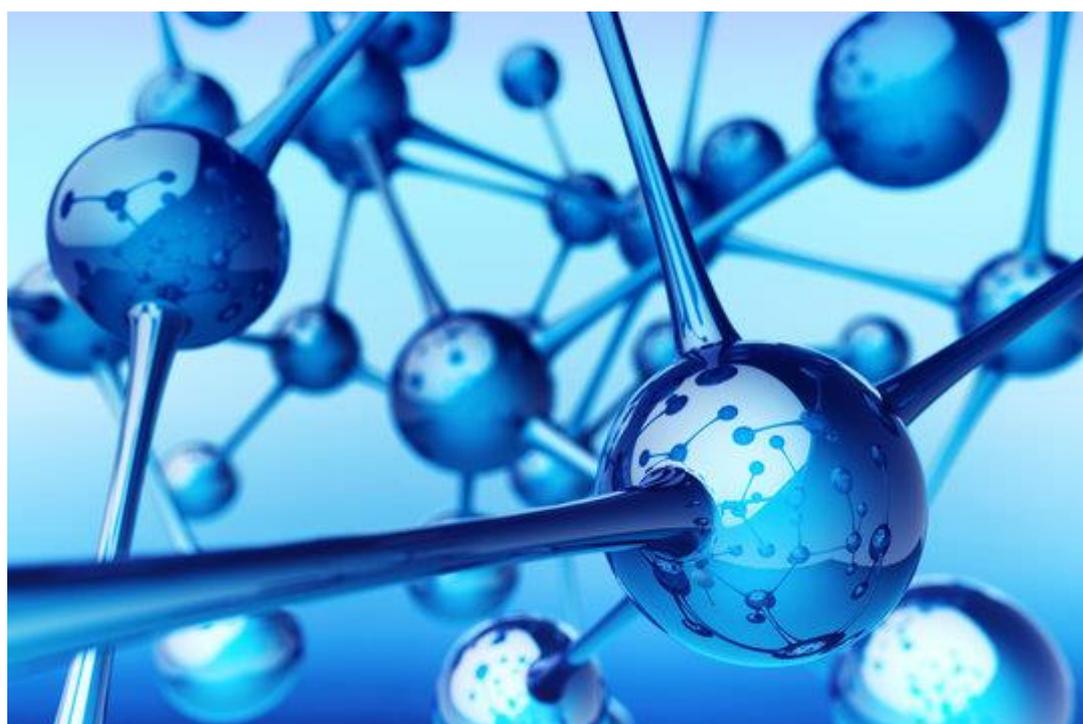


**А. П. КОРОЛЕВ, Д. М. МОРДАСОВ**

# **МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**



**Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

**А. П. КОРОЛЕВ, Д. М. МОРДАСОВ**

# **МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

Допущено Федеральным Учебно-методическим объединением по  
укрупненной группе специальностей и направлений  
22.00.00 «Технологии материалов» в качестве учебного пособия  
при подготовке бакалавров, обучающихся по направлению 22.03.01  
«Материаловедение и технологии материалов»

*Учебное электронное издание*



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2024

УДК 621.78.08  
ББК 34.651  
К66

Рецензенты:

Доктор технических наук, доцент,  
почетный работник сферы образования Российской Федерации,  
директор Института инженерии и машиностроения  
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»  
*В. А. Иванова*

Доктор технических наук, профессор, академик РАЕН,  
заведующий кафедрой «Физика» ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
*О. С. Дмитриев*

**Королев, А. П.**

К66      **Металловедение [Электронный ресурс] : учебное пособие /**  
**А. П. Королев, Д. М. Мордасов. – Тамбов : Издательский центр**  
**ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). –**  
**Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-**  
**дисковод ; 3,3 Мб ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с**  
**экрана.**

**ISBN 978-5-8265-2802-0**

Представлены кристаллическое строение материалов, типы сплавов, диаграммы состояния двойных сплавов, железоуглеродистые сплавы, легированные стали, сплавы на основе цветных металлов, все виды термообработки, превращения в структурах стали при охлаждении и нагреве.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов», также полезно и для студентов других направлений.

УДК 621.78.08  
ББК 34.651

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.  
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

**ISBN 978-5-8265-2802-0**

© Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический  
университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Пособие «Металловедение» адресовано студентам, обучающимся по программе бакалавриата, для формирования знаний исследования и обработки материалов; выбора необходимых материалов для использования в нужных отраслях и направлениях; классификации материалов по свойствам, структуре и назначению.

При изучении дисциплины учебное пособие «Металловедение» поможет освоить все требования, предъявляемые к металловедам. В результате у обучающихся будут сформированы компетенции:

- знать понятия неметаллических, металлических, конструкционных и инструментальных материалов;
- знать виды дефектов кристаллического строения, типы сплавов и условия их образования;
- знать основные типы диаграмм состояния сплавов, основные свойства этих сплавов и области их применения в народном хозяйстве;
- уметь выбирать материал для конструкций и инструмента общего назначения для неотчетственных условий эксплуатации;
- уметь выбирать материал для конструкций и инструмента специального назначения для ответственных условий эксплуатации;
- уметь выбирать материал для конструкций и инструмента для особо ответственных или специфических условий эксплуатации;
- владеть навыками оценки применимости материалов для различных условий эксплуатации исходя из их структуры и свойств;
- владеть навыками прогнозирования изменения структуры и свойств материалов при изменении их химического состава и термообработки;
- владеть навыками создания и термообработки материалов с заданными структурой и свойствами исходя из их условий эксплуатации.

# 1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

*Металловедение* – наука, изучающая взаимосвязь химического состава, микроструктуры и свойств металлов и сплавов.

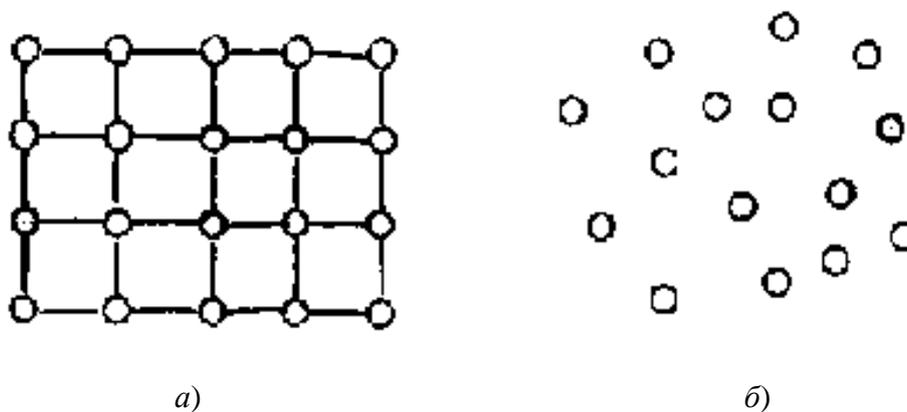
*Металлы* – кристаллические тела, т.е. в них атомы расположены в пространстве закономерным порядком.

В аморфных (некристаллических) телах такая упорядоченность отсутствует.

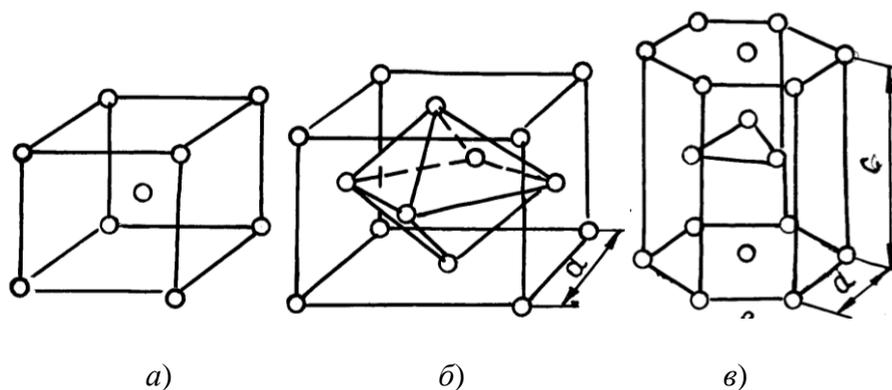
На рисунке 1 показана схема расположения атомов в кристаллических и аморфных телах.

Упорядоченное расположение атомов (ионов) в пространстве называют кристаллической решеткой. Минимальное количество атомов, которое определяет закономерность расположения их в пространстве, называют элементарной ячейкой кристаллической решетки.

Для описания элементарной ячейки используют шесть величин: три отрезка:  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – расстояния до ближайших атомов по координатным осям и три угла  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  между этими отрезками.



**Рис. 1. Условное изображение расположения атомов  
в кристаллическом (а) и аморфном (б) веществе**



**Рис. 2. Элементарные ячейки кристаллических решеток:**

*a* – ОЦК (Fe<sub>α</sub>, Cr, Mo, W, V, Ta и др.);

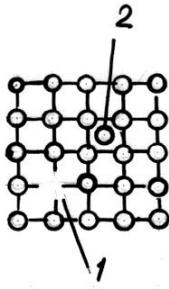
*б* – ГЦК (Fe<sub>γ</sub>, Ni, Cu, Al и др.); *в* – ГПУ (Cd, Zn, Mg, Co)

В металлах и металлических сплавах наиболее распространены три типа кристаллических решеток: объемно-центрированная кубическая (ОЦК), гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ), рис. 2.

*Тип связи в металлических кристаллах.* Связь между атомами в металлах осуществляется так называемым «электронным газом», или коллективизированными внешними валентными электронами. Валентные электроны в металлической кристаллической решетке не принадлежат одному «своему» атому, а отданы атомами в общее пользование. Высокая теплопроводность и электропроводность металлов объясняются легкоподвижным электронным газом.

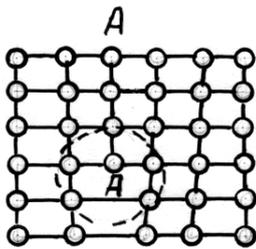
## 1.1. РЕАЛЬНОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Описанное строение металлов является слишком упорядоченным. Абсолютный порядок противоестественен реальным системам. Устойчивость кристаллической системы увеличивается с ростом беспорядка, так как при этом снижается термодинамический потенциал (запас



**Рис. 3. Точечные дефекты в кристалле:**

1 – вакансия;  
2 – междоузельный атом



**Рис. 4. Схема дислокации:**

(A–A) – неполная атомная плоскость; пунктиром показана область ядра дислокации

свободной энергии). В реальных кристаллических телах различают следующие виды беспорядка (дефектов).

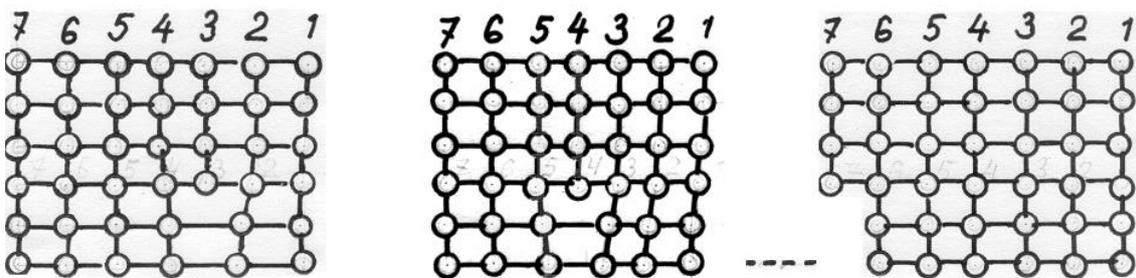
*Точечные дефекты:* вакансии, атомы замещения и междоузельные атомы, рис. 3.

Количество точечных дефектов в кристалле не остается постоянным: с повышением температуры их концентрация увеличивается.

*Линейные дефекты.* К линейным дефектам относятся дислокации. Дислокацию можно представить, как границу или край оборванной (неполной) атомной плоскости, рис. 4.

При сдвиговых напряжениях  $\tau$  дислокационные полуплоскости могут передвигаться по кристаллу и менять свое положение, рис. 5.

Наличием дислокаций и сравнительной легкостью их перемещения (скольжения) в металлическом кристалле объясняется высокая пластичность металлов и сплавов.



**Рис. 5. Схема движения краевой дислокации (пластическое скольжение)**

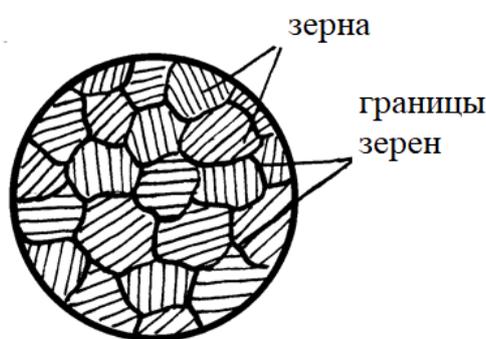


**Рис. 6. Схема влияния плотности дислокаций на сопротивление сдвигу**

С увеличением количества дислокаций (их плотности) пластичность сначала увеличивается, а затем начинает снижаться, рис. 6. Существуют механизмы и технологические методы, позволяющие управлять количеством дислокаций, а значит, и свойствами металлов.

*Объемные дефекты.* Основным объемным дефектом являются границы кристаллитов (зерен). Реальные металлы не представляют собой единого монокристалла и состоят из большого количества кристаллов (зерен) неправильной формы, рис. 7.

Параллельными линиями внутри каждого зерна условно показано направление атомных плоскостей.



**Рис. 7. Зеренная структура металла**

*Многозеренная* (поликристаллическая) структура металлов объясняется механизмом кристаллизации (затвердевания) металлов. Кристаллизация в обычных условиях начинается с образования большого количества центров (зародышей) кристаллизации. Сначала растущие кристаллы имеют правильную форму (огранку), затем по мере увеличения затвердевшей части эти кристаллы сталкиваются и «мешают» друг другу в формировании правильной огранки.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Чем отличаются кристаллические тела от аморфных?
2. Назовите свойства, характерные для металлов.
3. Назовите основные типы кристаллических решеток металлов.
4. Почему реальные металлы не могут иметь идеальную (бездефектную) кристаллическую решетку?
5. Охарактеризуйте основные типы несовершенств кристаллического строения.

## **1.2. ТИПЫ СПЛАВОВ**

Сплавами называют промышленные материалы, полученные сплавлением двух и более компонентов. Современная технология позволяет получать сплавы не только плавлением, но и другими способами: порошковой металлургией, диффузионным способом (пропитывание вещества в твердое тело при высоких температурах), плазменным напылением, электролизом.

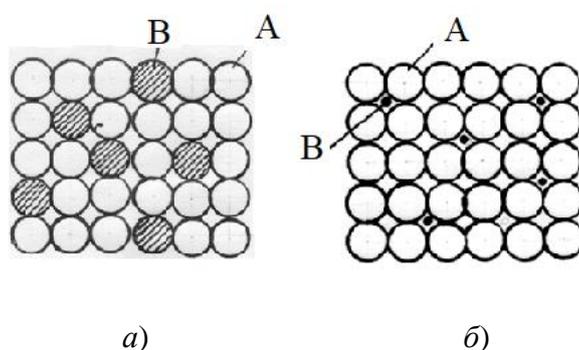
Различают следующие типы сплавов.

1. *Сплавы – твердые растворы.* Атомы растворенного элемента *B* размещаются в кристаллической решетке растворителя *A*. Можно ска-

зять, что сплавы – твердые растворы являются межатомными смесями. Атомы элемента *B* либо замещают атомы элемента *A* в узлах решетки, либо внедряются в междуузлия – поры. В первом случае сплавы называются твердыми растворами замещения, во втором – твердыми растворами внедрения. Растворимость может быть неограниченной для растворов замещения и ограниченной для тех и других. Твердые растворы принято обозначать буквами греческого алфавита:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и т.д.

Неограниченная растворимость наблюдается при условии, если кристаллические решетки обоих компонентов одинаковые (изоморфны) и атомные радиусы отличаются не более чем на 8%. При разнице в атомных диаметрах от 8 до 15% образуются сплавы – твердые растворы с ограниченной растворимостью. Если разница в атомных размерах превышает 15%, то твердые растворы не образуются, а формируются так называемые промежуточные фазы (химические соединения) или механические смеси кристаллов сплавляемых компонентов. На рисунке 8 показана атомно-кристаллическая структура твердых растворов.

Неограниченная растворимость наблюдается в сплавах: Cu + Al, Cu + Ni, Ge + Si, Fe + Ni и др.



**Рис. 8. Схема атомно-кристаллического строения твердого раствора:**

*a* – твердый раствор замещения; *б* – твердый раствор внедрения

Ограниченную растворимость имеют сплавы: Al + Cu, Sn + Sb, Cu + Sn, Fe + Si и др.

Из твердых растворов внедрения, имеющих промышленное значение, можно выделить системы: Fe + C, Fe + N, Fe + B.

2. *Промежуточные фазы (химические соединения)*. В настоящее время под промежуточными фазами понимают широкий класс сплавов, которые имеют собственный тип кристаллической решетки, отличающийся от решетки составляющих компонентов. Расположение атомов в этой решетке может быть полностью или частично упорядоченным. Пока нет установившейся классификации промежуточных фаз. Чаще всего их обозначают в виде химических формул, отражающих химический состав (стехиометрию): Fe<sub>3</sub>C, NbC, WC, W<sub>2</sub>C – карбиды, Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub>, CuZn, Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub> – электронные фазы, NbFe<sub>2</sub>, TiFe<sub>2</sub>, TiCr<sub>2</sub> – фазы Лавеса и т.д.

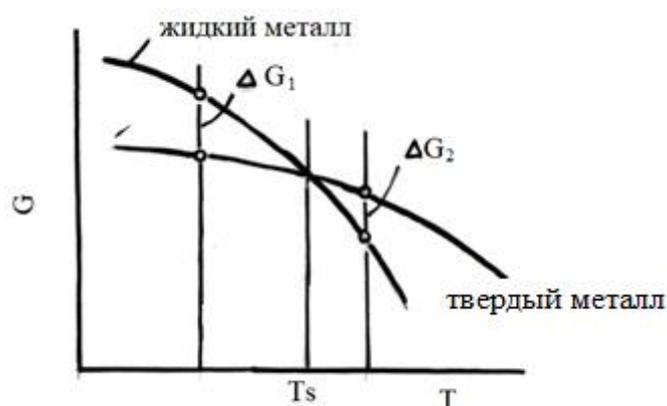
3. *Сплавы – механические смеси*. В природе не существует металлов, абсолютно не растворимых друг в друге в твердом состоянии. Поэтому правильнее было называть этот тип сплавов механическими смесями кристаллов разных твердых растворов, а не сплавами – механическими смесями кристаллов чистых металлов. К такому типу сплавов можно отнести системы Al + Si, Pb + Sb, Fe + Pb и др., где компоненты практически нерастворимы друг в друге.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислите основные типы сплавов.
2. Охарактеризуйте условия их образования.
3. Чем отличаются сплавы – твердые растворы от промежуточных фаз?

### 1.3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Самопроизвольная кристаллизация (затвердевание) обусловлена стремлением системы перейти в более устойчивое состояние с меньшим запасом свободной энергии (с меньшим значением термодинамического потенциала  $G$ ). На рисунке 9 показано изменение термодинамического потенциала для жидкого и кристаллического состояний в зависимости от температуры.



**Рис. 9.** Изменение термодинамического потенциала  $G$  для жидкого и твердого состояний в зависимости от температуры  $T$

Из рисунка видно, что при определенной температуре  $T_s$  термодинамические потенциалы жидкого и твердого состояний становятся равными. Эта температура называется теоретической температурой плавления (затвердевания). Выше этой температуры более выгодным является расплавленное состояние, так как расплав имеет меньшее значение термодинамического потенциала, по сравнению с кристаллическим, на величину  $\Delta G_2$ , а ниже  $T_s$  — более устойчивым будет твердое состояние.

*Понятия: компонент, фаза, структура, степень свободы.*

*Компоненты — вещества, входящие в сплав.*

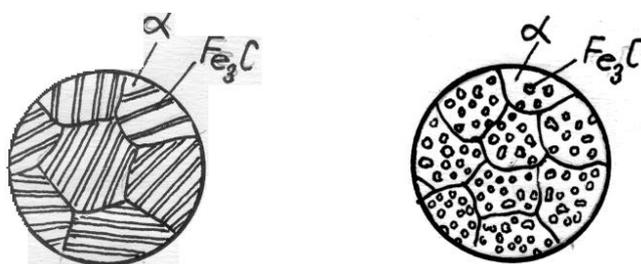
*Фаза* – часть сплава, ограниченная поверхностью раздела, при переходе через которую свойства меняются скачкообразно.

Пример: кристаллизация чистого металла. В процессе кристаллизации участвуют две фазы: жидкая и кристаллы чистого компонента.

*Структура* – количественное и качественное распределение фаз в сплаве. На рисунке 10 показаны микроструктуры одного и того же сплава железа с 0,8% С после разной термообработки.

Видно, что форма и распределение одних и тех же фаз разные, т.е. хотя фазовый состав на рис. 10, а, б один и тот же ( $\alpha$  и  $Fe_3C$ ), микроструктуры отличаются друг от друга.

*Степень свободы* – это количество внутренних (концентрация) и внешних (температура, давление) факторов, которые можно изменять без изменения числа фаз, находящихся в равновесии. Число степеней свободы выражается в математической форме и называется правилом фаз Гиббса. Правило фаз Гиббса может предсказать, как будет происходить процесс кристаллизации (плавления) при постоянной температуре или в интервале температур, и указывает, кроме того, сколько фаз может участвовать в процессе. Обычно правило фаз Гиббса записывается в следующем виде:  $C = K - \Phi + 1$  для случая, если процессы идут при постоянном давлении, где  $C$  – число степеней свободы,  $K$  – число компонентов в сплаве,  $\Phi$  – число фаз.



**Рис. 10.** Микроструктура сплава железа с 0,8% С после разной термообработки:

$\alpha$  – твердый раствор углерода в  $Fe_\alpha$ ;  $Fe_3C$  – химическое соединение, карбид железа

Пример 1: затвердевание чистого металла.

В процессе кристаллизации участвуют две фазы: жидкая и твердая (кристаллы чистого металла):

$$C = K - \Phi + 1 = 1 - 2 + 1 = 0.$$

Это говорит о том, что кристаллизация чистого металла должна проходить при неизменной температуре: до тех пор, пока весь металл не затвердеет, температура будет оставаться постоянной.

Пример 2: затвердевание двухкомпонентного сплава – твердого раствора. Количество фаз две – жидкая фаза и кристаллы твердого раствора:

$$C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1.$$

Так как  $C = 1$ , то термодинамика «разрешает» кристаллизацию в интервале температур.

