/baza/students.php.spec=150404>. (дата обращения: 29.12.2010).

11. Черная металлургия [сайт]. URL: <http://emchezgia.ru>. (дата обращения: 29.12.2010).

**Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студента**

12. Гольдштейн М.И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. М.: МИСИС. 1999. 408 с. <http://booktech.ru/books/materialovedenie/2821-specialnye-stali-1999-mi-goldshteyn.html>.

13. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна (с Изменением N 1).

14. ГОСТ 1778-70. Металлографические методы определения неметаллических включений (с Изменениями N 1, 2).

15. ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры.

## СОДЕРЖАНИЕ

Методические указания по изучению дисциплины.....	3
1. Строение и свойства металлических сплавов.....	3
2. Влияние химического состава и термической обработки на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов.....	17
3. Классификация и маркировка углеродистых сталей.....	23
4. Упрочняющая термическая обработка сталей (влияние структурных превращений при закалке и отпуске на свойства стали).....	26
5. Отпуск (превращения в закаленной стали при нагреве).....	31
6. Влияние легирования на структуру и свойства сталей.....	33
7. Порошковые материалы.....	42
8. Неметаллические материалы.....	51
Заключение.....	72
Самостоятельная работа №1.....	72
Самостоятельная работа №2.....	73
Самостоятельная работа №3.....	74
Самостоятельная работа №4.....	75
Методические указания к выполнению и оформлению самостоятельной работы.....	77
Библиографический список.....	77

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И  
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Методические указания к самостоятельной работе  
студентов бакалавриата направления подготовки 12.03.01*

Составители: *А.В. Сивенков, Л.Г. Борисова*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
материаловедения и технологии художественных изделий

Ответственный за выпуск *Л.Г. Борисова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати                      Формат 60x84/16.  
Бум. для копировальной техники. Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л.  
Усл.кр.-отг.    Уч.-изд.л.    Тираж    экз. Заказ    С

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2