## **1.4. ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ (РАВНОВЕСИЯ) ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ**

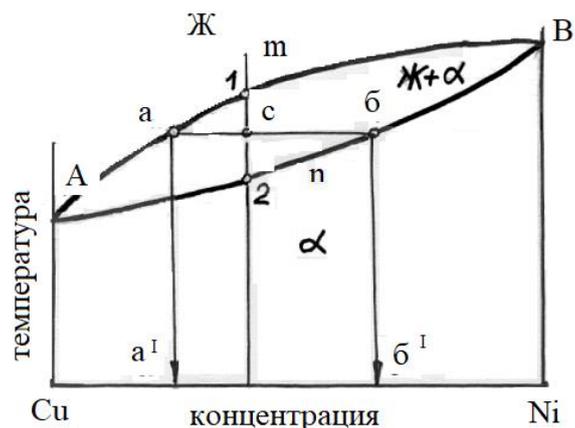
Диаграмма состояния показывает состояние каждого сплава данной системы при любой температуре. Зная диаграмму состояния, можно описать физические и технологические свойства любого сплава и прогнозировать область их применения.

Диаграммы состояния строятся экспериментально в координатах температура–концентрация компонентов.

### **1.4.1. Основные равновесные диаграммы состояния двойных сплавов**

*Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых неограниченно растворимы в твердом и жидком состояниях*

Такая диаграмма изображена на рис. 11. Так как диаграммы строятся экспериментально, то многие геометрические построения на диаграмме имеют определенный физический смысл.



**Рис. 11. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях:**

Ж – расплав,  $\alpha$  – кристаллы твердого раствора Ni в Cu или Cu в Ni, в зависимости от того, какой компонент является растворителем

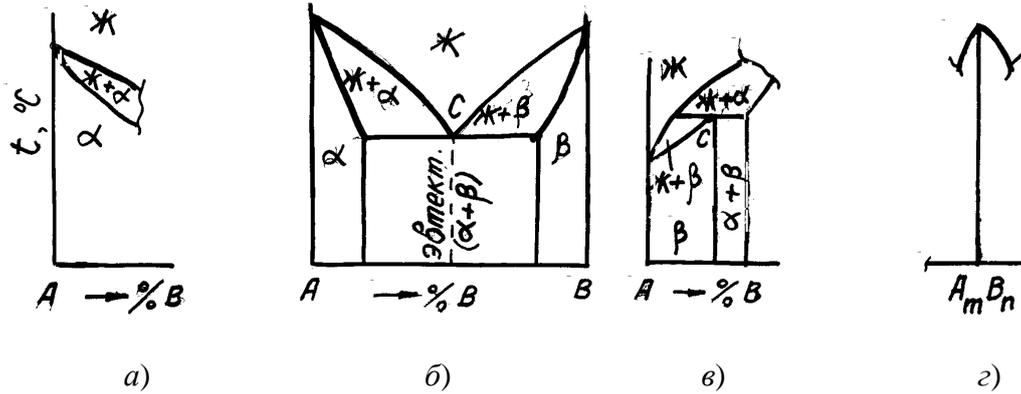
На этой диаграмме линия  $AmB$  называется ликвидусом или температурной линией начала затвердевания сплавов. Линия  $AnB$  – солидус, или линия окончания затвердевания сплавов.

При анализе диаграмм состояния сплавов полезно усвоить некоторые формальные правила заполнения диаграмм состояния:

- 1) в любой из областей диаграммы двухкомпонентных сплавов не может быть более двух фаз;
- 2) рядом с двухфазной областью (слева и справа!) всегда располагаются однофазные, рис. 11;
- 3) в двухфазной области существуют те же фазы, что и в прилегающих к ней однофазных областях.

Некоторые характерные признаки типичных диаграмм состояния показаны на рис. 12.

По диаграмме состояния можно проследить за фазовыми превращениями любого сплава, а также определить концентрацию (химический состав) фаз и количественное соотношение их при любой температуре. С этой целью применяют правило отрезков.



**Рис. 12. Геометрические признаки типичных диаграмм состояния:**

- a* – диаграмма с твердыми растворами;
- б* – диаграмма с эвтектикой (на горизонтальной линии имеется точка, от которой вверх отходят две линии);
- в* – диаграмма с перитектикой (на горизонтальной линии есть точка, от которой отходят две линии вниз);
- г* – диаграмма с промежуточной фазой (химическим соединением)

В качестве примера рассмотрим сплав I, рис. 11. Этот сплав начинает затвердевание при температуре точки 1, а заканчивает кристаллизацию при температуре точки 2. При дальнейшем охлаждении фазовых превращений не происходит, так как не пересекаются никакие линии.

Рассмотрим состояние сплава I при температуре точки *c*. При этой температуре сплав состоит из двух фаз: жидкой (ж) и кристаллов твердого раствора  $\alpha$ . Чтобы определить количественное соотношение фаз (сколько затвердело и сколько еще в жидком состоянии), необходимо через точку *c* провести горизонтальную линию *acb* до границ области. Если величину отрезка *ab* принять за единицу сплава (или за 100%), то отрезок *ac* покажет количество  $\alpha$ -кристаллов (твердая фаза), а отрезок *cb* – количество жидкой (незатвердевшей) части сплава. Эти соотношения можно выразить в процентах:

$$\%Q_{ж} = \frac{cb}{ab} 100\% \quad \text{и} \quad \%Q_{\alpha} = \frac{ac}{ab} 100\%,$$

где  $\%Q_{ж}$  и  $\%Q_{\alpha}$  – количество жидкой и твердой фаз в %.

Концентрация компонентов Cu и Ni в жидкой фазе определяется точкой  $a'$  (проекцией точки  $a$  на ось концентраций), а содержание Cu и Ni в  $\alpha$ -кристаллах укажет точка  $b'$  (проекция точки  $b$  на ось концентраций).

*Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику*

Такая диаграмма изображена на рис. 13 (на примере сплавов Al–Si).

На этой диаграмме линия ACB – ликвидус, линия ADCEB – солидус, FD – линия ограничения растворимости Si в  $\alpha$ -растворе, линия EG – линия ограничения растворимости Al в  $\beta$ -растворе. Линия DCE называется эвтектической. Анализ диаграммы начинается с заполнения областей фазами, используются правила, указанные выше. В этой системе имеются сплавы (между точками Д и Е), в которых часть незатвердевшей жидкости кристаллизуется с участием трех фаз. Поэтому в соответствии с правилом фаз Гиббса такая реакция должна протекать при постоянной температуре. Рассмотрим кристаллизацию одного из таких сплавов, например, сплава I.

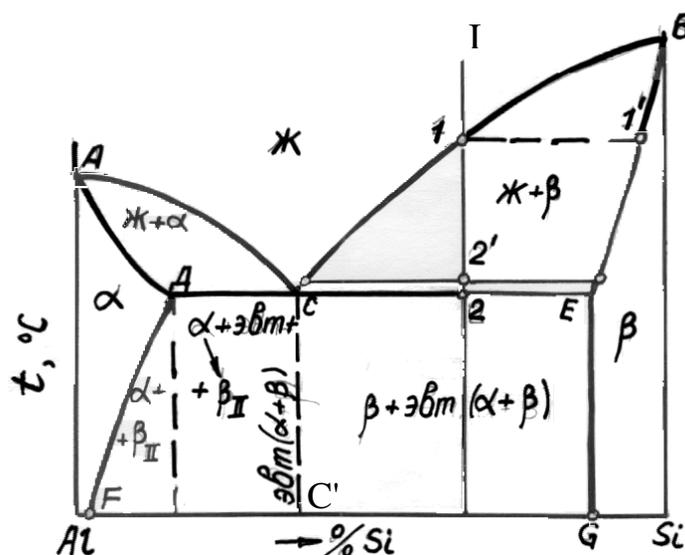


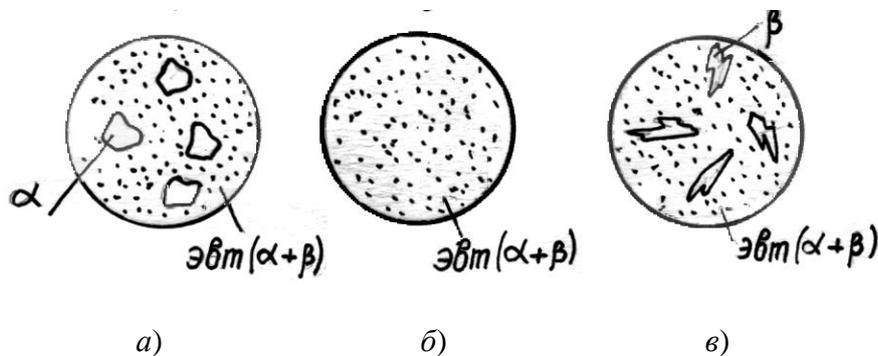
Рис. 13. Диаграмма состояния сплавов Al–Si (схема):

$\alpha$  – твердый раствор Si в Al;  $\beta$  – твердый раствор Al в Si

В точке  $I$  начинается кристаллизация  $ж \rightarrow \beta$ . С понижением температуры количество жидкой фазы уменьшается, а количество  $\beta$ -кристаллов увеличивается. Концентрация компонентов  $Al$  и  $Si$  в жидкой фазе изменяется в направлении  $I \rightarrow C$ , а концентрация их в твердой фазе ( $\beta$ ) изменяется  $I \rightarrow E$ . При достижении температуры линии ДСЕ в сплаве  $I$  и ему подобных сплавах сохраняется определенное количество жидкой фазы. Количество незатвердевшей части в сплаве  $I$  определится отрезком  $2E$  (по правилу отрезков). Оставшаяся жидкость во всех сплавах, пересекающих линию ДСЕ, имеет одинаковый состав, определяемый проекцией точки  $C$  на ось концентраций ( $C'$ ). Жидкость такого состава затвердеет при неизменной температуре в мелкую механическую смесь кристаллов  $\alpha + \beta$  по реакции  $ж_C \rightarrow (\alpha + \beta)$ . Эта реакция называется эвтектической (одна фаза превращается в две новые), а структуру, полученную в результате эвтектической реакции, называют эвтектикой.

Таким образом, в сплавах, пересекающих линию ДСЕ при охлаждении в момент окончания затвердевания, получится структура:

а) в сплавах, расположенных между точками  $D$  и  $C$  –  $\alpha +$  эвтектика ( $\alpha + \beta$ ), рис. 14, *a*);



**Рис. 14. Типичные структуры сплавов, содержащих эвтектику:**

*a* – доэвтектические сплавы; *b* – эвтектический сплав; *c* – заэвтектические сплавы

б) в сплавах, расположенных между точками С и Е –  $\beta$  + эвтектика ( $\alpha + \beta$ ), рис. 14, в);

в) в сплаве состава С образуется 100% эвтектики, рис. 14, б).

В сплавах, расположенных левее точки Д и правее точки Е, эвтектики не будет.

В сплавах, лежащих левее точки Д, наблюдаются два типа структуры:

а) левее точки F располагаются однофазные сплавы со структурой  $\alpha$  – твердого раствора разного состава, рис. 15, а);

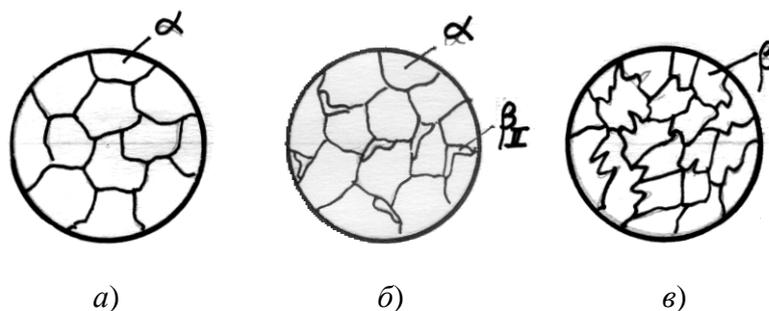
б) между концентрационными точками F и Д существуют двухфазные сплавы, имеющие структуру  $\alpha + \beta_{II}$ ; вторичные кристаллы появляются из-за уменьшения растворимости Si в  $\alpha$ -растворе ниже температуры линии FD, рис. 15, б);

в) правее точки G находятся однофазные сплавы – твердые растворы ( $\beta$ ) на основе кристаллической решетки кремния, рис. 15, в).

#### *Диаграмма состояния с перитектикой*

Перитектическая диаграмма изображена на рис. 16. Компоненты Sn и Sb выбраны условно.

Линия ACB – ликвидус, линия ADEB – солидус, линия CDE – линия перитектической реакции, DF и EG – линии ограничения растворимости.



**Рис. 15. Микроструктура сплавов системы Al + Si, не содержащих эвтектики**

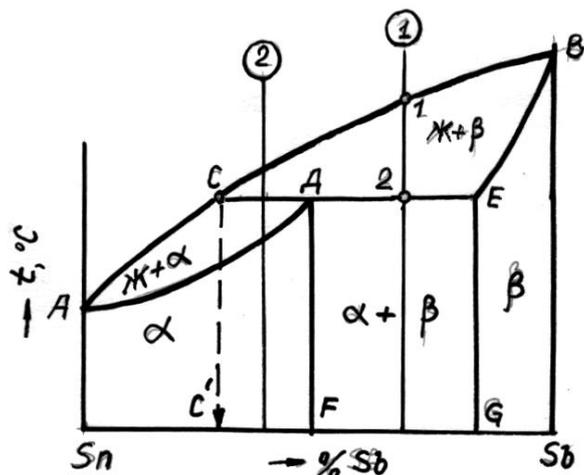


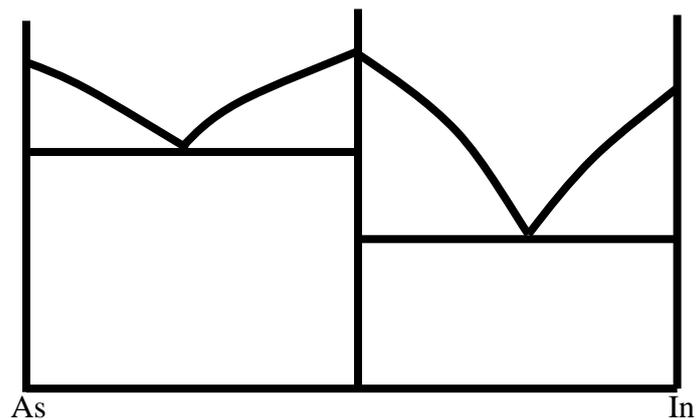
Рис. 16. Диаграмма с перитектикой:

$\alpha$  – твердый раствор Sb в Sn;  $\beta$  – твердый раствор Sn в Sb

Используя правила, заполним диаграмму состояниями фазами (предполагается студентам сделать это самостоятельно). Рассмотрим кристаллизацию одного из сплавов, например, сплава I. В этом сплаве кристаллизация начинается при температуре точки 1 с выделения кристаллов  $\beta$  – твердого раствора ( $\text{ж} \rightarrow \beta$ ) и продолжается до точки 2. К этой температуре сохраняется жидкая фаза, количество которой определится отрезком 2E. Состав этой жидкости определится проекцией точки C на ось концентраций (C'). В точке 2 начнется перитектическая реакция  $\text{ж}_C + \beta \rightarrow \alpha + \beta$ : две фазы ( $\text{ж} + \beta$ ) реагируют друг с другом и образуют кристаллы новой фазы ( $\alpha$ ). В рассматриваемом сплаве кристаллов  $\beta$  оказалось больше, чем надо для реакции и они остались в избытке. Студентам предлагается описать перитектическую реакцию для сплавов типа II, и указать сплав, в котором перитектическая реакция идет без остатка.

*Диаграмма состояния с промежуточными фазами (рис. 17).*

Студентам предлагается заполнить эту диаграмму самостоятельно.



**Рис. 17. Диаграмма состояния с промежуточными фазами**

Указания: эта диаграмма состоит из двух элементарных эвтектических диаграмм. Каждую диаграмму можно рассматривать отдельно, считая в таком случае компонентами  $As + InAs$  и  $InAs + In$ .

### **1.5. СВЯЗЬ СВОЙСТВ СПЛАВОВ С ТИПОМ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ (ЗАКОНОМЕРНОСТИ КУРНАКОВА)**

Зависимость физических свойств – твердость  $H$ , электросопротивление  $\rho$  показаны на рис. 18.

В сплавах с неограниченной растворимостью свойства изменяются по криволинейной зависимости от состава сплавов. Максимальные свойства (максимум на кривой зависимости свойств) наблюдается, как правило, при 50% (атомных) компонентов. В двухфазной области зависимость свойств от концентрации компонентов линейная.

Зная фазовый состав сплавов, можно с достаточной для практики точностью прогнозировать технологические свойства.

Самой высокой пластичностью обладают обычно однофазные сплавы, но они плохо обрабатываются резанием, так как образуют из-за большой пластичности витую стружку. Поэтому в изделиях из таких сплавов трудно получить высокое качество поверхности.

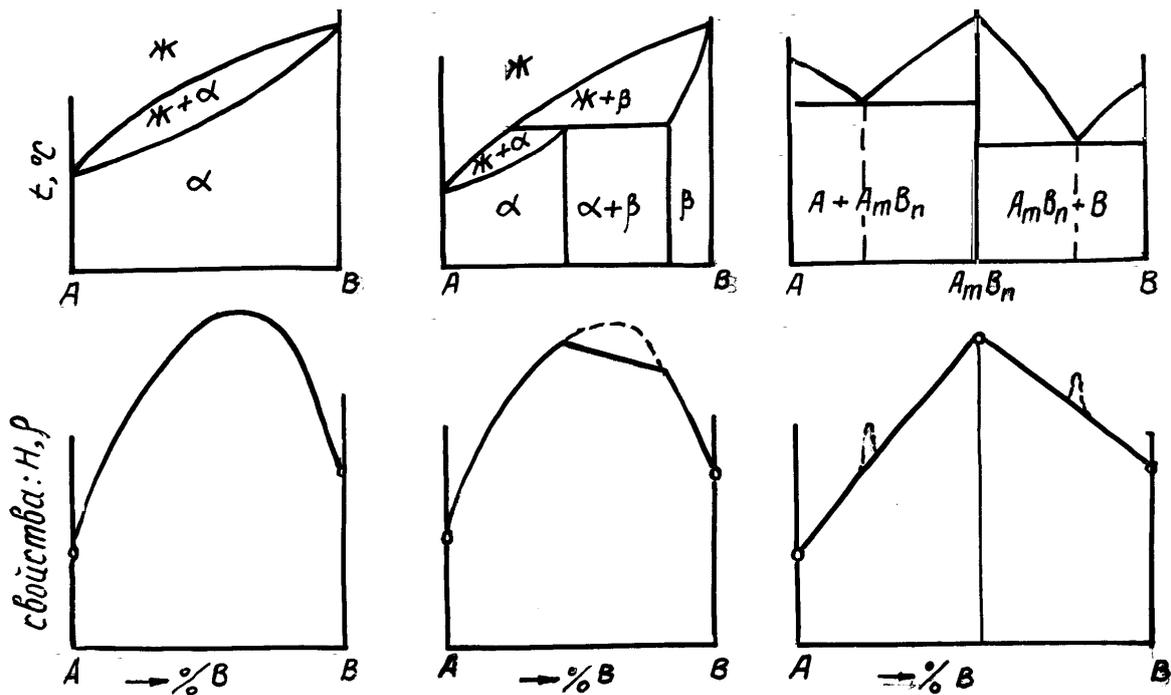


Рис. 18. Зависимость свойств сплавов от типа диаграммы состояния:

$H$  – твердость;  $\rho$  – удельное электросопротивление

Кроме этого, большинство однофазных сплавов имеют неудовлетворительные литейные свойства.

Двухфазные сплавы имеют меньшую пластичность, поэтому их можно подвергать только горячей обработке давлением. Однако эти сплавы хорошо обрабатываются резанием. Обработкой резанием в них можно добиться очень малой шероховатости поверхности. Большинство двухфазных сплавов имеют низкий коэффициент трения, поэтому многие из них применяют в качестве подшипников скольжения и других сопряженных деталей, например в парах. Двухфазные сплавы имеют удовлетворительные литейные свойства; наилучшими литейными свойствами обладают эвтектические сплавы и сплавы, содержащие эвтектику.

## Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте понятия: компонент, фаза, структура, степень свободы.
2. Какие процессы происходят в сплавах на линиях ликвидус и солидус?
3. Назовите максимальное количество фаз в любой из областей диаграммы состояния.
4. Сколько фаз может быть в областях, прилегающих слева и справа к двухфазной области?
5. Какие процессы происходят в сплавах при пересечении ими в процессе охлаждения горизонтальных линий на диаграммах состояния?
6. Что такое эвтектическая (перитектическая) реакция?
7. Сравните физические и технологические свойства однофазных и двухфазных сплавов и сплавов – химических соединений. Какие из этих сплавов самые пластичные и какие самые твердые (хрупкие)?

### *Типовые задачи*

Для закрепления пройденного материала и получения зачета решите следующие типовые задачи.

1. Кристаллизация (затвердевание) чистого металла. Применив правило фаз Гиббса, покажите, как затвердевает чистый металл: в интервале температур или при постоянной температуре.
2. Двухкомпонентный сплав затвердевает в интервале температур. Применив правило фаз Гиббса, скажите, сколько фаз участвует в процессе кристаллизации?
3. Двухкомпонентный сплав затвердевает по реакции:  $ж \rightarrow \alpha + \beta$ . Применив правило фаз, ответьте, как затвердевает этот сплав: при постоянной температуре или в интервале температур?

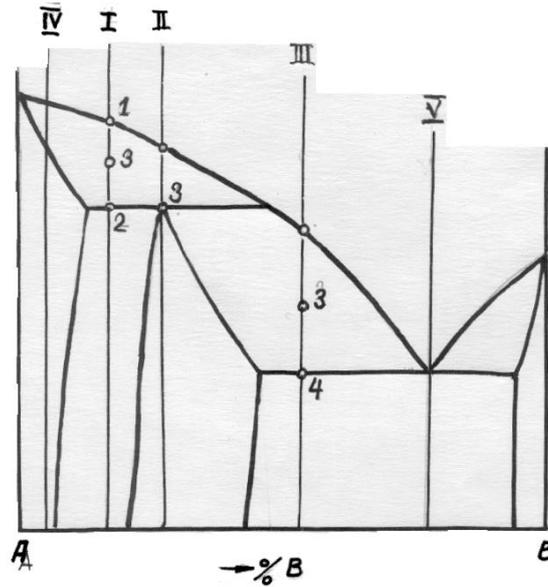


Рис. 19. Диаграмма состояния сплавов  $A + B$

4. Заполните диаграмму состояния сплавов из компонентов  $A$  и  $B$ , фазами и структурными составляющими, рис. 19.

4.1. В сплаве I при температуре  $t_3$  покажите, как определить количество жидкой фазы  $Q_{ж}$  и количество твердой фазы  $\alpha$ .

4.2. Напишите реакцию, происходящую в сплаве II в  $t_3$  при охлаждении.

4.3. В сплаве III в  $t_3$  покажите, как определить концентрацию компонентов  $A$  и  $B$  в жидкой и твердой фазах.

4.4. Из сплавов IV и I выберите (обоснуйте) сплавы для холодной листовой штамповки и изготовления втулки – подшипника скольжения.

4.5. Из сплавов I – V выберите сплав, обладающий наилучшими литейными свойствами для изготовления поршня методом литья.

4.6. Покажите, как определить количество эвтектики в сплаве III при комнатной температуре.

4.7. Сравните коррозионную стойкость сплавов IV и I.

4.8. Напишите реакцию, происходящую в сплаве III при температуре  $t_4$ .

## 2. ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

*Деформация* – изменение размеров и формы твердого тела под действием внешних сил.

Различают упругую и пластическую деформацию. После окончания действия внешних сил упругие деформации исчезают, а пластические остаются.

В расчетах на прочность деталей машин и конструкций пользуются следующими показателями свойств:  $\sigma_{\text{упр}}$ ,  $\sigma_{\text{T}}$  и  $\sigma_{\text{в}}$ , которые являются стандартными характеристиками прочности. Напряжения  $\sigma_{\text{упр}}$ ,  $\sigma_{\text{T}}$  и  $\sigma_{\text{в}}$  получаются делением соответствующей нагрузки ( $P_{\text{упр}}$ ,  $P_{\text{T}}$  и  $P_{\text{max}}$ ) на начальную площадь поперечного сечения стандартного образца.

Истинный предел упругости материала определить очень трудно, поэтому на практике за предел упругости принимают напряжение, при котором пластическая деформация достигает очень малой величины. Чаще всего используется значение остаточной деформации 0,001; 0,005; 0,02; 0,05%. Соответствующие пределы упругости обозначаются  $\sigma_{0,005}$ ;  $\sigma_{0,02}$  и т.д.

Предел упругости – важная характеристика, которая применяется при расчете упругих элементов: пружин, рессор и т.д.

Предел текучести (условный) – это напряжение, которое вызывает остаточную деформацию 0,2% и обозначается как  $\sigma_{0,2}$ .

Предел прочности или временное сопротивление  $\sigma_{\text{в}}$  – это напряжение, вызывающее разрушение материала.

*Относительное удлинение  $\delta$  и относительное  $\psi$  сужение* характеризуют пластичность материала:

$$\delta \% = [(I_k - I_0) / I_0] 100;$$

$$\psi \% = [(F_0 - F_k) / F_0] 100.$$

где  $I_0$  и  $F_0$  – начальные длина и площадь поперечного сечения стандартного образца;  $I_k$  – конечная длина;  $F_k$  – площадь поперечного сечения в месте разрыва.

Ударная вязкость  $KC$  характеризует сопротивление материала ударному разрушению; это есть работа ударного разрушения единицы сечения стандартного образца с концентратором напряжения – надрезом:

$$KC = K/S_0,$$

где  $K$  – работа разрушения МДЖ;  $S_0$  – площадь поперечного сечения  $m^2$  в месте концентратора.

В зависимости от типа концентратора ударная вязкость может обозначаться как  $KCU$ ,  $KCV$ ,  $KCT$ . Буквы  $U$ ,  $V$ ,  $T$  указывают на тип концентратора напряжений:  $U$ -образный с радиусом 1 мм,  $V$ -образный с радиусом 0,25 мм и  $T$  – трещина усталости. Чаще всего используется концентратор  $U$ -типа.

## 2.1. МЕХАНИЗМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Основной механизм пластической деформации (сдвиг одной части кристалла относительно другой) – движение дислокации под действием напряжений сдвига ( $\tau_{кр}$ ). На рисунке 20 показано перемещение (скольжение) одиночной краевой дислокации.

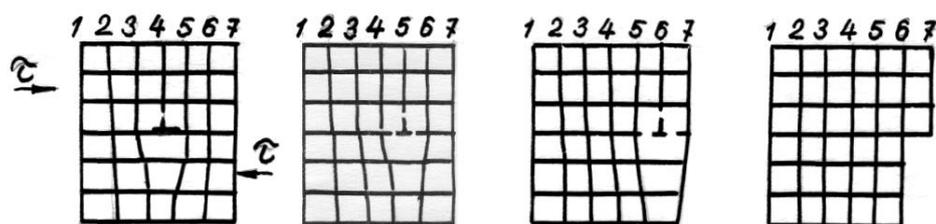


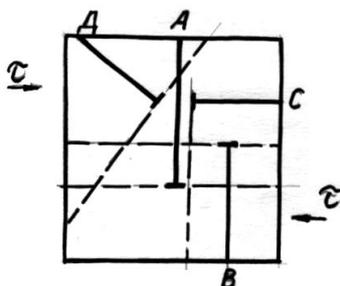
Рис. 20. Скольжение одиночной краевой дислокации

Если бы в кристалле не было дислокаций, то сопротивление сдвигу было бы в 1000 раз больше, чем наблюдается в реальных кристаллах с дислокациями. Дислокации облегчают протекание пластической деформации. В процессе деформации дислокации могут размножаться, а при достижении их  $10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$  они уже начинают мешать друг другу при скольжении и сопротивление пластической деформации ( $\tau$ ) с этого момента увеличивается, т.е. металл упрочняется.

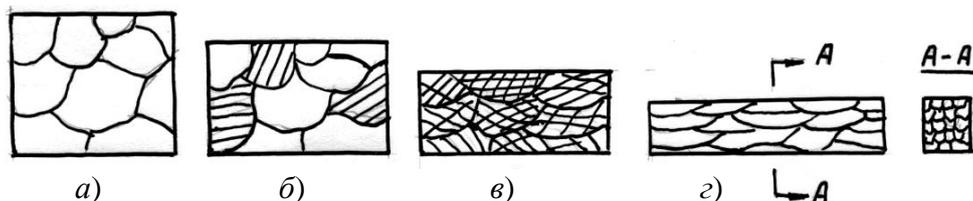
Дислокации могут располагаться в невыгодных для скольжения кристаллографических плоскостях, рис. 21. Для их перемещения потребуются более высокие значения  $\tau$ .

Из рисунка 21 видно, что наименьшие напряжения  $\tau$  вызовут перемещение дислокаций А и В. Для перемещения дислокации Д потребуются более высокие значения напряжений сдвига, а дислокация С при указанной схеме нагружения ( $\tau$ ) вообще будет лишена возможности перемещаться.

При холодной пластической деформации поликристаллического металла деформация начинается не во всех зернах, а лишь в тех, которые благоприятно расположены к направлению сдвиговых напряжений. По мере роста напряжений в деформацию постепенно вовлекается



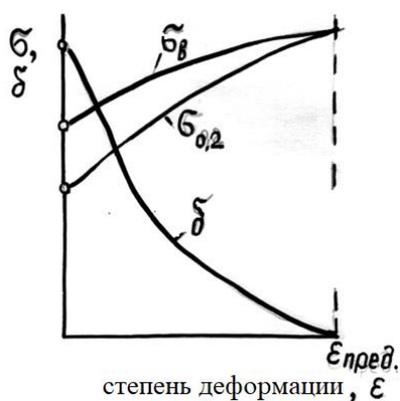
**Рис. 21. Расположение краевых дислокаций в равных кристаллографических плоскостях (схема)**



**Рис. 22. Изменение микроструктуры металла при холодной пластической деформации (схема):**  
 $a - \varepsilon = 0\%$ ;  $b - \varepsilon \approx 1\%$ ;  $v - \varepsilon \approx 40\%$ ;  $z - \varepsilon \approx 80...90\%$

все большее количество зерен металла. Форма зерен в результате пластической деформации изменяется: они вытягиваются в направлении пластического течения. Внутри зерен возрастает плотность дислокаций и других дефектов кристаллического строения. Металл приобретает выраженное волокнистое строение (текстурованность). Границы зерен различаются с трудом, рис. 22.

С увеличением степени деформации растут прочностные характеристики: твердость НВ, прочность  $\sigma_B$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и упругости  $\sigma_{упр}$ , но сжимаются пластические характеристики:  $\delta$ ,  $\psi$  и КС, рис. 23.



**Рис. 23. Зависимость свойств поликристаллического металла от степени деформации:**

$\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести;  $\delta$  – относительное удлинение

Изменение структуры и свойств, вызванные холодной пластической деформацией, называется *наклепом*.

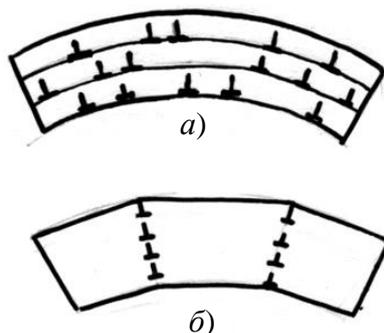
С наклепом связано изменение и других свойств. С увеличением степени деформации растут электрическое сопротивление и коэрцитивная сила, понижаются магнитная индукция и магнитная проницаемость, ухудшается коррозионная стойкость, улучшается обрабатываемость резанием таких пластических материалов, как латуни, сплавы на основе алюминия и др.

Структура, полученная в результате пластической деформации, является неравновесной и остается устойчивой только до определенной температуры, называемой температурой рекристаллизации ( $T_{рек}$ ):  $T_{рек} \approx aT$ . Для очень чистых металлов коэффициент  $a \leq 0,3$ . Для промышленных сплавов  $a \approx 0,4$ . Температуру рекристаллизации принято считать температурной границей между холодной и горячей обработкой давлением. Переход наклепанного металла в равновесное состояние при нагреве происходит следующим образом:

*Возврат* – изменение тонкой структуры внутри зерен наклепанного металла; размер и форма зерен сохраняются. Возврат в свою очередь может состоять из двух стадий:

*а – отдых*, на этой стадии снижаются внутренние напряжения, уменьшается количество точечных дефектов, и снижается плотность дислокаций в основном за счет взаимодействия дислокаций разных знаков; снижается твердость и увеличивается пластичность хотя и незначительно ( $\leq 10\%$ );

*б – полигонизация*, сопровождается образованием внутри каждого зерна новых малоугловых границ за счет скольжения и переползания дислокаций; в результате зерно разделяется на субзерна – полигоны почти полностью свободные от дислокаций, рис. 24.



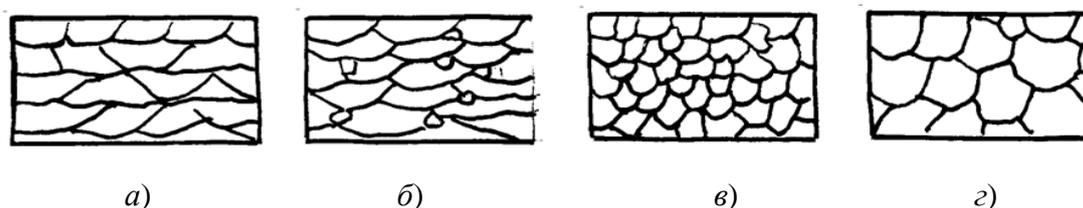
**Рис. 24. Схема полигонизации:**

*a, б* – наклепанный металл до и после полигонизации соответственно

При полигонизации продолжают снижаться твердость и прочность, возрастает пластичность.

Рекристаллизация связана с зарождением и ростом новых более совершенных зерен. Рекристаллизация наступает не в любом наклепанном металле, а только в случае, если степень деформации превышает критическую степень. Для разных металлов она различна и находится в пределах 2...8% (для алюминия ~2%, для железа ~7% , для меди ~5%). При степени деформации меньше критической восстановление свойств ограничивается стадией полигонизации. Полигональная структура является очень устойчивой и сохраняется почти до температуры плавления.

Схема изменения структуры при рекристаллизации изображена на рис. 25.



**Рис. 25. Схема рекристаллизации наклепанного металла:**

*a* – наклепанный металл; *б* – начало первичной рекристаллизации (зарождение новых зерен); *в* – завершение первичной рекристаллизации; *г* – вторичная рекристаллизация (рост зерен)

## Вопросы для самоконтроля

1. Назовите и охарактеризуйте показатели механических свойств металлов ( $\sigma_{в}$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ , HB).

2. Опишите дислокационный механизм пластической деформации.

3. Как и за счет чего изменяются свойства металла при пластической деформации? Как изменяется микроструктура (изобразите схему)?

4. Что такое наклеп?

5. Назовите температурную границу между холодной и горячей пластической деформацией.

6. Охарактеризуйте процессы, происходящие при нагреве наклепанного металла:

а) что такое возврат?

б) что такое полигонизация?

в) что такое рекристаллизация?

7. Как изменяются при нагреве следующие свойства:

а) коэрцитивная сила (сплавы на основе железа);

б) остаточная магнитная индукция (сплавы на основе железа);

в) электросопротивление;

г) коррозионная стойкость;

д) обрабатываемость резанием.

8. При холодной пластической деформации металлов и сплавов заметно снижается пластичность. Рекомендуйте способ и укажите режим восстановления пластичности Cu ( $t_{пл} \approx 1083 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и Fe ( $t_{пл} \approx 1540 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

### 3. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Железоуглеродистые сплавы и сплавы на основе железа являются основным конструкционным материалом для изготовления деталей машин и элементов конструкций. Поэтому диаграмма железо–углерод имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение.

*Компоненты, фазы и структурные составляющие в сплавах железа с углеродом*

Железо существует в двух кристаллических модификациях:  $Fe_{\alpha}$  с решеткой ОЦК и  $Fe_{\gamma}$  – с решеткой ГЦК.  $Fe_{\alpha}$  существует в интервалах температур ниже 910 и от 1396 °С до температуры плавления 1539 °С. Железо до температуры 768 °С (точка Кюри) ферромагнитно.

Углерод может присутствовать в сплавах на основе железа в двух формах: в виде графита и в виде  $Fe_3C$ . Фазами являются: жидкий раствор (расплав), феррит, аустенит, цементит и свободный углерод в виде графита.

*Феррит* (Ф или  $\alpha$ ) – твердый раствор внедрения углерода в  $Fe_{\alpha}$ . Феррит способен растворить очень незначительное количество углерода. Например, максимальная растворимость углерода при температуре 730 °С составляет всего 0,02% С, с понижением температуры растворимость уменьшается, и при комнатной температуре в феррите остается лишь тысячные доли процента углерода.

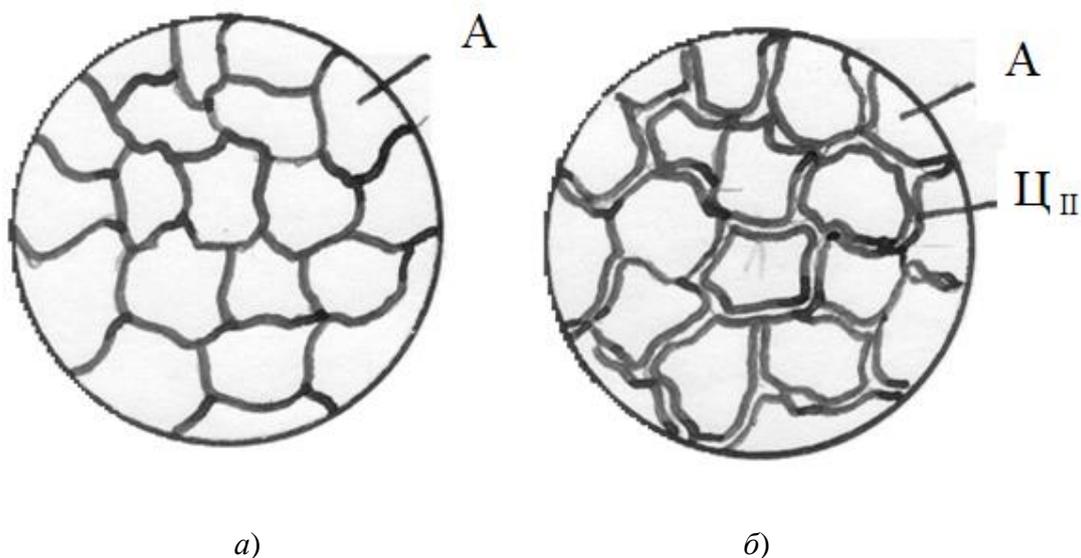
Феррит – очень мягкая составляющая, имеющая твердость 80...100 НВ (в новой системе единиц 800...1000 МПа),  $\sigma_{\text{в}} \approx 300$  МПа (30 кгс/мм<sup>2</sup>),  $\delta \approx 40\%$ .

*Цементит* (Ц или  $Fe_3C$ ) – химическое соединение, содержит около 6,67% С. Цементит хрупок и имеет очень высокую твердость

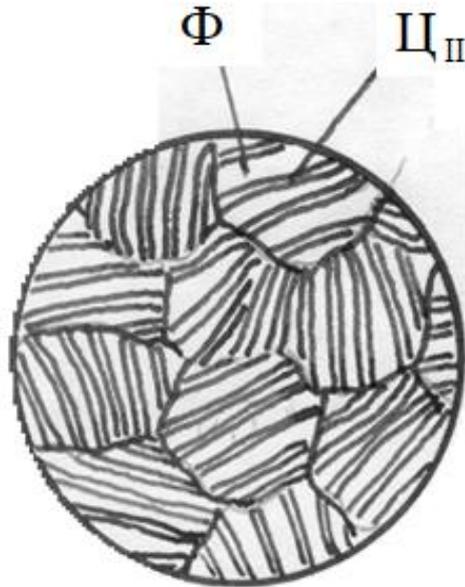
~800 НВ (или в новой системе единиц 8000 НВ, МПа). Температура плавления цементита точно не установлена из-за того, что при нагреве он способен распадаться на  $Fe_\gamma$  и графит. Принято считать, что температура плавления цементита находится в районе 1260 °С.

*Аустенит* (А или  $\gamma$ ) – твердый раствор внедрения углерода в  $Fe_\gamma$ . Максимальная растворимость углерода 2,0% наблюдается при температуре 1130 °С (точка Е на диаграмме железо – углерод). С понижением температуры растворимость углерода уменьшается, и он выделяется по границам зерен аустенита, но не в чистом виде, а в виде цементита  $Ц_{II}$ , рис. 26. В результате содержание углерода в аустените снижается и при температуре 730 °С (линия PSK на диаграмме) становится равной 0,83% С.

Ниже линии PSK (730 °С аустенит существовать не может, он превращается в новую структурную составляющую перлит  $\Pi$  по реакции  $A_{0,8\%C} \rightarrow \Pi (\Phi + Ц)$ .



**Рис. 26. Микроструктура сплава Fe + 2% С при температурах:**  
*a* – 1130 °С; *б* – 730 °С



**Рис. 27. Микроструктура пластинчатого перлита  
в сплаве Fe + 0,8% C**

Эта реакция похожа на эвтектическую, но протекающую в твердом состоянии, поэтому ее назвали эвтектоидной (подобной эвтектической), а продукт эвтектоидного превращения – перлит иногда называют эвтектоидом. Превращение аустенита в перлит происходит при неизменной температуре (при очень медленном охлаждении) в соответствии с правилом фаз Гиббса.

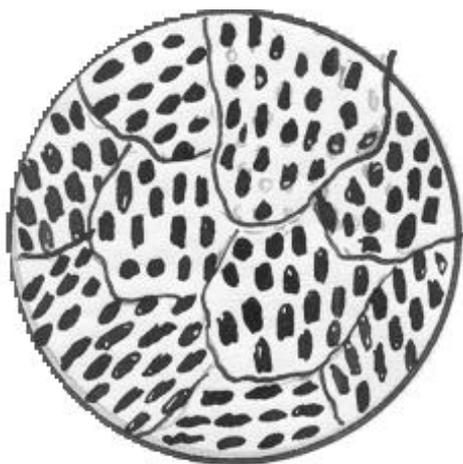
Перлит – мелкая пластинчатая смесь феррита и цементита, содержит ~0,83% углерода, рис. 27.

Твердость перлита около 180...200 НВ (1800...2000 НВ, МПа).

*Ледебурит* (Л) – эвтектика, образуется из жидкости, содержащей 4,3% С, при температуре линии ECF (~1130 °С) диаграммы состояния по реакции:



Процесс кристаллизации ледебурита происходит при постоянной температуре, так как число степеней свободы для этого процесса  $C = 0$ . ( $C = k - f + 1 = 2 - 3 + 1 = 0$ ).



**Рис. 28. Микроструктура сплава Fe +4,3% C, ледебурит (превращенный)**

Ниже линии PSK ледебурит будет иметь другой фазовый состав Л' (П + Ц), так как в нем при температуре линии PSK (730 °С) произойдет эвтектоидная реакция  $A \rightarrow П (Ф + Ц)$ . Ледебурит, состоящий из перлита и цементита, называют превращенным, рис. 28. Ледебурит хрупкая структурная составляющая и имеет высокую твердость ~400 НВ (4000 НВ, МПа).

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов до 6,67% С (до  $Fe_3C$ ) показана на рис. 29.

При изучении диаграммы состояния Fe +  $Fe_3C$  обратите внимание на то, что она состоит из элементарных диаграмм состояния:

а) перитектической – левый верхний угол (горизонтальная линия HJB, и от точки J отходят две линии вниз);

б) эвтектической – горизонтальная линия ECF и от точки C вверх отходят линии CB и CD;

в) эвтектоидной (подобной эвтектической) – горизонтальная линия PSK, от точки S отходят две линии вверх.

Важно вспомнить правила заполнения фазами областей диаграммы состояния (в любой из областей не должно быть больше двух фаз и т.д.).

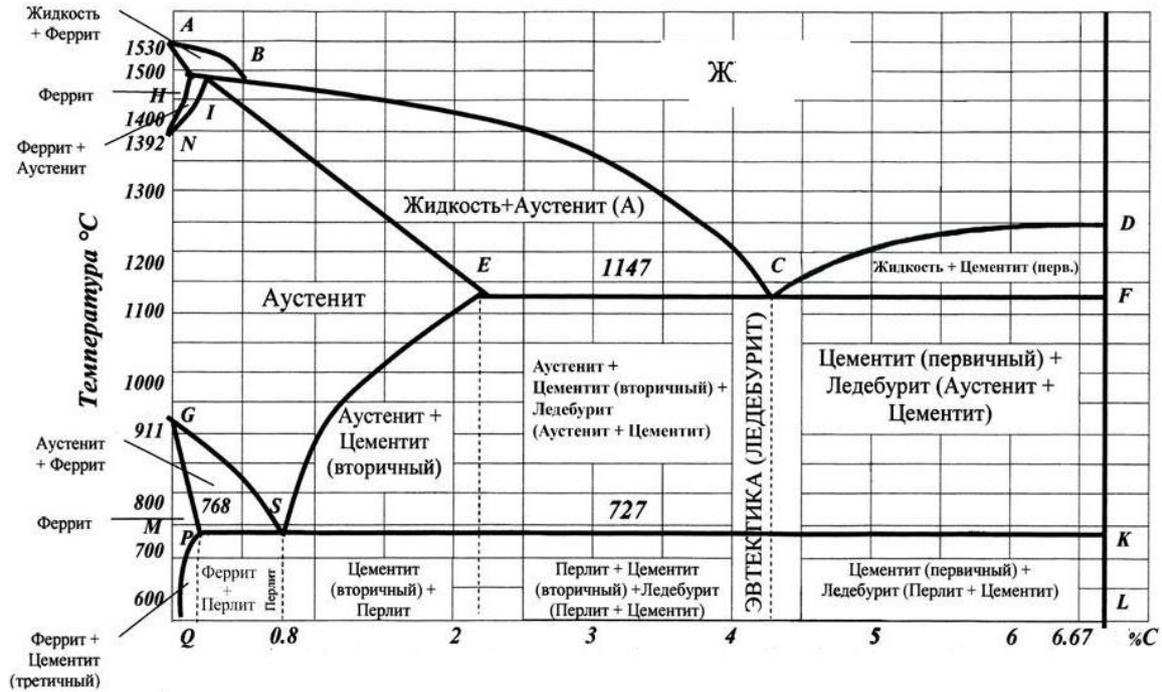


Рис. 29. Диаграмма состояния (не в масштабе) железоуглеродистых сплавов

Опишем важные превращения, происходящие в железоуглеродистых сплавах.

1. Во всех сплавах, пересекающих линию ECF, при охлаждении сохраняется определенное количество жидкой фазы, которая принимает во всех сплавах при этой температуре (1130 °C) одинаковый химический состав, ~4,3% C. Жидкость такого состава при постоянной температуре (ECF, 1130 °C) затвердевает в эвтектику – ледобурит (Л) по реакции



Никаких других превращений на этой (ECF) линии не происходит.

Таким образом, в момент окончания кристаллизации в доэвтектических сплавах (от 2 до 4,3% C) образуется структура А + Л (А + Ц<sub>1</sub>), а в заэвтектических сплавах – Ц<sub>1</sub> + Л (А + Ц<sub>1</sub>).

2. При охлаждении сплавов (0,80...6,67% C) ниже линии SECF до линии PSK растворимость углерода в аустените уменьшается,

и он выделяется по границам аустенитных зерен в виде богатой углеродом фазы  $Fe_3C$  (цементита вторичного). В сплавах, содержащих  $<0,8\% C$ , ниже линии GS аустенит превращается в почти чистое железо (феррит), поэтому в таком аустените содержание углерода будет возрастать.

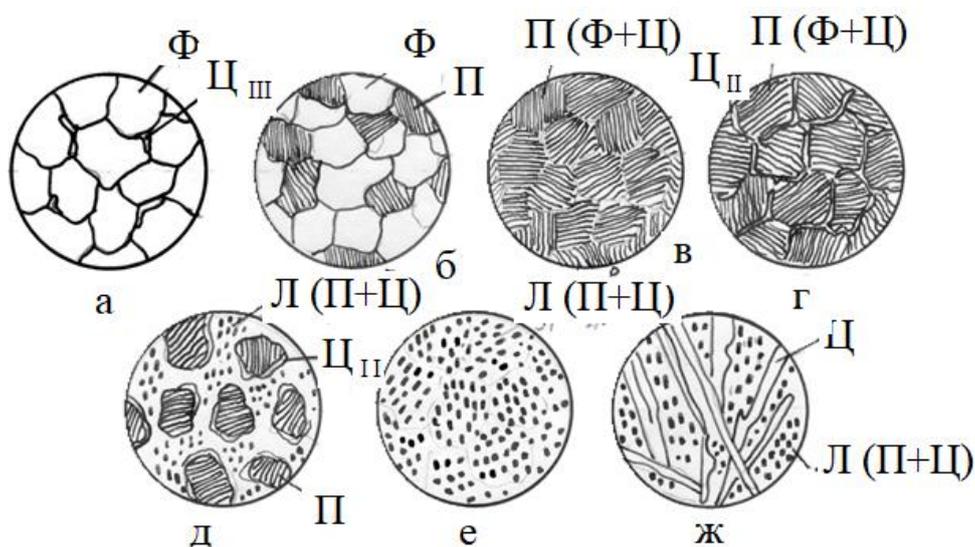
При достижении линии PSK ( $730\text{ }^\circ C$ ) любым сплавом аустенитная составляющая примет одинаковый состав  $\sim 0,8\% C$ .

3. Аустенит с таким содержанием ( $0,8\%$ ) углерода во всех сплавах испытает превращение при постоянной температуре в перлит:



При заполнении областей (и подобластей) ниже линии PSK необходимо переписать все структурные составляющие, записанные выше этой температурной линии, заменив аустенит на перлит.

На рисунке 30 показаны микроструктуры типичных железоуглеродистых сплавов.



**Рис. 30. Микроструктуры железоуглеродистых сплавов с разным содержанием углерода:**

*a* –  $\leq 0,02\% C$ ; *б* –  $0,5\% C$ ; *в* –  $0,8\% C$ ; *г* –  $1,5\% C$ ; *д* –  $3,5\% C$ ; *е* –  $4,3\% C$ ; *ж* –  $5\% C$

## Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте фазы и структурные составляющие диаграммы состояния железо–углерод.
2. Чем отличается  $Fe_\alpha$  и  $Fe_\gamma$ ? Укажите максимальную растворимость углерода в этих модификациях.
3. Какое превращение происходит в сплавах на линии ECF?
4. Какое превращение происходит в сплавах на линии PSK?
5. Сколько углерода содержится в перлите?
6. Что происходит в сплавах при охлаждении их ниже линии SE?

### *Типовые задачи*

1. Твердость чистого железа 100 НВ (1000 НВ, МПа), твердость перлита 200 НВ (2000 НВ, МПа). Какую твердость будет иметь сплав, содержащий 0,4% С?
2. Железоуглеродистый сплав содержит 1,5% С. Назовите структуру сплава при температурах 700, 850, 1100 °С.
3. Сплав содержит 0,4% С. Назовите структуру сплава при 700, 800, 950 °С.
4. Сплав содержит 1,5% С. Определите содержание углерода в аустените при температурах 740 и 800 °С.
5. Определите примерное количество (в %) перлита в сплавах, содержащих 0,3% С; 0,5% С и 0,8% С. Сравните твердость указанных сплавов.
6. Определите примерное количество (в %) ледебурита в сплавах 2% С, 3% С и 4,3% С. Сравните твердость указанных сплавов.

7. Назовите фазовый состав ледебурита в сплавах 3% С, 4,3% С, 5% С:

а) при температуре 950 °С;

б) при температуре 700 °С;

в) при температуре 20 °С.

8. Определите примерное содержание углерода в аустените сплавов 0,3% С и 1% С при температурах 800 и 730 °С (линия PSK).

## 4. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

К сталям относятся железоуглеродистые сплавы, содержащие <2% С. Кроме углерода, в сталях могут присутствовать примеси других элементов. Это технологические примеси, такие как кремний (<0,5%), марганец (<0,5%) и вредные примеси: фосфор, сера ( $\leq 0,05\%$  каждого), водород, азот и др. (тысячные доли % каждого из них).

Стали классифицируют по разным признакам, но чаще всего по качеству: стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные.

*Стали обыкновенного* качества содержат наибольшее количество вредных примесей серы и фосфора ( $S \leq 0,045$ ,  $P \leq 0,055$ ) и имеют свойства, гарантируемые ГОСТ 380–71. В соответствии с этим ГОСТом поставляются стали трех групп.

*Группа А.* В этой группе металлургический завод гарантирует только механические свойства, химический состав не гарантируется. Эта группа сталей не должна у потребителя подвергаться горячей обработке (горячей ковке, сварке, термообработке). Маркируется сталь: Ст0, Ст1, Ст2, ..., Ст6. Цифра указывает на порядковый номер в ГОСТе (но не содержание углерода!). С увеличением номера прочность стали возрастает, а пластичность снижается. Например, сталь Ст1 имеет  $\sigma_b = 32...40$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\delta \approx 33\%$ , а сталь Ст5 –  $\sigma_b = 50...62$  кгс/мм<sup>2</sup> и  $\delta \approx 15...20\%$ .

*Группа Б.* В этой группе гарантируется химический состав, а механические свойства не гарантируются, так как эти стали предназначены для изготовления деталей технологическими методами, связанными с нагревом, такими как горячая ковка, штамповка, термообработка. При

таких операциях исходные свойства все равно изменятся и металлургическому заводу нет необходимости гарантировать начальные механические свойства. Важным здесь является химический состав, который определяет режимы горячей обработки. Стали группы Б не рекомендуется подвергать сварке, так как прочностные свойства металла, находящегося не в зоне термического влияния сварного шва, не гарантируются.

Маркировка сталей групп Б: М Ст0, М Ст1, ..., М Ст7; К Ст1, К Ст2, К Ст3, К Ст4, где буквы М и К означают способ производства: мартеновский (М) и конверторный (К).

*Группа В.* Стали этой группы в основном предназначены для сварных конструкций. Впереди марки стоит буква В, например сталь В Ст3. Цифры указывают на порядковый номер в ГОСТе, как и в группах А и Б. В сталях группы В гарантируется и химический состав, и механические свойства. Так, в стали В Ст3 механические свойства будут как у стали Ст3 (группа А), а химический состав как у стали М Ст3 или К Ст3.

Если в конце марки стали стоит знак «кп» – значит сталь кипящая, а знак «пс» – полуспокойная. Если в конце марки нет знаков, то сталь считается спокойной (т.е. полностью раскисленной).

У кипящих сталей сравнительно высокая температура перехода в хрупкое состояние, например температурный интервал перехода в хрупкое состояние стали Ст3 кп находится при +100...0 °С (горячекатанное состояние). У спокойной стали Ст3 этот интервал значительно ниже (+20...–40 °С). После термообработки «улучшение» интервал хрупкости смещается в область отрицательных температур (–20...–80 °С) и в таком состоянии сталь уже можно применять в конструкциях, работающих в «северных условиях».

*Качественные стали* отличаются от сталей обыкновенного качества меньшим содержанием вредных примесей серы и фосфора ( $\leq 0,035\%$  каждого). Эти стали поставляются в виде поковок, проката и других полуфабрикатов с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Маркируются качественные стали двумя цифрами: сталь 05, 08, 10, 15, 20, ..., 85, которые указывают на содержание углерода в сотых долях процента. Например, в стали 08 среднее содержание углерода  $\sim 0,08\%$ , а в стали 45...0,45% С.

С увеличением содержания углерода твердость и прочность растут, а пластичность снижается. Так, в стали 08  $\sigma_b \approx 32$  кгс/мм (320 МПа),  $\delta \approx 33\%$ , а в стали 45 –  $\sigma_b \approx 61$  кгс/мм (610 МПа),  $\delta \approx 16\%$  (ГОСТ 1050–74).

Низкоуглеродистые стали (05...25) делят на две подгруппы:

1. Стали 05, 08, 10 относятся к высокопластичным, но малопрочным сталям. Их применяют без термообработки для глубокой штамповки кузовов автомобилей, корпусов приборов и других деталей сложного профиля. Их используют также для шайб, прокладок, кожухов и сварных изделий.

2. Стали 15, 20, 25 – цементируемые (см. раздел химико-термическая обработка). Они предназначены для изготовления деталей небольшого размера (кулачки, шестерни, толкатели), от которых требуется высокая твердость поверхности и вязкая сердцевина. Эти стали также хорошо штампуются и свариваются; их можно применять для деталей машин и приборов, где не требуется прочность  $> 40...45$  кгс/мм<sup>2</sup> (400...450 МПа): крепежные детали, втулки, штуцеры, детали котлостроения (змеевики, трубы пароперегревателей, сварные емкости и пр.).

Среднеуглеродистые стали (30...50) обладают более высокой прочностью, но меньшей пластичностью (в холодном состоянии их

можно подвергать лишь гибке с большим радиусом кривизны). Наилучший комплекс механических свойств получается в них в сечениях <12 мм диаметром после улучшающей термообработки (закалка + высокий отпуск). С увеличением размера сечения прочностные свойства заметно снижаются. Применяют среднеуглеродистые стали для изготовления валов малооборотистых двигателей, зубчатых колес, маховиков, осей, шатунов и пр.

Стали с более высоким содержанием углерода (60, 65, 70, 75, 80) применяют в основном для изготовления пружин рессор и других упругих элементов. Стали 70, 75, 80 (У7, У8) используются для ударных инструментов после соответствующей термообработки (зубила, топоры, молотки, чеканочный инструмент и пр.); при большем содержании углерода (0,9...1,2%) относятся к инструментальным сталям для режущего инструмента, работающего в легких условиях (<250 °С). Маркируются как У9...У12 (0,9...1,2% С).

## 5. ЧУГУНЫ

Чугуны содержат более 2% С. Промышленные чугуны содержат ~3,0...3,5% С. Кроме того, в них могут присутствовать  $P \leq 0,02...0,3\%$ ,  $S < 0,02...0,15\%$ ,  $Si \approx 1,5...3\%$ ,  $Mn \leq 1\%$ .

В зависимости от того, в каком виде в структуре чугуна присутствует углерод ( $Fe_3C$  или графит), различают белые, серые, ковкие и высокопрочные чугуны.

В белых чугунах весь углерод связан в химическое соединение  $Fe_3C$  (цементит) и структура такого чугуна соответствует диаграмме  $Fe - Fe_3C$ , т.е. перлит +  $\Psi_{II}$  + Л (П + Ц), рис. 31. Твердость такого чугуна  $>450$  НВ ( $>4500$  НВ, МПа) при «нулевой» пластичности. По этой причине белые чугуны для изготовления деталей машин не применяются. Ограниченное применение находят серые чугуны с отбеленной поверхностью, где имеется поверхностный твердый и износостойкий слой белого чугуна (валки, тормозные колодки, сопла пескоструйных аппаратов и пр.).

В *серых чугунах* часть или весь углерод присутствует в виде графита (Гр) пластинчатой формы. Наиболее простая теория графитизации

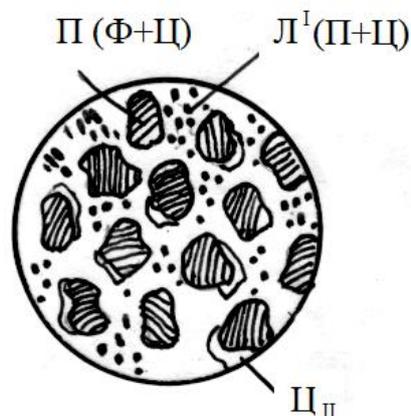


Рис. 31. Микроструктура доэвтектического белого чугуна (~3,5% С)

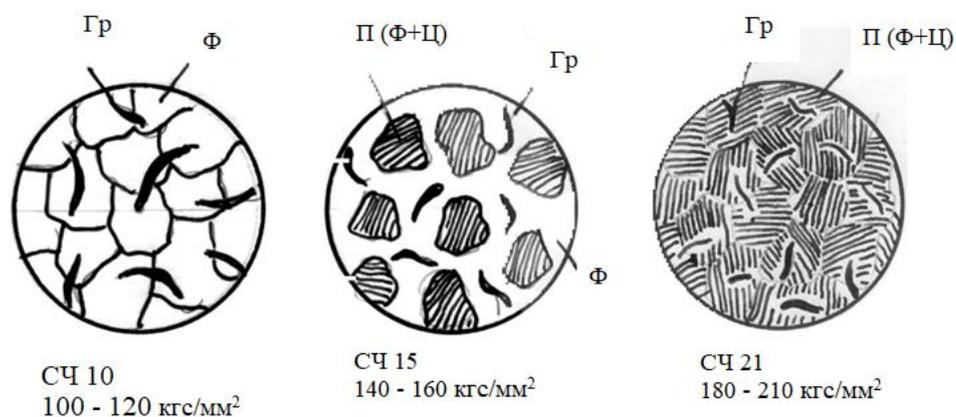
серого чугуна представляет образование графита за счет распада цементита в разных интервалах температур по реакциям:

а)  $Fe_3C \rightarrow 3Fe_\gamma + Gr \rightarrow 3A + Gr$  – при температурах от линии ECF (1130 °C) до линии PSK (730 °C);

б)  $Fe_3C \rightarrow 3Fe_\alpha + Gr \rightarrow 3Ф + Gr$  – ниже линии PSK.

В зависимости от скорости охлаждения степень распада (и количество Gr) цементита может быть различной. При очень большой скорости охлаждения распад цементита может быть полностью подавлен и в результате будет получен белый чугун. Способствует распаду легирование Si, другие элементы (Mn, Cr) препятствуют процессу графитизации. По структуре металлической основы серые чугуны могут быть ферритными, феррито-перлитными и перлитными. Можно сказать, что по микроструктуре серый чугун есть сталь с включениями графита. Серые чугуны маркируются буквами СЧ и цифрами, указывающими предел прочности на растяжение (кгс/мм<sup>2</sup>), например СЧ 15.

Пластичность серых чугунов очень низкая ( $\delta \approx 1\%$ ). На рисунке 32 показаны типичные микроструктуры серых чугунов с различной металлической основой.



**Рис. 32. Микроструктуры и некоторые свойства серых чугунов:**

*а* – ферритный серый чугун (свойства не гарантируются);

*б* – феррито-перлитный серый чугун; *в* – перлитный серый чугун

Все чугуны, в том числе и серые, имеют хорошие литейные свойства. Поэтому они применяются для изготовления деталей путем литья. Номенклатура отливок из серого чугуна и их масса разнообразны: от деталей в несколько грамм (поршневые кольца) до нескольких тонн и более (станины станков, детали прессового оборудования). Выбор конкретной марки чугуна определяется технологическими требованиями и уровнем необходимой прочности. Присутствующий в микроструктуре графит значительно уменьшает коэффициент трения, который приближается к коэффициенту трения одного из лучших антифрикционных материалов – бронзе.

Примерная область применения чугунов:

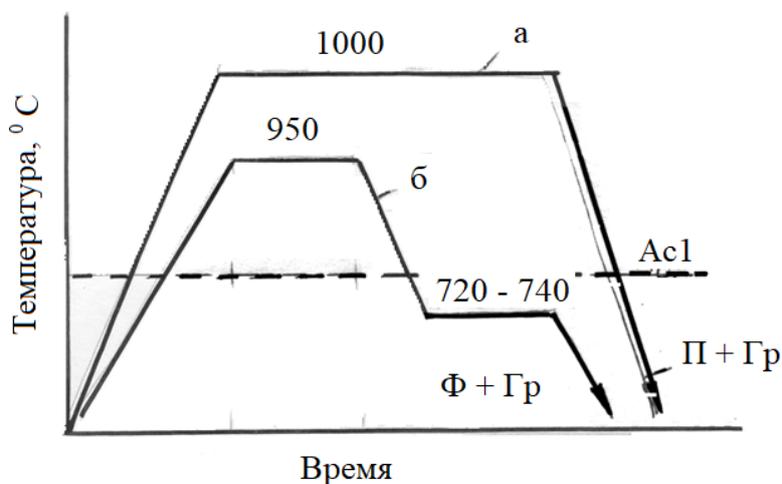
а) феррито-перлитные – блоки цилиндров, корпуса и крышки редукторов, картеры двигателей, поршни, барабаны сцеплений, станины станков, зубчатые колеса и пр.;

б) перлитные (модифицированные).

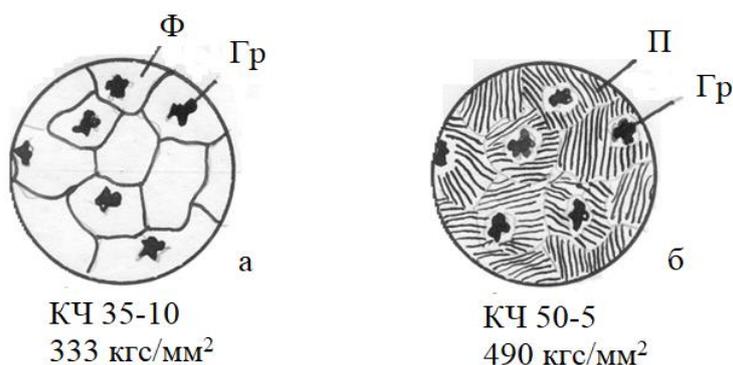
В результате модифицирования ферросилицием и силикокальцием графитные включения получают сильно измельченными. В результате чего их вредное влияние заметно снижается, прочностные свойства возрастают. Эти чугуны можно применять для тяжело нагруженных деталей и в условиях повышенного износа: зубчатые колеса, гильзы блоков цилиндров, шпиндели, распредвалы. Перлитные чугуны имеют наивысшую герметичность, поэтому их с успехом применяют для корпусов насосов, компрессоров, арматуры тормозной пневматики и гидроприводов.

*Ковкие чугуны* отличаются от серых формой графита. В них он имеет более благоприятную хлопьевидную форму. Такая форма сказывается в увеличении прочности и пластичности чугуна.

Получают ковкий чугун длительным (до 60 ч) отжигом отливок из белого чугуна. В процессе отжига и медленного охлаждения цементит распадается с образованием хлопьевидного графита. В зависимости от режима отжига может быть получен ковкий чугун с ферритной или перлитной структурой. Схема режима отжига показана на рис. 33, а микроструктура – рис. 34.



**Рис. 33. Режим отжига белого чугуна на ковкий:**  
*а* – на структуру П + Гр; *б* – на структуру Ф + Гр



**Рис. 34. Микроструктура ковкого чугуна:**  
*а* – ферритный чугун; *б* – перлитный чугун (вокруг графитовых включений видно небольшое количество ферритной фазы в виде светлой оторочки)

Ковкий чугун маркируется буквами и цифрами, например КЧ35-10, где «КЧ» означает, что это ковкий чугун; «35» – предел прочности при растяжении, 333 кгс/мм<sup>2</sup>; «10» – относительное удлинение  $\delta$ , %.

По маркировке видно, что ковкие чугуны обладают значительно более высокой пластичностью ( $\delta = 5...12\%$ ), чем серые чугуны.

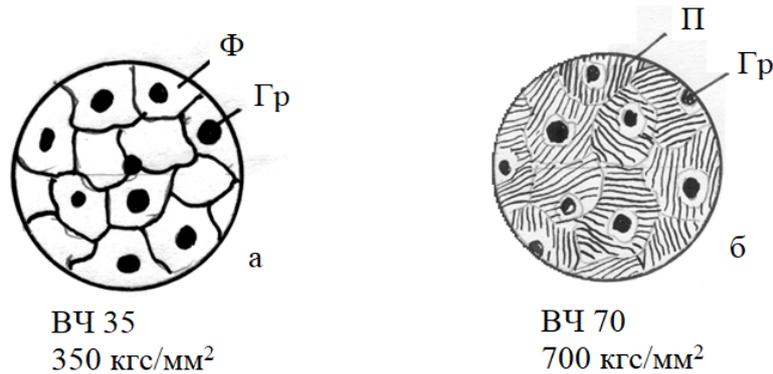
Ковкие чугуны нашли широкое применение для литых деталей в сельскохозяйственном, автомобильном и текстильном машиностроении, в дизелестроении и пр.

В отличие от серого чугуна, их можно применять в тяжелых условиях работы с ударными и знакопеременными нагрузками: валы, зубчатые колеса, кулачковые механизмы, сложные корпусные детали. Для деталей, изготавливаемых из ковкого чугуна, есть технологические ограничения: их максимальное сечение не должно превышать 50 мм, так как в противном случае в сердцевине детали может образоваться пластинчатый графит. К недостаткам ковкого чугуна необходимо отнести повышенную стоимость из-за продолжительного и потому дорогостоящего отжига.

*Высокопрочные* чугуны имеют еще более благоприятную округлую форму графитовых включений. Получают такой чугун путем модифицирования жидкого чугуна магнием (или церием), который вводят в жидкий чугун в количестве примерно 0,02...0,08%. Металлическая основа высокопрочного чугуна может быть такой же как у ковкого и серого. Маркируется высокопрочный чугун, например, как: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100, где «ВЧ» – высокопрочный чугун.

Как и ковкий чугун, высокопрочный применяется для литых тяжело нагруженных деталей. Для высокопрочного чугуна нет ограничений по размеру сечения отливок.

Микроструктуры типичных высокопрочных чугунов показаны на рис. 35.



**Рис. 35. Микроструктура высокопрочного чугуна:**

*а* – ферритного; *б* – перлитного

### Вопросы для самоконтроля

1. К какой группе относятся стали: В Ст3; Ст3; К Ст3; 05; 30; 40; 60; У7; У8; У10?
2. Что означают цифры и буквы в перечисленных марках сталей?
3. Из перечисленных в пункте 1 марок сталей выберите стали:
  - а) для сварной конструкции;
  - б) для холодной листовой штамповки с глубокой вытяжкой;
  - в) для пружины.
4. Предложите сталь для горячейковки шатуна.
5. Выберите сталь для изготовления шестерни.
6. Предложите сталь для ударного инструмента (топора, зубила).
7. Предложите сталь для изготовления ножниц, метчика под резьбу М10.
8. Укажите, к какому типу относятся чугуны, микроструктуры которых изображены на рис. 36.

## 6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ

*Классификация.* Термической обработкой называют технологический процесс, который состоит из нагрева, выдержки и охлаждения металлических сплавов в целях изменения их структуры и свойств. Термической обработке подвергают не только детали машин и конструкций, но и различные заготовки и полуфабрикаты.

Все виды термообработки можно разделить на четыре группы: отжиг, закалку, отпуск и старение.

*Отжиг* – операция, в результате которой сплавы приобретают структуру, близкую к равновесной. После отжига понижается твердость и прочность, повышаются пластичность и снимаются внутренние напряжения. Температурный режим отжига определяется составом сплава и диаграммой состояния. Охлаждение обычно медленное (с печью) и лежит в пределах 30...200 °С/ч.

*Закалка* – термическая операция, после которой образуется неравновесная структура. Закалка возможна лишь в тех сплавах, в которых при охлаждении происходят фазовые превращения: эвтектоидный распад, переход одной кристаллической модификации в другую, выделение второй фазы из-за уменьшения растворимости компонентов. Неравновесную структуру можно получить, если сплав нагреть до температуры выше фазовых превращений, а затем быстро охладить, предотвратив равновесное превращение.

В результате закалки в разных сплавах могут быть получены разные структуры. В одних случаях фиксируется высокотемпературная структура твердого раствора. После такой закалки упрочнения не возникает, и сплав становится даже более пластичным. Чаще всего такое поведение наблюдается в сплавах с переменной растворимостью ком-

понентов. В сплавах, испытывающих эвтектоидное превращение, при закалке может образоваться новая фаза – мартенсит. Это вызовет заметное упрочнение. Закалка специальных сплавов может вызвать заметное изменение таких свойств, как электросопротивление, коэрцитивная сила, коррозионная стойкость.

Отпуск и старение являются чаще всего обязательными и немедленными операциями после закалки. Нагрев при отпуске и старении сопровождается превращениями, которые приближают структуру сплава ближе к равновесной.

## **6.1. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ**

### **6.1.1. Четыре основных превращения в стали**

Существующие виды термообработки сталей основываются на четырех основных превращениях в стали.

*Первое превращение:* превращение перлита в аустенит (при нагреве). Рассмотрим это превращение на примере эвтектоидной стали (~0,8% C), имеющей в равновесном состоянии перлитную структуру. При нагреве этой стали выше температуры линии PSK\* (730 °C) перлит превращается в аустенит. Причем из одного перлитного зерна образуется несколько аустенитных. При медленном охлаждении при температуре A<sub>1</sub> (PSK) из каждого аустенитного зерна образуется несколько перлитных, рис. 37.

Из схемы видно, что при медленном нагреве и охлаждении происходит измельчение зерна в стали; одновременно с этим снимаются внутренние напряжения, возникшие в результате предшествующих технологических операций.

---

\*Температуру линии PSK при нагреве называют A<sub>c1</sub>, а при охлаждении A<sub>r1</sub>.

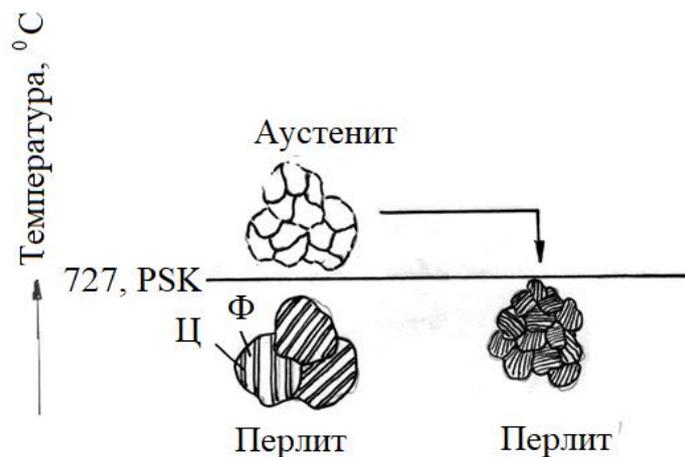


Рис. 37. Превращение П → А (схема)

Если продолжить нагрев до более высоких температур, то возникшее начальное аустенитное зерно будет укрупняться. Такое явление вызвано стремлением системы снизить поверхностную энергию границ зерен за счет уменьшения их протяженности. Склонность к росту зерна у разных сталей неодинакова. По склонности к росту аустенитного зерна различают стали наследственно мелкозернистые и наследственно крупнозернистые. Полностью раскисленные стали – наследственно мелкозернистые.

*Второе превращение в стали* – превращение аустенита в перлит. Если аустенит переохлаждать до различных температур ниже  $A_1$  (PSK) и выдерживать при этих температурах, то переохлажденный аустенит будет изотермически распадаться на феррит и цементит ( $A \rightarrow \Phi + \text{Ц}$ ). Чем ниже температура изотермического распада аустенита, тем дисперснее (мельче) ферритоцементитная смесь и тем выше ее твердость и прочность, но ниже пластичность. Второе превращение в стали изучают с помощью диаграмм изотермического распада аустенита, которые строятся экспериментально. На рисунке 38 изображена диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали У8 (0,8% С).

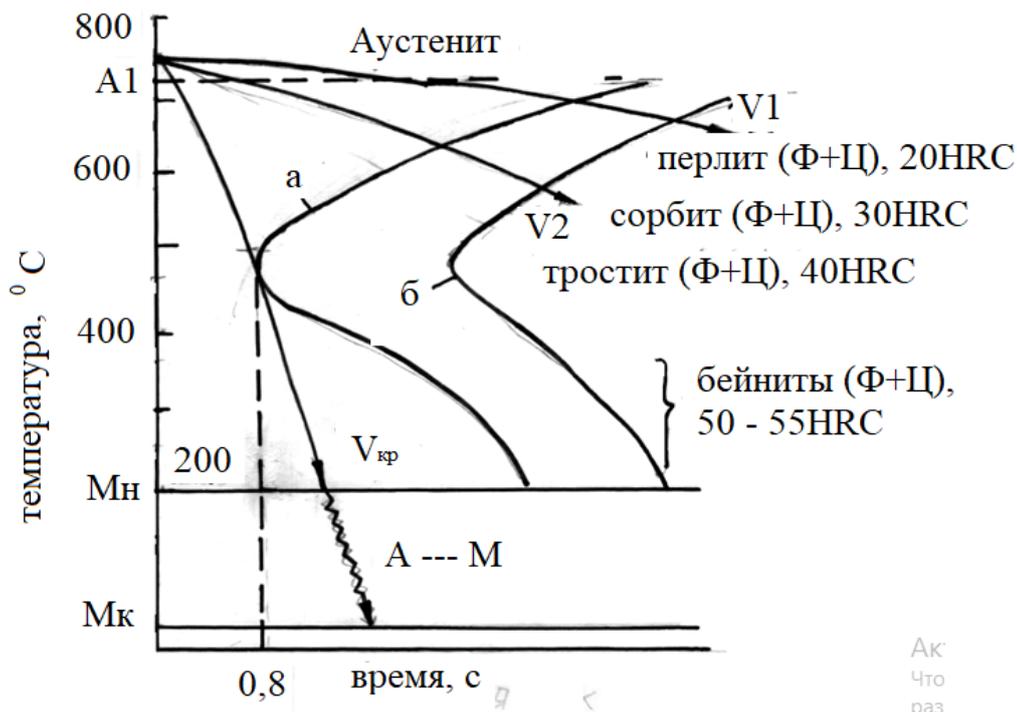


Рис. 38. Диаграмма изотермического распада аустенита стали У8

Из рисунка 38 видно, что если на диаграмму наложить кривые разных скоростей охлаждения, то точки пересечения их с линиями начала и окончания превращений покажут, какая примерно структура получится при непрерывном охлаждении с заданной скоростью. Например, при охлаждении со скоростью  $v_1$  должна получиться структура, близкая к перлиту (20 HRC), а охлаждение со скоростью  $v_2$  приведет к образованию структуры сорбита (30 HRC).

Такие структуры, как троостит и бейнит, невозможно получить непрерывным охлаждением. Наконец есть такие скорости охлаждения ( $>v_{кр}$ ), которые подавляют диффузионный распад аустенита и переохлаждают (сохраняют) его до температуры  $M_n$  — начала мартенситного превращения.

*Третье основное превращение* — мартенситное. Как было сказано ранее, охлаждение со скоростью больше  $v_{кр}$  сохраняет аустенит до температуры начала мартенситного превращения  $M_n$ . Мартенсит — пере-

сыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе. Мартенсит ( $M$ ) – неравновесная структурная составляющая. Образуется он только при непрерывном охлаждении со скоростью больше критической  $v_{кр}$  в интервале температур от  $M_n$  до  $M_k$ .

Температуры  $M_n$  и  $M_k$  зависят лишь от состава стали и не зависят от скорости охлаждения. Например в стали 40 (0,4% C) температура  $M_n \approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $M_k \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; в стали У8  $M_n \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $M_k \approx -10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Сталь, имеющая структуру мартенсита, обладает максимальной твердостью, но минимальной пластичностью. Твердость мартенсита определяется содержанием углерода. Так, мартенсит в стали 40 имеет твердость около 50 HRC, а в стали У8 – 62 HRC.

Не в любой стали можно получить мартенситное состояние. Это видно из диаграмм изотермического распада аустенита сталей, приведенных в качестве примера на рис. 39.

Из рисунка видно, чтобы получить мартенсит в стали 15 (0,15% C), необходимо охлаждать ее со скоростью  $v_{кр} \rightarrow \infty$ . Понятно, что в реальных условиях получить такую скорость охлаждения невозможно.

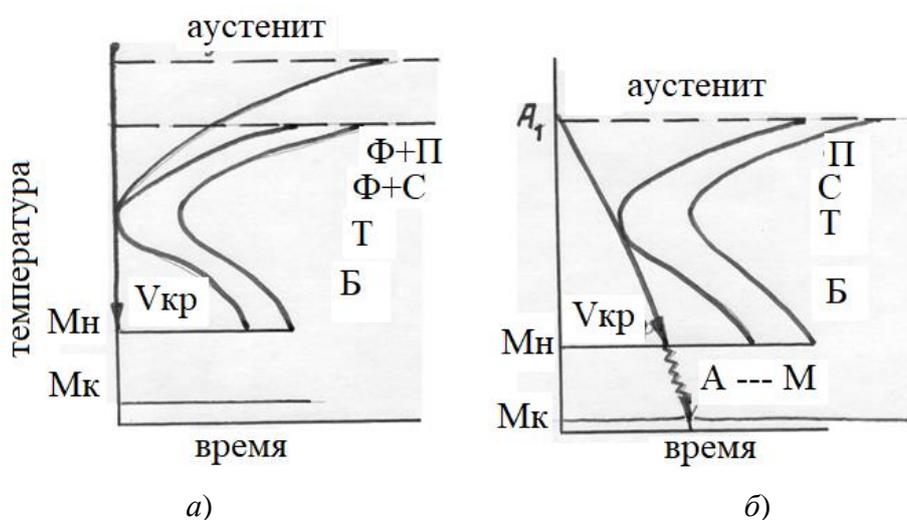
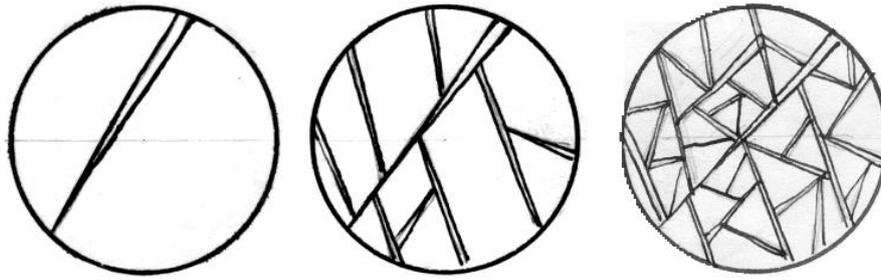


Рис. 39. Диаграммы изотермического распада аустенита (схемы):

а – сталь 15; б – сталь У8



**Рис. 40.** Схема образования мартенситных пластин (игл) в аустенитном зерне

Мартенситное превращение – бездиффузионное, оно протекает многочисленными пластическими сдвигами в аустенитном зерне. В плоскости сдвига образуется мартенситная пластина (игла). Сдвиги происходят в результате действия накопленных при быстром охлаждении напряжений. Схема образования мартенсита показана на рис. 40.

Образование мартенсита идет с увеличением объема, что увеличивает размеры детали, создает дополнительные внутренние напряжения и в свою очередь способствует короблению и возникновению трещин.

*Четвертое превращение в стали* – распад мартенсита при нагреве.

Мартенсит является неравновесной структурной составляющей, поэтому при нагреве, когда появится достаточная диффузионная подвижность атомов, он будет стремиться перейти в более устойчивое (равновесное) состояние путем распада на феррито-цементитную смесь.

До температуры  $\leq 200$  °С заметных структурных превращений не наблюдается, а лишь уменьшаются внутренние напряжения. При нагреве мартенсита до 300...450 °С мартенсит распадается на феррито-цементитную смесь с твердостью 56...45 HRC (для стали, содержащей ~0,8% С). Структуру с такой твердостью принято называть бейнитом отпуска.

Если мартенсит нагреть до  $\sim 500$  °С, то полученная структура с более крупными частичками феррита и цементита, меньшей твердостью ( $\sim 40$  HRC) и более высокой пластичностью. Такая структура называется трооститом отпуска.

Нагрев до  $550 \dots 600$  °С сопровождается укрупнением частиц феррита и цементита, снижением твердости до 30 HRC. Феррито-цементитная смесь с твердостью  $\sim 30$  HRC называется сорбитом. Сорбит отпуска имеет наилучшее сочетание прочности и вязкости. Минимальная твердость ( $\sim 20$  HRC) продуктов распада мартенсита получается при нагреве до  $650 \dots 700$  °С. Эта структура является наиболее равновесной и носит название перлита.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислите виды термообработки стали и кратко охарактеризуйте их.
2. Перечислите и кратко охарактеризуйте четыре основных превращения в стали.
3. Как изменяется микроструктура стали в процессе 1-го превращения?
4. Какой процесс характеризует диаграмма изотермического распада аустенита?
5. Что такое критическая скорость закалки?
6. Назовите продукты изотермического распада переохлажденного аустенита и их свойства (твердость). Укажите, чем отличаются они по структуре (строению).
7. Какие продукты изотермического распада аустенита можно получить непрерывным охлаждением?

8. Сравните диаграммы изотермического распада аустенита сталей, содержащих 0,1% С, 0,4% С и 0,8% С.
9. Что такое мартенсит? От чего зависит твердость мартенсита?
10. Какие процессы происходят при нагреве мартенсита?
11. Чем отличаются продукты распада мартенсита от тех же продуктов изотермического распада аустенита?
12. Можно ли получить нижний бейнит непрерывным охлаждением?

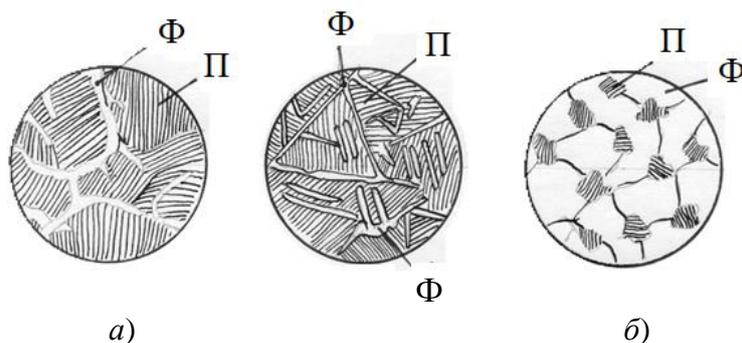
## 6.2. ПРАКТИКА ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛИ

Основными видами термообработки сталей являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

*Отжиг сталей.* Существует несколько разновидностей отжига, но наибольшее распространение в практике термообработки нашли перекристаллизационный (для конструкционных сталей) и сфероидизирующий (для инструментальных сталей).

*Перекристаллизационный отжиг* конструкционных сталей. Конструкционные стали содержат до 0,7% С. Полуфабрикаты конструкционных сталей после литья и горячей обработки давлением из-за ускоренного охлаждения часто имеют повышенную твердость, что затрудняет обработку резанием и заметно снижает пластичность. Кроме того, в литых и кованных заготовках имеются дефекты, такие как крупнозернистость и структура видманштетт, рис. 41.

Для исправления структуры необходима полная перекристаллизация: нагрев до температур выше  $A_{c3}$  на 30...50 °С, выдержка до полного прогрева и медленное охлаждение (с печью). После такого отжига измельчается зерно в стали (рис. 41, в), ликвидируются внутренние напряжения, снижается твердость и увеличивается пластичность.



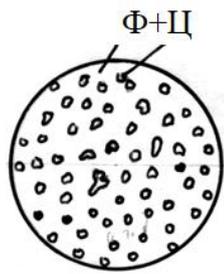
**Рис. 41. Дефектная структура конструкционной стали:**

*a* – крупное зерно в отливке; *б* – видманштеттовая структура в кованой заготовке;  
*в* – после полного отжига (исправление структуры)

*Нормализация сталей.* Нормализация конструкционных сталей заключается в нагреве на 50...70 °С выше  $A_{c3}$  и охлаждении на спокойном воздухе. Как и при отжиге, в этом случае происходит полная перекристаллизация:  $\Phi + \Pi \rightarrow A \rightarrow \Phi + \Pi$ . В среднеуглеродистых сталях нормализация вызывает некоторое упрочнение (до 30 HRC), в низкоуглеродистых сталях ( $\leq 0,25\% \text{ C}$ ) упрочнение не возникает. Поэтому для низкоуглеродистых сталей экономически выгоднее отжиг-перекристаллизацию заменять нормализацией.

*Сфероидизирующий отжиг.* Инструментальные стали для режущего, измерительного и для инструмента, деформирующего металл в холодном состоянии, содержат от 0,7 до 2% С. Высокое содержание углерода придает сталям высокую твердость, что затрудняет их обработку резанием. Наименьшая твердость (~180 НВ) получается в стали при структуре зернистого перлита. В таком перлите зерна цементита имеют округлую форму и расположены равномерно в мягкой матрице – феррите, рис. 42.

Сфероидизирующий отжиг заключается в нагреве стали немного выше  $A_{c1}$  (750...770 °С) и последующем медленном охлаждении.



**Рис. 42. Микроструктура  
эвтектоидной стали (0,8% С)  
после отжига-  
сфероидизации.  
Зернистый перлит**

Наилучшие результаты получаются после изотермической выдержки при температуре 650...680 °С.

Механизм сфероидизации заключается в том, что при небольшом перегреве выше  $A_{c1}$  в образовавшемся аустените сохраняются «остатки» цементита, которые являются центрами кристаллизации сфероидального цементита при охлаждении или изотермической выдержке ниже  $A_{c1}$ .

Сфероидизирующий отжиг заготовок инструмента является обязательной технологической операцией перед закалкой.

*Закалка сталей.* Целью закалки в большинстве случаев является получение максимальной твердости, что обеспечивается мартенситной структурой.

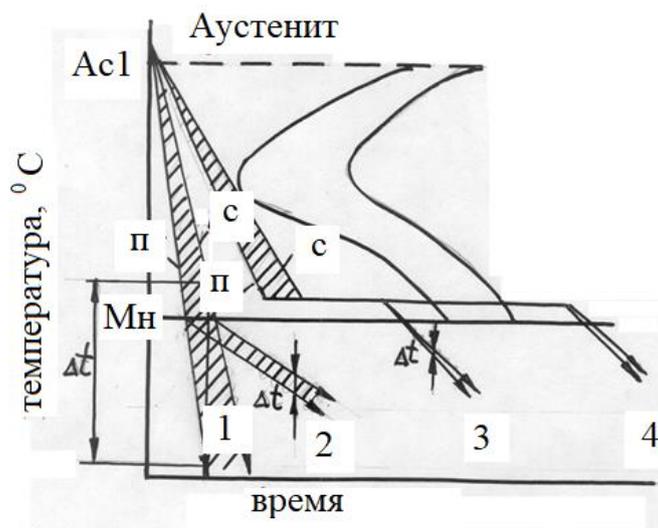
Доэвтектоидные стали подвергаются полной закалке, когда сталь нагревается до аустенитного состояния (на 30...50 °С выше  $A_{c1}$ ), а затем охлаждается со скоростью  $\geq v_{кр}$ . Критическая скорость охлаждения нелегированных сталей достигается охлаждением в воде, а легированные стали при закалке можно охлаждать в масле. При закалке в одном охладителе (воде или в масле) в деталях и инструменте накапливаются значительные термические напряжения, которые могут привести к короблению и трещинам. В целях снижения термических напряжений, особенно при термообработке сложных изделий, режим закалки приходится усложнять. Наибольшее распространение получили закалки в двух средах (прерывистая), ступенчатая и изотермическая.

Закалка в двух средах показана на рис. 43. После нагрева до температуры закалки деталь охлаждается сначала в воде, с тем, чтобы быстро пройти интервал минимальной устойчивости аустенита, а затем переносится в более мягкий охладитель, например в масло. При таком охлаждении уменьшается разность температур  $\Delta t$  по сечению, которая является основной причиной термических напряжений.

*Ступенчатая закалка*, рис. 43, заключается в том, что нагретые под закалку изделия погружают в горячую среду с температурой на 50...100 °С выше точки  $M_n$  и выдерживают некоторое время, необходимое для выравнивания температуры по сечению, после чего охлаждают на спокойном воздухе. Такой способ закалки можно применять только для легированных сталей, которые имеют достаточно высокую устойчивость переохлажденного аустенита. Охлаждение нелегированных сталей в горячей среде не обеспечивает критической скорости охлаждения, поэтому в них в таких условиях будут образовываться продукты распада аустенита – феррит + цементит.

*Изотермическая закалка*. Целью закалки в этом случае является получение не мартенсита, а нижнего бейнита, который имеет повышенные значения вязкости и прочности, по сравнению с бейнитом, полученным закалкой на мартенсит и отпуском на бейнит.

При изотермической закалке, рис. 43, детали охлаждают в ванне с расплавленной солью, имеющей температуру на 50...100 °С выше температуры  $M_n$ , выдерживают до завершения превращения аустенита в бейнит, затем охлаждают на спокойном воздухе. При изотермической закалке возникают минимальные термические напряжения, но, к сожалению, такой вид термообработки, как и в предыдущем случае, применим только для легированных сталей.



**Рис. 43. Способы охлаждения при закалке сталей:**

- 1 – закалка в одном охладителе; 2 – прерывистая закалка в двух средах;  
 3 – ступенчатая закалка; 4 – изотермическая закалка;  
 п – температура поверхности; с – температура сердцевины

*Обработка холодом.* Обработкой холодом называют охлаждение закаленных сталей ниже 20...25 °С.

В высокоуглеродистых и легированных сталях конец мартенситного ( $M_K$ ) превращения лежит ниже 0° С. Поэтому в них после закалки сохраняется определенное количество непревращенного (остаточного) аустенита. Остаточный аустенит в большинстве случаев ухудшает свойства сталей: понижает твердость, приводит к нестабильности размеров высокоточных деталей (измерительный инструмент, подшипники качения и др.)

Чтобы избавиться от остаточного аустенита, сталь сразу же после закалки охлаждают до температуры  $M_K$ . При этом остаточный аустенит превращается в мартенсит, соответственно возрастает твердость. Интервал мартенситного превращения  $M_H - M_K$  зависит от состава стали и может колебаться в широких пределах.

Из всех структурных составляющих аустенит имеет наименьший удельный объем, обладает повышенной пластичностью. Эти его свойства в некоторых изделиях из легированных сталей играют полезную роль: при закалке те же стали мало коробятся и практически не изменяют линейные размеры.

*Закаливаемость и прокаливаемость* являются важнейшими характеристиками сталей.

Закаливаемость определяется твердостью поверхности, закаленной стали и зависит главным образом от содержания углерода.

При закалке всегда скорость охлаждения поверхности детали выше скорости охлаждения сердцевины. Поэтому может оказаться, что сердцевина охлаждается со скоростью меньше критической, когда мартенсит образуется и сердцевина останется незакаленной. Способность стали закаливаться на определенную глубину называется прокаливаемостью стали. Прокаливаемость сталей в определенном охладителе зависит главным образом от состава стали. Например, сталь 40 прокаливается при охлаждении в воде насквозь в сечении диаметром менее 10 мм, а сталь 40 ХНМ (0,4% С, ~1% Cr, 1% Ni, ~1% Мо, Fe – остальное) прокаливается насквозь в масле в сечении диаметром до 100 мм.

*Отпуск закаленных сталей.* В зависимости от температурного интервала различают три вида отпуска: низкий при 120...250 °С, средний – 350...450 °С и высокий при 500...680 °С. Продолжительность отпуска выбирают такой, чтобы обеспечить стабильность свойств стали. Низкий отпуск применяют для инструментальных сталей и составляет 0,5...2,0 ч. В зависимости от сечения инструмента. Чтобы исключить объемные изменения при эксплуатации мерительного инструмента при сохранении высокой твердости продолжительность низкого (100...120 °С) отпуска увеличивают до 10...15 ч.

Средний отпуск 350...450 °С применяют чаще всего для пружин и других упругих элементов. При отпуске 300...350 °С достигается наиболее высокое соотношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ . При дальнейшем повышении температуры отпуска пределы прочности, упругости и текучести монотонно снижаются, а характеристики пластичности ( $\psi$  и  $\delta$ ) возрастают.

С повышением температуры отпуска увеличивается и ударная вязкость, однако есть два температурных интервала, где ударная вязкость конструкционных сталей заметно снижается: 250...350° и 500...600 °С. Понижение вязкости в этих интервалах температур называется соответственно отпускной хрупкостью I и II рода. Если отпускная хрупкость I рода присуща всем конструкционным сталям, то отпускная хрупкость II рода свойственна лишь легированным сталям и возникает она только при медленном охлаждении от температуры отпуска. При быстром охлаждении (в воде или масле) отпускная хрупкость II рода не проявляется. Этот вид хрупкости можно предотвратить, применяя стали, дополнительно легированные 0,3...1,0% вольфрама или молибдена.

Сочетание полной закалки с высоким отпуском конструкционных сталей дает наилучшее сочетание прочности и ударной вязкости, поэтому называется улучшением.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислите виды термической обработки сталей.
2. Охарактеризуйте виды отжига сталей и их назначение.
3. Назначьте режим отжига отливки из стали 30; укажите изменения в структуре и свойствах стали.

4. Назначьте режим отжига стали У10; укажите изменения в структуре и свойствах стали.

5. Что собой представляет нормализация сталей? Сравните структуру и свойства сталей 20 и 40 после нормализации.

6. Что собой представляет закалка сталей? Опишите структурные изменения в стали после закалки. Цель закалки сталей?

7. Дайте определения понятиям «закаливаемость» и «прокаливаемость» сталей.

8. Почему сталь 10 невозможно закалить?

9. Назначьте режим закалки сталей 40 и У10; охарактеризуйте структуру и свойства (HRC) сталей до и после закалки.

10. Перечислите и охарактеризуйте виды закалки сталей; укажите их преимущества и недостатки.

11. С какой целью проводится обработка холодом? Укажите, как при этом изменяются структура и свойства.

12. Охарактеризуйте виды отпуска сталей. Как изменяются структура и свойства сталей при отпуске?

13. Назначьте режим термообработки сталей 40 (вал), 60 (пружина), У12 (напильник); укажите структуру и свойства (HRC).

14. Что такое «улучшение» стали?

## 7. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Химико-термической обработкой называют процесс диффузионного насыщения поверхности слоя готовых деталей различными элементами. Эту технологическую операцию проводят в целях повышения твердости, износостойкости, сопротивления усталости, для защиты от электрохимической, газовой коррозии.

Из множества способов химико-термической обработки наибольшее распространение получили цементация, азотирование, хромирование, алитирование, силицирование и борирование.

*Цементация.* Технологический процесс диффузионного насыщения поверхности стальной детали углеродом называется цементацией.

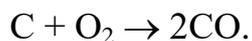
Цементации подвергают детали, от которых требуется высокая твердость и износоустойчивость поверхности при вязкой сердцевине: зубчатые колеса, шейки валов, пальцы, распределительные валики, кулачки, червяки и др.

При цементации применяют различные углеродсодержащие среды (карбюризаторы): твердые, жидкие и газовые. Жидкие карбюризаторы применяются редко. Наиболее распространенным твердым карбюризатором является смесь, состоящая из древесного угля, 20...25% углекислого бария для интенсификации процесса и 3...5%  $\text{CaCO}_3$  – для предотвращения спекания частиц карбюризатора.

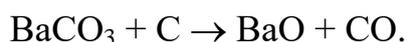
Детали, подвергаемые цементации, помещают в специальный контейнер (стальной ящик) и засыпают карбюризатором. Ящик закрывают крышкой, герметизируют огнеупорной глиной и нагревают в печи до 910...930 °С. Продолжительность цементации зависит от заданной глубины цементационного слоя и марки стали. Обычно глубина цемен-

тации не превышает 3 мм. При такой глубине слоя время цементации составляет при температуре ~930 °С примерно 10 ч.

Основные реакции. При нагреве уголь взаимодействует с кислородом воздуха, оставшегося в контейнере:



Одновременно с этим идет реакция



При контакте с поверхностью детали идет главная реакция (диспропорционирование)

$2\text{CO} \Leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$ , в результате которой образуется активный (атомарный) углерод, диффундирующий в поверхностные слои цементуемой стали, а  $\text{CO}_2$  реагирует с углем и образует новые порции  $\text{CO}$ .

Структура цементованного слоя. Цементованный слой состоит из трех зон: заэвтектоидной (>1% C) со структурой перлит + цементит вторичный; эвтектоидный (0,8% C) перлитной зоны, за которой следует доэвтектоидная (<0,8% C) феррито-перлитная зона, постепенно переходящая в структуру низкоуглеродистой сердцевины.

Микроструктура цементованного слоя низкоуглеродистой стали показана на рис. 44.

*Термическая обработка стали после цементации.* После цементации получается укрупненное зерно вследствие высокой температуры и длительной выдержки. Из-за чего сталь заметно охрупчивается. Поэтому для достижения заданного комплекса механических свойств после цементации требуется дополнительная термообработка. Наилучшие свойства можно получить после сложной термической обработки, состоящей из двух последовательно проводимых закалок и низкого отпуска.



**Рис. 44. Микроструктура цементованного слоя низкоуглеродистой стали**

При первой закалке сталь нагревается до температур на  $30 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$  выше  $A_{c3}$ . При таком нагреве по всему сечению детали образуется мелкозернистая аустенитная структура, а при быстром охлаждении предотвращается выделение цементита вторичного по границам аустенитных зерен в заэвтектоидной зоне. Низкоуглеродистая сердцевина в результате быстрого охлаждения приобретает мелкозернистую вязкую структуру феррита и перлита.

В цементованном слое микроструктура неоднородная: в прилегающих к поверхности высокоуглеродистых зонах – мартенсит, за которыми следуют среднеуглеродистые области со структурой, близкой к сорбиту.

При второй закалке сталь нагревается до температуры на  $30 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , превышающей температуру  $A_{c1}$ . В процессе нагрева мартенсит распадается с образованием глобулярного цементита, который в виде разобщенных включений сохраняется до температуры закалки. После закалки в заэвтектоидной зоне образуется мартенсит с включениями цементита вторичного. Последний увеличивает износостойкость

поверхностного слоя. В сердцевине нелегированной стали формируется мелкозернистая феррито-цементитная смесь, обладающая невысокой твердостью и высокой вязкостью.

Для деталей менее ответственного назначения в массовом производстве применяют только одну закалку.

Окончательной операцией после закалки (одинарной или двойной) является низкий отпуск, который не снижает твердость, но снимает термические напряжения, возникшие при закалке.

*Азотирование стали.* Азотированием называется процесс диффузионного насыщения азотом поверхностного слоя готовой детали. Для азотирования чаще всего используют среднеуглеродистые легированные небольшим (~1%) количеством хрома, молибдена и алюминия. Азотирование применяют для повышения износостойкости и предела выносливости таких деталей машин, как коленчатые и распределительные валы, гильзы цилиндров, червяки, валики и др.

Перед азотированием детали подвергают закалке и высокому отпуску. После азотирования допускается лишь небольшая шлифовка и полировка сопряженных поверхностей.

Азотирование обычно проводят при температуре 500...600 °С в муфелях или специальных герметичных контейнерах, через которые пропускается диссоциированный аммиак. В результате сложных физико-химических процессов в поверхностном слое (менее 0,3 мм) образуются различные нитриды (химические соединения металлов с азотом), имеющие очень высокую твердость и износостойкость. Азотирование – очень длительная технологическая операция. Чтобы получить азотированный слой глубиной ~0,5 мм при температуре 500...520 °С требуется около 55 ч выдержки. После азотирования не требуется дополнительной термической обработки.

*Нитроцементация* – одновременное насыщение поверхности деталей углеродом и азотом. Азот ускоряет диффузию углерода в сталь. Поэтому температуру диффузионного насыщения можно понизить до 850 °С и получить примерно такое же содержание углерода, как и при цементации. Нитроцементированный слой хорошо сопротивляется износу и коррозии.

Нитроцементацию чаще всего проводят в расплавленных соляных ваннах, основным компонентом которых является цианистый натрий. За 1 ч выдержки при 820...860 °С в такой ванне можно получить диффузионный слой ~0,3 мм, который после закалки и низкого отпуска приобретает структуру мартенсита с включениями карбонитридных фаз. Нитроцементированная поверхность имеет твердость примерно 60...62 HRC и более высокую износостойкость, чем после цементации.

*Диффузионная металлизация* – насыщение поверхности стальной детали различными металлами в целях придания поверхности специальных свойств: коррозионной стойкости, жаростойкости, износостойкости и т.д.

Наибольшее распространение получили такие методы металлизации, как алитирование, хромирование, силицирование. Чаще всего насыщение ведется из порошковых смесей, которые содержат диффундирующий элемент, активизатор ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4\text{J}$  и др.) и нейтральный порошок (шамот,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , каолин и др.) Обработываемые детали помещаются вместе с порошком в металлические жаростойкие контейнеры, закрываются крышками и герметизируются. После чего контейнеры помещаются в печь, нагреваются до 1000...1200 °С и выдерживаются в течение 6...8 ч для получения слоя заданной толщины.

Диффузионные покрытия можно получить из расплавленных жидких сред. Например, алитирование нередко проводят в расплавлен-

ном алюминии. Для предотвращения разъедания поверхности деталей в алюминиевую ванну вводят 3...4% железа (при алитировании стали).

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Перечислите виды химико-термической обработки.
2. Коротко охарактеризуйте основные из них.
3. Опишите технологическую схему цементации.
4. Выберите сталь для цементации: Сталь 15, Сталь 45, У8, У12.
5. Нужна ли термообработка после цементации?
6. Опишите технологическую схему азотирования.
7. Выберите сталь для азотирования: ХГТ, 38ХМЮА, 12Х18Н10Т и У12.
8. Нужна ли термообработка после азотирования?
9. За счет чего достигается высокая твердость и износостойкость поверхности после азотирования?
10. Назначение диффузионного хромирования. Кратко опишите технологическую схему хромирования.
11. Сталь 10, Сталь У10, Сталь Х17.
  - а) выберите сталь для диффузионного хромирования в целях повышения жаростойкости и коррозионной стойкости;
  - б) выберите сталь для диффузионного хромирования в целях повышения износостойчивости режущего инструмента.

## 8. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Легированными называют стали, в которые при выплавке вводят различные элементы (легирующие) специально для получения заданных структуры и свойств. Содержание легирующих элементов может колебаться в широких пределах от 0,003% (В) до десятков процентов.

Легирующие элементы оценивают по их действию на диаграмму состояния Fe–С, по их отношению к железу, их способности образовывать карбиды, по тому, как они влияют на термообработку и т.д.

### 8.1. ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗА

Большинство легирующих элементов образуют с железом твердые растворы. При легировании возрастают твердость и прочность, но снижается вязкость, рис. 45.

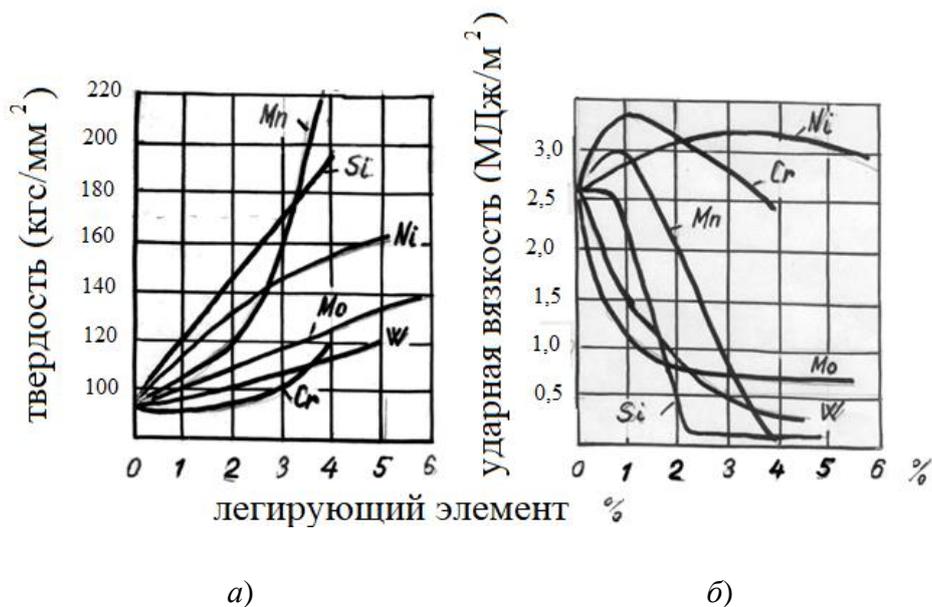


Рис. 45. Влияние легирующих элементов на свойства железа (феррита):

*a* – твердость; *б* – ударную вязкость

Наиболее заметно упрочняют феррит Mn, Si, Ni, но марганец и кремний сильно охрупчивают феррит. Уменьшают вязкость в разной степени все легирующие элементы, кроме никеля. Следует отметить, что Mn, Si и Cr снижают ударную вязкость, если их количество превышает 1%. При меньшем содержании вязкие свойства даже несколько возрастают.

## **8.2. ОТНОШЕНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ К УГЛЕРОДУ**

Элементы, у которых *d*-электронная оболочка нестроена, способны образовывать карбиды. Чем меньше электронов (<10) на *d*-оболочке, тем более активным карбидообразователем является легирующий элемент. Карбиды, имеющие кристаллическую решетку, близкую к Fe<sub>3</sub>C (Mn<sub>3</sub>C, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> и др.), сравнительно легко растворяются в аустените при нагреве. Другие же – VC, WC, TiC, NbC – практически не растворяются в аустените.

## **8.3. ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ТЕРМООБРАБОТКУ СТАЛЕЙ**

Большинство легирующих элементов замедляют распад аустенита на феррито-цементитную (карбидную) смесь, смещая диаграмму изотермического превращения аустенита вправо.

Это способствует переохлаждению аустенита без распада до температуры начала мартенситного превращения при более медленном охлаждении (в масле или даже на воздухе), по сравнению с аустенитом в нелегированных сталях. Результатом такого влияния легирования являются уменьшение критической скорости закалки и увеличение прокаливаемости.

*Влияние легирования на мартенситное превращение.* Легирующие элементы практически не влияют на кинетику мартенситного превращения. Их влияние выражается в основном в том, что они (кроме Co, Al, Si) снижают интервал мартенситного превращения и увеличивают количество остаточного аустенита. Например, 5...6% Mn снижают точки  $M_n$  до 0 °С. Это означает, что в такой стали можно быстрым охлаждением зафиксировать при комнатной температуре аустенитное состояние. На твердость мартенсита легирующие элементы практически не влияют.

*Влияние легирования на превращение при отпуске.* Основная роль легирующих элементов при отпуске заключается в том, что большинство из них затрудняют распад мартенсита при нагреве. Практическим следствием этого является то, что для получения одинаковых свойств в закаленных углеродистых и легированных сталях последние необходимо нагревать до более высоких температур или увеличивать продолжительность отпуска, по сравнению с нелегированными сталями.

#### **8.4. ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ НА ДИАГРАММУ СОСТОЯНИЯ Fe–C**

Большинство легирующих элементов сдвигают точки S (0,8% C) и E (2% C) влево в сторону меньшего содержания углерода. Поэтому граница между доэвтектоидными и заэвтектоидными сталями, между заэвтектоидными сталями и чугунами в легированных сталях лежит при меньших содержаниях углерода, чем в нелегированных.

Так, сталь с 5% Cr и 0,6% C является заэвтектоидной, а с 1,5% C и том же содержании хрома в структуре стали появляется ледебурит.

Кроме того, некоторые легирующие элементы (Cr, Si, W, Mo) повышают критические точки (линию PSK) в стали, другие снижают их (Mn, Ni). Это необходимо учитывать при назначении режима нагрева под термообработку стали.

## 8.5. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Легированные стали принято классифицировать по четырем признакам: по равновесной структуре, структуре после охлаждения на воздухе и назначению.

*Классификация по равновесной структуре:*

1) доэвтектоидные стали, имеющие в структуре, кроме перлита, избыточный феррит;

2) эвтектоидные стали, имеющие перлитную структуру;

3) заэвтектоидные стали, в структуре которых содержатся избыточные (вторичные) карбиды;

4) ледебуритные стали, имеющие в структуре эвтектику (ледебурит). По структуре такие стали должны быть отнесены к белым чугунам. В ледебуритных сталях ледебурит образуется при меньшем содержании углерода (<2% C), чем в белых чугунах. Поэтому ледебуритные стали поддаются горячей ковке, тогда как ковка белых чугунов невозможна из-за высокой хрупкости.

Кроме перечисленных групп сталей, выделяют еще стали аустенитного и ферритного классов. Некоторые элементы (Cr, Si, V, W) настолько сужают температурную область  $\gamma \Leftrightarrow \alpha$  превращения, что при большой концентрации их это превращение полностью отсутствует, и при комнатной температуре фиксируется ферритная структура. Другие элементы (Ni, Mn) расширяют температурную область  $\gamma$ -фазы

(аустенита) и опускают ее до комнатной (и ниже) температуры. В таких сталях также отсутствует  $\gamma \leftrightarrow \alpha$  превращение, и при комнатной температуре будет стабильной аустенитная структура.

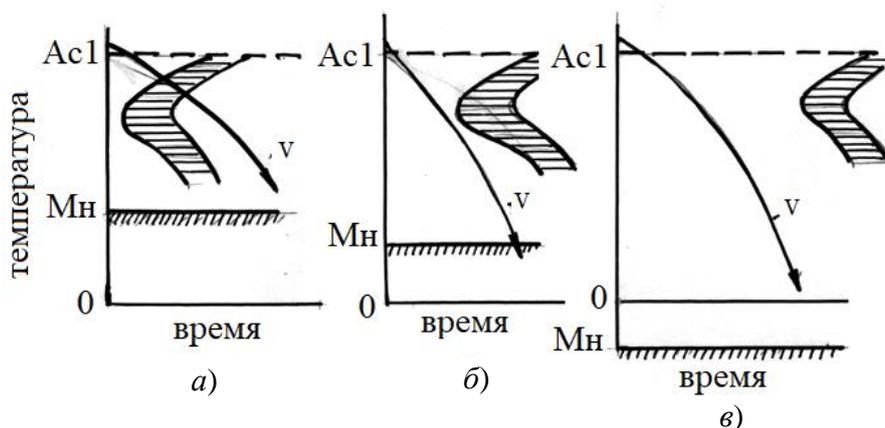
Например сталь, содержащая  $\leq 0,1\% \text{ C}$  и  $> 13\% \text{ Cr}$ , имеет при комнатной температуре ферритную структуру, а сталь, содержащая  $\sim 1\% \text{ C}$ ,  $10\% \text{ Mn}$ , относится к аустенитному классу.

*Классификация по структуре после охлаждения на воздухе*

По этой классификации выделяют три класса сталей: перлитный, мартенситный, аустенитный. Содержание легирующих элементов увеличивается от перлитных к аустенитным сталям.

Класс сталей определяется диаграммами изотермического распада аустенита, рис. 46.

В сталях перлитного класса кривая охлаждения на воздухе пересекает линии начала и конца распада переохлажденного аустенита, поэтому в перлитных сталях при охлаждении на воздухе из аустенитного состояния образуются феррито-цементитные смеси (перлитные структуры), рис. 46, а.



**Рис. 46. Диаграмма изотермического распада аустенита**

**для сталей разных классов:**

*a* – перлитный класс; *б* – мартенситный класс; *в* – аустенитный класс;

*v* – скорость охлаждения на воздухе

В сталях мартенситного класса «С» образные кривые настолько сдвинуты вправо, что охлаждение на воздухе обеспечивает критическую скорость, и аустенит без распада переохлаждается до температуры  $M_n$ , ниже которой образуется мартенсит.

Увеличение степени легирования может понизить температуру начала образования мартенсита  $M_n$  в область отрицательных температур. В этом случае охлаждение на воздухе до комнатной температуры зафиксирует аустенитную структуру и сталь перейдет в аустенитный класс. Следует подчеркнуть, что в сталях аустенитного класса может образоваться мартенсит, если их охлаждать в область отрицательных температур, пройдя интервал мартенситного превращения  $M_n - M_k$ .

*Классификация по назначению:*

1) конструкционные стали – стали, идущие на изготовление деталей машин, механизмов и других конструкций. Эти стали у потребителя подвергаются термообработке. Поэтому их подразделяют на цементуемые (подвергаемые цементации) и улучшаемые (подвергаемые закалке и отпуску, не обязательно высокому). В эту группу входят так называемые строительные стали, не подвергаемые термообработке у потребителя. Иногда их называют низколегированными;

2) инструментальные стали – стали, идущие на изготовление режущего, измерительного, штампового и другого инструмента. Их условно можно разделить на следующие четыре категории: углеродистые, легированные, штамповые и быстрорежущие;

3) стали и сплавы с особыми свойствами: нержавеющие, жаростойкие, жаропрочные, износостойчивые, с особенностями теплового расширения, с особыми магнитными и электрическими свойствами и т.д.

## 8.6. МАРКИРОВКА ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В обозначении марок сталей входят цифры и буквы, указывающие на примерный состав стали.

Легирующие элементы обозначаются буквами: Х – хром; Н – никель, С – кремний, Г – марганец, М – молибден, В – вольфрам, Ф – ванадий, К – кобальт, Д – медь, Т – титан, Ю – алюминий, Р – бор, П – фосфор, Ц – цирконий, Ч – редкоземельные металлы; А – азот, если эта буква стоит в середине марки стали.

Если буква А стоит в конце марки, то это указывает на то, что сталь высококачественная и в ней содержится минимальное количество вредных примесей ( $S \leq 0,03\%$ ;  $P \leq 0,03\%$ ).

Первые цифры в обозначении марки стали указывают на среднее содержание углерода в сотых долях процента (у высокоуглеродистых инструментальных сталей – в десятых долях процента). Цифра, стоящая после буквы, указывает на примерное содержание этого легирующего элемента в процентах. Если легирующего элемента в стали  $\leq 1\%$ , то цифра после буквы не ставится.

Пример. Сталь 18Х2Н4ВА содержит  $\sim 0,18\%$  С, 2% хрома, 4% Ni,  $\leq 1\%$  W; сталь высококачественная.

Имеются отклонения от принятой по ГОСТу маркировки. Так, если в инструментальной стали содержится углерода более 1%, то цифру, определяющую процент углерода, обычно опускают. Например, инструментальная сталь с 1,45...1,7% С; 11,0...12,5% Cr и 0,5...0,8% Mo маркируется Х12М.

Стали, не вошедшие в стандарт, обозначаются разными способами. Так, стали, выплавленные на заводе «Электросталь», обозначаются принятой на заводе маркировкой: ЭИ943, ЭП176 и т.д., где Э – электро-

сталь; И – исследовательская; П – пробная; цифры – порядковый номер плавки.

Сохранились устаревшие («догостовские») маркировки: ШХ15, Р9, где Ш – шарикоподшипниковая; Х15 – ~1,5% Cr; Р – быстрорежущая сталь, содержащая ~9% W основного легирующего элемента.

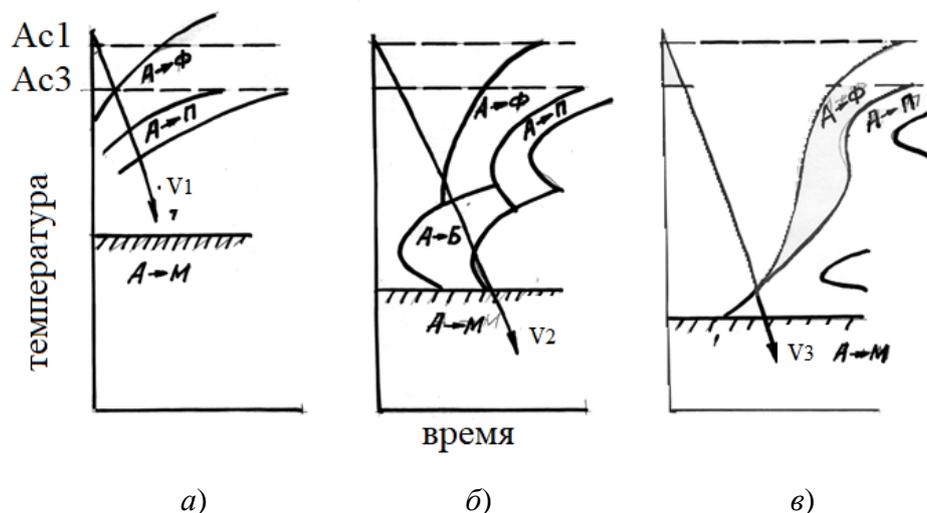
## 8.7. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

### *Цементуемые (низкоуглеродистые) стали*

Стали этой группы применяют для изготовления деталей, подвергаемых цементации. Низкое содержание углерода (0,10...0,25%) необходимо для того, чтобы после цементации, закалки и низкого отпуска получить твердый (58...63 HRC) износостойкий поверхностный слой и вязкую (15...30 HRC) сердцевину.

В нелегированных сталях сердцевина не упрочняется. В легированных сталях после термообработки (закалка + низкий отпуск) наблюдается заметное упрочнение и тем более значительное, чем больше углерода и легирующих элементов содержится в стали. В соответствии с этим цементуемые стали полезно разделить на три группы: углеродистые стали с неупрочняемой сердцевиной, низколегированные стали со слабоупрочняемой сердцевиной и относительно высоколегированные с сильно упрочняемой сердцевиной.

Разная степень упрочнения при термической обработке объясняется получением различных структур. Так, в углеродистых (нелегированных) сталях 15, 20, 25 при любой скорости охлаждения аустенит успевает распасться на феррито-перлитную смесь, которая имеет твердость не выше 15 HRC.



**Рис. 47. Диаграммы изотермического распада  
аустенита цементуемых сталей (схема):**

*a* – 10; *б* – 20ХГ; *в* – 12Х2Н4;  $v_1$  – скорость охлаждения в воде;  
 $v_2$  – скорость охлаждения в масле

В низколегированных сталях (15Х, 20Х, 15ХР, 20ХН) сильно развита область бейнитного превращения, рис. 47, б, поэтому в них при охлаждении в масле (закалка) образуется низкоуглеродистая бейнитная структура с твердостью  $\sim 20\text{...}25$  HRC и  $\sigma_B \approx 80$  кгс/мм<sup>2</sup> (800 МПа). В высокопрочных цементуемых сталях (20ХГР, 20ХНР, 18ХГТ, 12ХН3А, 18Х2Н4ВА) область бейнитного превращения практически накладывается на мартенситное превращение, рис. 34, в.

Закалка в масле (и даже на воздухе) сопровождается в этих сталях образованием мартенсита с твердостью около 30...35 HRC (в зависимости от содержания углерода) и прочностью  $\sigma_B \approx 120$  кгс/мм<sup>2</sup> (1200 МПа).

Необходимо в практике применения цементуемых сталей учитывать следующие важные особенности:

1. Максимальные свойства ( $\sigma_B$ ) в легированных сталях можно получить лишь при полной прокаливаемости. Другими словами, каждая

сталь имеет «свое» сечение, в котором она прокаливается насквозь, т.е. имеет структуру бейнита или мартенсита.

2. С увеличением степени легирования показатели пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ,  $a_n$ ) снижаются. Так, если сталь 20 имеет  $\delta \approx 30...35\%$ ,  $\psi \approx 60\%$ , то в стали 20 ХГР  $\delta \approx 12\%$ ;  $\psi \approx 50\%$ .

3. Легирующие элементы по-разному влияют на свойства сталей, но главное их назначение увеличить прокаливаемость стали, получить возможность закалки в масле и предотвратить превращение аустенита в перлит. Твердость (и прочность) термообработанной стали в основном определяется содержанием углерода. Так, прочность стали 30ХГТ имеет  $\sigma_b \approx 1500$  МПа, а 18ХГТ –  $\sigma_b \approx 1200$  МПа.

В таблице 1 приведены свойства некоторых наиболее часто применяемых цементуемых сталей после термообработки.

### 1. Режимы термической обработки и механические свойства цементуемых сталей

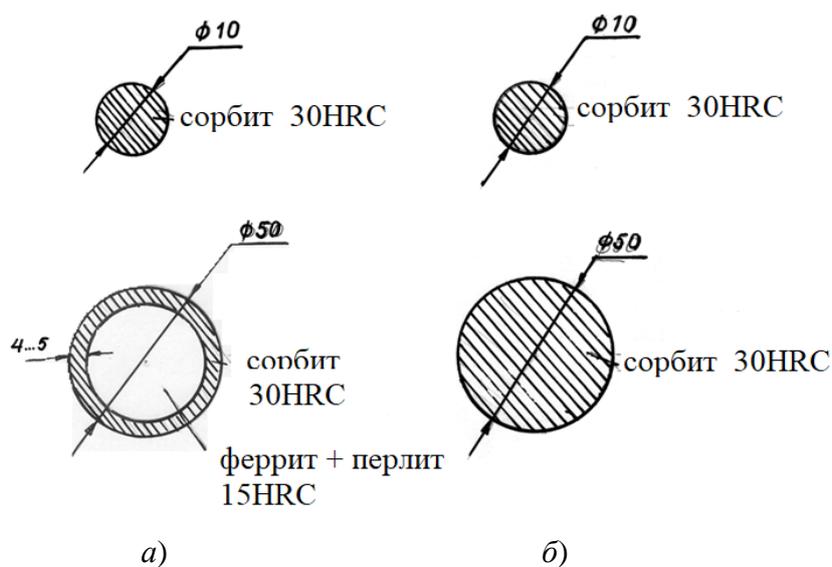
Сталь	Температура, °С			Механические свойства (не менее)				
	закалки		отпуска	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	КСИ, МДж/м <sup>2</sup>
	I	II						
15X	880	770...820	180	700	500	12	45	0,7
15XФ	880	760...810	180	750	550	13	50	0,8
30 ХГТ	880	850	200	1500	1300	9	40	0,6
25 ХГМ	860	–	200	1200	1100	10	45	0,8
12X2H4A	860	760...800	180	1150	950	10	50	0,9
18X2H4MA	950	860	200	1150	850	12	50	1,0

### Улучшаемые (среднеуглеродистые) стали

Улучшаемые стали содержат 0,3...0,4% С и различное количество легирующих элементов, суммарное количество которых обычно не превышает 4...5%.

Основное назначение легирования – повышение прокаливаемости. Чем больше легирована сталь, тем в большем сечении она прокаливается насквозь. Необходимую прокаливаемость можно получить путем увеличения количества какого-либо одного элемента, но в этом случае сталь заметно теряет вязкость. Поэтому выгодно легировать разными элементами, но вводить их в сталь понемногу, ~1,0...1,5% каждого. При таком легировании вязкость снижается незначительно.

Если сравнить свойства разных улучшаемых легированных сталей после одинаковой термообработки (закалка + высокий отпуск на сорбит), то при сквозной прокаливаемости механические свойства будут очень близкими. По этой причине не механические свойства, а прокаливаемость определяет выбор стали для той или иной детали. На рисунке 48 показано, как изменяются свойства сталей 40 и 40ХНМ



**Рис. 48. Влияние прокаливаемости на свойства сталей:**

*a* – сталь 40; *б* – сталь 40 ХНМ

в зависимости от сечения детали после одинаковой термической обработки: закалки на мартенсит и высокого отпуска на сорбит (30HRC).

Из рисунка 48 видно, что преимущества легированной стали, по сравнению с углеродистой, проявляются лишь в сечениях диаметром более 10...15 мм.

Другими словами, наиболее высокий уровень механических свойств достигается в том случае, если сталь, выбранная для данного сечения, прокаливается насквозь.

В таблице 2 указаны значения критического диаметра<sup>1</sup> и порог хладноломкости.

## 2. Критический диаметр и порог хладноломкости некоторых улучшаемых сталей

Сталь	Критический диаметр, мм	Порог хладноломкости $T_{50}$ , °C
40	10	-20
40X	15	-50
40XM	20	-60
40XГР	30	-20
40XHM	50	-80
30XH2MФ	100	-80

<sup>1</sup> Критический диаметр ( $D_k$ ) – это максимальный диаметр прутка, в котором сталь прокаливается насквозь в данном охладителе (для углеродистых сталей закалочной средой является вода, а для легированных – масло).

Таким образом, основные критерии при выборе марки стали можно сформулировать следующим образом:

1. Выбор марки стали (степень легирования) определяется размерами термически обрабатываемой детали.
2. Заданный уровень прочности достигается соответствующей температурой отпуска.
3. Так как наличие концентраторов и динамические нагрузки уменьшают вязкость аналогично снижению температуры, то для работы в таких условиях необходимо применять сталь, легированную элементами, понижающими температуру перехода в хрупкое состояние.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какие стали относятся к цементуемым?
2. Цель легирования цементуемых сталей.
3. Назовите несколько марок цементуемых легированных сталей.
4. Кратко опишите режим термообработки цементуемых легированных сталей, укажите структуру и свойства после каждого этапа термообработки сталей.
5. Назовите область применения цементуемых сталей.
6. Укажите примерное содержание углерода в улучшаемых сталях.
7. Цель легирования улучшаемых сталей.
8. Назовите несколько марок улучшаемых сталей.
9. Опишите режим термообработки улучшаемых сталей, укажите структуру и свойства (HRC) после каждого этапа термообработки.
10. Укажите примерное значение предела прочности сталей 40, 40X, 40XГ при полной прокаливаемости.

11. Укажите область применения улучшаемых сталей.

12. Сравните свойства сталей 40 и 40ХН в сечениях  $\varnothing 10$  и  $\varnothing 35$  после улучшения.

### *Высокопрочные стали*

Современная техника стала предъявлять более высокие требования: для ряда деталей требуются материалы с прочностью  $\sigma_b > 180 \dots 200$  кгс/мм<sup>2</sup> (1800...2000 МПа). Такие стали получили название высокопрочных.

Прочность после обычной термообработки (закалка + отпуск) зависит от содержания углерода: чем больше углерода, тем выше прочность. Предельным значением содержания углерода следует принять ~0,4% С. В такой стали после отпуска 200 °С предел прочности составляет примерно 170...200 кгс/мм<sup>2</sup> (1700...2000 МПа). При увеличении содержания углерода (>0,4%) предел прочности не возрастает и становится нестабильным из-за того, что при  $\sigma_b > 200$  кгс/мм<sup>2</sup> разрушение становится полностью хрупким. Поэтому стали в таком состоянии (>0,4% С,  $\sigma_b \geq 200$  кгс/мм<sup>2</sup>) применяются редко, лишь при отсутствии динамических нагрузок и в деталях, не имеющих концентраторов напряжений.

В последние годы созданы и разрабатываются методы повышения прочности сталей без заметного снижения вязких свойств. К наиболее перспективным относятся следующие.

1. Наиболее простым решением является легирование стали никелем, который повышает вязкость и снижает температуру перехода в хрупкое состояние. Однако превышение содержания никеля более 4% приводит к появлению остаточного аустенита после закалки, продукты распада которого имеют пониженную прочность и вязкость. Кроме

того, никель понижает температуру  $A_1$ , что делает невозможным проведение высокого отпуска. Улучшить свойства высоконикелевой стали удалось легированием кобальтом, который повышает температуру  $A_1$  и смещает весь интервал мартенситного превращения в область положительных температур. Примером может служить сталь 30Н9К4, имеющая после обычной термической обработки (закалка + отпуск  $200\text{ }^\circ\text{C}$ )  $\sigma_B \geq 160\text{ кгс/мм}^2$  ( $1600\text{ МПа}$ ),  $\psi = 60\%$ ,  $T_{xp} = -100\text{ }^\circ\text{C}$  и  $a_n \approx 4\text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$ .

2. Использование термомеханической обработки (ТМО). Термомеханическая обработка совмещает в единый технологический процесс два механизма упрочнения: интенсивную пластическую деформацию аустенита и последующую закалку. Различают два вида ТМО:

- а) высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО);
- б) низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО).

ВТМО проводится при температуре выше  $A_3$  и сразу же делается закалка с тем, чтобы в наклепанном с высокой плотностью дислокаций аустените не успели произойти рекристаллизационные процессы. После закалки из такого аустенита образуется мелкоигльчатый мартенсит.

При НТМО пластическую деформацию проводят в области повышенной устойчивости переохлажденного аустенита ( $\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ ), а затем с этих температур проводят закалку.

После ВТМО среднеуглеродистых сталей (30ХГСА; 40ХН; 40ХНМА; 38ХНЗМА) получают высокий комплекс механических свойств:

$$\sigma_B \approx 185\text{...}200\text{ кгс/мм}^2\text{ (}1850\text{...}2000\text{ МПа)}; \sigma \approx 50\%; a_n \approx 5\text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2.$$

Наибольшее упрочнение получается при НТМО ( $\sigma_B \approx 280\text{ кгс/мм}^2$ ), но выполнить ее технологически сложнее, чем ВТМО, поэтому НТМО используется значительно реже.

### *Мартенситно-стареющие стали*

Эти стали относятся к группе сталей с интерметаллидным упрочнением (мартенситно-стареющие – американское название Марэджинг). В них в результате закалки образуется безуглеродистый мартенсит, в котором при последующем отпуске ( $\sim 500$  °С) выделяются высокодисперсные фазы типа NiTi, Ni<sub>3</sub>Ti, Ni<sub>3</sub>Al и др.

Наиболее распространенной сталью типа «стареющий мартенсит» является сталь следующего состава: <0,03% С, 18% Ni, 10% Co, 5% Mo, 0,5% Ti, 0,1% Al (Н18К10М5ТЮ), в которой весь интервал мартенситного превращения лежит выше комнатной температуры ( $M_n \approx 200$  °С). Из-за высокой степени легирования эту сталь при закалке можно охлаждать на воздухе. Полученный мартенсит имеет сравнительно невысокую прочность и высокие показатели пластичности. В таком состоянии сталь хорошо поддается таким технологическим операциям, как обработка давлением, резанием и т.д.

После отпуска-старения при 480...500 °С формируются окончательные прочностные свойства, которые у стали Н18К10М5ТЮ составляют примерно  $\sigma_B = 180$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma = 15\%$ ;  $\psi = 65\%$ , а у стали с 25% Ni  $\sigma_B = 220$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma = 12\%$   $\psi = 55\%$ .

Сравнительно недавно разработан новый тип высокопрочных сталей, названный трип-сталями. В нашей литературе их еще называют ППП-сталями («пластичность, наведенная превращением»).

Идея упрочнения состоит в том, чтобы в этих сталях после закалки (с 1000...1100 °С) получить аустенит,  $M_n$  и  $M_D$  ( $M_D$  – температура начала образования мартенсита при пластической деформации) которого расположены ниже 0 °С. После закалки следует пластическая деформация при температурах не выше температуры рекристаллизации (ниже

600 °С). При этой температуре аустенит обедняется углеродом и легирующими (за счет выделения карбидов и интерметаллидных фаз) элементами. В результате чего точка  $M_D$  такого аустенита перемещается в область положительных температур, поэтому пластическая деформация сопровождается образованием мартенсита, и сталь приобретает высокопрочное состояние.

Типичный состав трип-сталей: 0,3% С, 9% Cr, 8% Ni, 4% Mo, 2% Mn, 2% Si. Существуют и другие составы трип-сталей.

Необходимо учитывать еще один важный фактор, который влияет на прочностные свойства, особенно на пластичность – это чистота стали по вредным примесям (H<sub>2</sub>, N, O<sub>2</sub>, S, P и др.) Чем меньше примесей, тем надежнее металл в условиях эксплуатации.

Научные достижения в области металловедения и металлургии позволяют прогнозировать, что в ближайшем будущем будут созданы сплавы с  $\sigma_B \approx 320...350$  кгс/мм<sup>2</sup> и  $\sigma_{0,2} \approx 280$  кгс/мм<sup>2</sup>.

### *Строительные стали*

Строительные стали применяются для изготовления строительных конструкций – мостов, ферм, газо- и нефтепроводов, котлов, крановых конструкций и т.д. Так как большинство строительных конструкций сварные, то главным технологическим свойством строительных сталей является хорошая свариваемость. Хорошая свариваемость обеспечивается главным образом отсутствием хрупких закалочных структур в сварном шве и околошовной зоне. Это достигается низким содержанием углерода ( $\leq 0,25...0,22\%$  С) и легированием небольшим количеством недорогих легирующих элементов, таких как марганец и кремний.

Широкое применение находят дешевые стали обыкновенного качества группы В (ВСт3, ВСт3кп, ВСт3пс) с пределом прочности  $\sigma_B \leq 45$  кгс/мм<sup>2</sup> и пределом текучести  $\sigma_{0,2} \leq 25$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Низколегированные стали (17ГС, 16Г2АФ, 08Г2СФБ и др.) имеют более высокие прочностные показатели ( $\sigma_B \approx 55...60$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2} \approx 35...45$  кгс/мм<sup>2</sup>) и более низкие температуры перехода в хрупкое состояние. Так, у стали ВСт3 эта температура находится в районе 0 °С, а у нормализованной стали 17ГС температура хладноломкости составляет около –30 °С.

В особую группу выделяются арматурные стали, которые применяют для армирования железобетонных конструкций. Эти стали поставляются в виде прутков гладкого и периодического профиля.

### *Пружинные стали*

Пружины, рессоры и другие упругие элементы работают при напряжениях ниже предела упругости (текучести). Так как пластическая деформация в таких деталях недопустима, то от пружинных материалов не требуется высокой ударной вязкости и высокой пластичности. Главное требование к ним – высокий предел упругости. Высокий предел упругости достигается в стали закалкой и отпуском при температуре 300...450 °С.

Пружинные стали, как правило, содержат 0,5...0,7% С и дополнительно легированы марганцем (~1%) и кремнием (1...2%). Для наиболее ответственных пружин применяют сталь 50ХФА, обладающую наиболее высокими упругими свойствами.

Из часто применяемых пружинных сталей следует назвать стали: 65; 50С2; 65Г; 50ХФА. Термообработка этих сталей заключается в закалке от 850...870 °С в воде (для нелегированных сталей) или в масле (для легированных сталей) на мартенситную структуру. После чего делается отпуск при 420...460 °С на твердость 40...45 НРС. Это соответствует прочности  $\sigma_B \approx 130...160$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Поверхностные дефекты заметно снижают усталостную прочность упругих элементов, поэтому к качеству поверхности должны предъявляться весьма высокие требования.

### *Шарикоподшипниковые стали*

Стали, применяемые для шарикоподшипников, должны иметь высокие значения твердости и контактной прочности. Такая сталь должна быть высокоуглеродистой, чтобы обеспечить максимальную твердость мартенсита после закалки и достаточно легирована для получения необходимой прокаливаемости.

ГОСТ 801–78 предусмотрены четыре основные марки стали: ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ. Буква Ш обозначает шарикоподшипниковую сталь, цифра после буквы Х указывает на содержание хрома в десятых долях процента; СГ – легирование кремнием (~0,85%) и марганцем (до 1,7%).

Указанные стали предназначены для шариков и роликов определенного диаметра. Сталь ШХ9 – для шариков диаметром до 13,5 мм и роликов до 10 мм, сталь ШХ15СГ – для шариков диаметром свыше 30 мм и колец толщиной стенки более 15 мм.

Для крупногабаритных роликовых подшипников диаметром до 2 м применяют стали 12ХН3А, 12ХН4А, подвергая их цементации на большую глубину (3...6 мм).

Подшипники, работающие в агрессивных средах, изготавливают из коррозионно-стойкой стали 95Х18 (0,95% С, 18% Cr).

Термообработка сталей типа ШХ6 – ШХ15СГ состоит в закалке от 820...850 °С и 2-часовом отпуске при 150...170 °С на структуру отпущенный мартенсит + карбиды с твердостью не ниже 62 НRC. Для особо ответственных прецизионных подшипников перед отпуском при-

меняют обработку холодом при  $-70...-80$  °С. При этом остаточный аустенит ( $\sim 10...15\%$ ) превращается в мартенсит, что стабилизирует размеры и увеличивает твердость до 64 HRC.

### Вопросы для самоконтроля

#### *Высокопрочные стали*

1. Какие стали называют высокопрочными?
2. Перечислите методы получения высокопрочных свойств сталей и охарактеризуйте их.

#### *Строительные стали*

3. Назовите требования, предъявляемые к строительным сталям.
4. Какие стали относятся к арматурным? Назовите хотя бы по одной марке каждой группы арматурных сталей.

#### *Пружинные стали*

5. Назовите основные требования, предъявляемые к пружинным сталям.
6. Укажите содержание углерода в пружинных сталях.
7. Цель легирования пружинных сталей.
8. Назовите несколько марок углеродистых и легированных пружинных сталей.
9. Опишите режим термообработки пружинных сталей, укажите структуру и свойства (твердость, прочность) сталей после каждого этапа термообработки.

#### *Шарикоподшипниковые стали*

10. Требования, предъявляемые к шарикоподшипниковым сталям.
11. Цель легирования шарикоподшипниковых сталей.

12. Назовите 1–2 марки шарикоподшипниковых сталей, расшифруйте их состав по основным элементам.

13. Назовите режим термообработки шарикоподшипниковой стали и укажите структуру и свойства (твердость) после каждого этапа термообработки.

## 8.8. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

В отличие от изнашивающихся частей деталей машин (валы, кулачки и т.д.), у режущего инструмента работает на износ очень тонкая полоска металла режущего лезвия. Устойчивость против износа достигается высокой твердостью ( $>60$  HRC). Для обеспечения такой твердости сталь должна содержать повышенное количество углерода ( $\sim 1\%$ ). При увеличении скорости резания (скорости отделения стружки) на режущем лезвии возрастает температура. Так, при резании со скоростью  $v = 5$  м/мин температура на режущей кромке не превышает  $\sim 250$  °С, при  $v = 50$  м/мин она уже приближается к  $500$  °С, а при скорости резания  $300\dots 350$  м/мин температура резца в зоне резания достигает  $800$  °С и более. Отсюда видно, что инструмент из обычной инструментальной углеродистой стали, например У12, при скорости резания  $50$  м/мин применять нельзя, так как его лезвие быстро нагреется до  $500$  °С, мартенситная структура распадется на феррито-цементитную смесь, твердость снизится до  $40\dots 30$  HRC и инструмент немедленно затупится. Поэтому для режущего инструмента важным показателем является сохранение твердости при нагреве. Это качество стали называется красностойкостью.

Если инструмент работает в легких условиях (напильники, ножницы, ножовочные полотна, метчики, измерительный инструмент

и т.д.), т.е. когда он не нагревается в процессе работы более 200...250 °С, то можно применять сравнительно дешевые углеродистые и низколегированные стали.

Для более тяжелых условий, когда режущая кромка нагревается >250...300 °С (сверла, резцы, фрезы), необходимо уже применять специальные стали типа быстрорежущих, твердые сплавы и сверхтвердые материалы.

Для разных видов инструмента применяют стали разного типа. Инструментальные стали можно разделить на следующие категории:

- 1) пониженной прокаливаемости (преимущественно обычные углеродистые);
- 2) повышенной прокаливаемости (легированные);
- 3) штамповые;
- 4) быстрорежущие.

В отдельную группу инструментальных материалов выносят твердые сплавы и сверхтвердые материалы, которые не являются сталями.

#### *Стали пониженной прокаливаемости*

В эту группу входят все углеродистые стали и некоторые низколегированные инструментальные стали. Закаляются эти стали только при охлаждении в воде. Сердцевина инструмента остается незакаленной. Эти свойства сталей необходимо учитывать при изготовлении инструмента и его эксплуатации.

Стали У7, У8 применяются для изготовления инструмента, подвергающегося в процессе работы ударам: зубила, молотки, топоры, мелкий штамповый инструмент (матрицы, пуансоны), столярный инструмент (долота, стамески).

Стали У9, У10 применяются для инструмента, не подвергающегося сильным ударам при максимальной твердости на режущей грани (метчики, развертки, ножи для резки металла, кожи и т.д.).

Стали У12, У13 применяются для инструмента с максимальной твердостью и износостойкостью (металлорежущий и мерительный инструменты, напильники, граверный инструмент, волочильные доски).

Стали 85ХФ, Х06 применяются для тех же целей, что и У9, У10 и У12. Небольшое количество хрома и ванадия устраняет склонность углеродистых сталей к образованию мягких пятен на поверхности вследствие большей прокаливаемости. Сталь 85ХФ широко применяется для лезвийного деревообрабатывающего инструмента. Эта сталь имеет очень мелкое зерно, поэтому обладает повышенной вязкостью; при заточке можно получить очень тонкое лезвие.

Термообработка сталей заключается в закалке в воде на мартенсит (У7 – У9) и мартенсит плюс цементит вторичный (У10 – У13) с последующим низким отпуском при 250...280 °С на твердость 56...58 HRC для ударного инструмента (зубила, топоры, молотки, матрицы для холодной штамповки) и при 160...200 °С на твердость 60...64 HRC для лезвийного инструмента (ножи, ножницы, напильники, ножовочные полотна, метчики развертки, плашки и т.д.).

#### *Стали повышенной прокаливаемости*

Эти стали могут содержать 1...3% легирующих элементов и от 0,85 до 1,50% С. Чем больше углерода, тем выше твердость и износостойкость, но меньше сопротивление ударам. Поэтому для ударного инструмента рекомендуется применять стали с меньшим содержанием углерода. Легирование увеличивает прокаливаемость и дает возможность вести закалку не в воде, а в масле. Это значительно снижает веро-

ятность образования трещин при закалке и уменьшает коробление сложного лезвийного и штампового инструмента.

Наибольшее применение в практике нашли стали X, 9XC, XГ, ХВГ, ХВ5. В стали ХВГ после закалки сохраняется повышенное количество остаточного аустенита, присутствие которого хотя и несколько снижает твердость, но зато делает сталь малодеформирующейся в процессе закалки из-за незначительных объемных изменений (мартенсит из всех структурных составляющих имеет наибольший объем, а аустенит – наименьший).

Наличие повышенного количества вольфрама в стали ХВ5 сильно измельчает избыточную карбидную фазу, что повышает твердость закаленной стали до 69...70 HRC. Высокую твердость стали ХВ5 используют при обработке очень твердых материалов (например, при обработке камня) и при так называемой алмазной расточке (чистовая обработка прецизионных деталей).

Термообработка сталей повышенной прокаливаемости заключается в закалке в масле (или в воде для сталей В1 и ХВ5) от температур 800...850 °С в зависимости от состава сталей с последующим низким отпуском при 150...200 °С на твердость 60...65 HRC, опять же в зависимости от типа стали и условий работы инструмента.

Применяют стали повышенной прокаливаемости для той же инструментальной оснастки что и углеродистые, но более крупных сечений и сложных очертаний.

Необходимо учитывать, что рассматриваемые стали имеют более высокую устойчивость против отпуска. Например, закаленная сталь У10 при нагреве до 300 °С снижает твердость с 64 до 52 HRC, а сталь 9XC – с 64 всего лишь до 60...62 HRC.

### *Быстрорежущие стали*

Быстрорежущие стали отличаются от обычных легированных инструментальных сталей тем, что не изменяют твердости и режущих свойств до 500...550 °С, что позволяет при механической обработке применять высокие скорости резания (~50 м/мин).

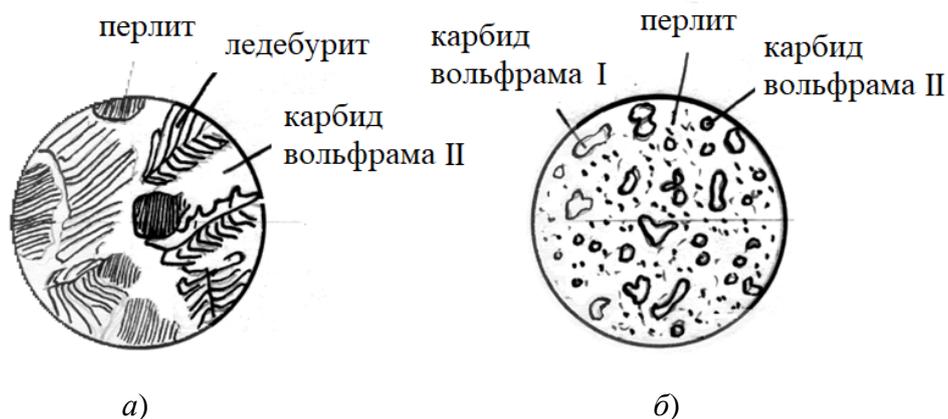
Если распад мартенсита и снижение твердости в углеродистых и легированных (повышенной прокаливаемости) сталях становятся заметными при температурах 250...280 °С, то в быстрорежущих сталях этот процесс при 500...550 °С только начинается. В углеродистых сталях ранний распад мартенсита (выделение частиц Fe<sub>3</sub>C) связан с достаточной диффузионной подвижностью углерода и железа в кристаллической решетке.

Чтобы сталь стала более устойчивой против отпуска (нагрева), ее необходимо легировать такими элементами, которые имели бы низкую диффузионную подвижность при высоких температурах и были бы более сильными карбидообразователями, чем железо, т.е. могли «удерживать» около себя углерод. Такими элементами являются Cr, W, Mo, V. Однако их необходимо вводить в сталь в таком количестве, чтобы они могли связать весь углерод в специальные карбиды.

Классической и до недавнего времени наиболее распространенной быстрорежущей сталью является сталь P18 (0,7...0,8% C; 17,5...18,5% W; 3,8...4,4% Cr; 1,0...1,4% V; ~1% Mo, Fe – остальное).

В последнее время находит применение сталь P6M5, где дефицитный вольфрам частично заменен молибденом.

Находят применение стали, дополнительно легированные кобальтом (~5...10% Co) и ванадием (до 5%): P9K10; P10K5Ф5; P18K5Ф2, у которых красностойкость достигает ~630...640 °С.



**Рис. 49. Микроструктура быстрорежущей стали:**

*a* – после литья (ледебуритная эвтектика); *б* – послековки и отжига

Для получения максимальных свойств все быстрорежущие стали требуют очень тщательного соблюдения режима технологических операций при термообработке.

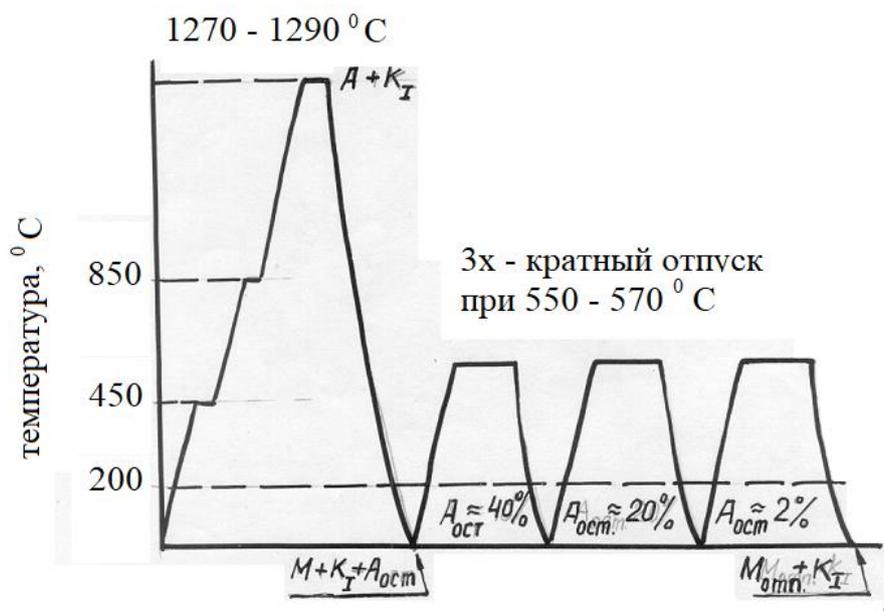
В литом состоянии структура сталей крупнозернистая, что объясняет низкие значения прочностных показателей, рис. 49.

Литые заготовки быстрорежущей стали тщательно проковывают с тем, чтобы разбить скелетообразную эвтектику, представляющую собой выше температуры  $A_1$  (~800 °C) смесь первичных карбидов вольфрама и аустенита. Выше точки  $A_1$  кроме ледебуритных фаз в микроструктуре имеется аустенит и избыточные (вторичные) карбиды вольфрама, которые выделяются из аустенита при охлаждении. При температуре  $A_1$  аустенит испытывает превращение в перлит. При комнатной температуре послековки и последующего отжига структура быстрорежущей стали состоит из сорбитообразного перлита, вторичных и первичных карбидов, рис. 49.

Для быстрорежущих сталей обычно применяют изотермический отжиг: нагрев до 860...900 °C, охлаждение до 700...750 °C (ниже  $A_1$ )

и изотермическая выдержка при этой температуре 1,5...2,0 ч. После изотермического отжига сталь имеет твердость 207...250 НВ (2070...2500 МПа) и сравнительно хорошо обрабатывается резанием. Высокие режущие свойства и теплостойкость быстрорежущая сталь приобретает после окончательной термообработки, закалки и трехкратного отпуска. Нагрев под закалку необходимо вести медленно с остановками при 450 и 850 °С из-за плохой теплопроводности стали. Температура нагрева достигает 1300 °С. Такая высокая температура необходима для того, чтобы как можно больше растворить вторичных карбидов и получить аустенит, максимально легированный вольфрамом, хромом, ванадием и др. Из более легированного аустенита при закалке получается более легированный мартенсит, а значит, и более устойчивый против отпуска.

На рисунке 50 показана схема типовой термообработки быстрорежущей стали типа Р18 и Р6М5.



**Рис. 50. Схема термической обработки быстрорежущей стали без обработки холодом**

После закалки в масле остается около 40% непревращенного (остаточного) аустенита ( $A_{ост}$ ). Сталь в таком состоянии имеет пониженную твердость (~59 HRC) из-за значительного количества аустенита. В процессе охлаждения от температуры отпуска 550...570 °С остаточный аустенит дополнительно превращается в мартенсит. После 3-кратного отпуска аустенита остается не более 3...5%, а твердость возрастает до 65 HRC.

Избавиться от  $A_{ост}$  можно и другим способом. После закалки охладить до температуры  $M_k \approx -80...-100$  °С. При обработке холодом мартенситное превращение продолжается и аустенита остается не более 10%. Последующий однократный отпуск (550...570 °С) уменьшает количество аустенита до 3%.

### Вопросы для самоконтроля

#### *Инструментальные стали*

1. Назовите категории инструментальных сталей (классификация).
2. Какие стали относятся к сталям с пониженной прокаливаемостью. Назовите несколько марок и укажите область их применения.
3. Назначьте режим термообработки сталей У7 (зубила) У10 – У12 (метчики, плашки); назовите микроструктуру и твердость после каждого этапа термообработки.
4. Какие стали относятся к сталям с повышенной прокаливаемостью? Назовите несколько марок, цель легирования и область применения?
5. Сравните прокаливаемость сталей У10 и 9ХС, устойчивость против отпуска.

6. Назначьте режим термообработки стали 9ХС для получения твердости  $\geq 62$  HRC и охарактеризуйте микроструктуру после каждого этапа термообработки.

#### *Быстрорежущие стали*

7. Чем отличаются (по свойствам) быстрорежущие стали от обычных легированных сталей?

8. Какими легирующими элементами и в каком количестве легируют быстрорежущие стали? Назовите цель и механизм влияния легирования.

9. Назовите наиболее распространенную марку быстрорежущей стали и укажите примерный состав по основным элементам.

10. Охарактеризуйте микроструктуру литой быстрорежущей стали и свойства.

11. Какая цель преследуется при тщательной проковке и отжиге литой быстрорежущей стали?

12. Назначьте режим окончательной термообработки быстрорежущей стали. Охарактеризуйте микроструктуру и свойства (твердость) после каждого этапа термообработки стали.

13. Какую цель преследует обработка холодом?

14. Укажите область применения быстрорежущих сталей.

#### *Штамповые стали*

Обработка металлов давлением (изменение формы за счет пластической деформации) производится специальными инструментами: штампами, пуансонами, роликами, валками, бойками и т.д. Стали, используемые для такого инструмента, называют штамповыми.

В зависимости от условий работы инструмента штамповые стали можно разделить на две группы: деформирующие металл в холодном

состоянии (холодные штампы) и деформирующие металл в горячем состоянии (горячие штампы).

От металла холодных штампов требуется максимально возможная твердость и износостойкость. Если штамп работает с ударами, то сталь должна иметь еще и хорошую вязкость. Для повышения вязкости приходится поступиться твердостью.

В горячих штампах рабочая поверхность соприкасается с нагретым до высокой температуры металлом. Поэтому к металлу горячих штампов предъявляются дополнительные требования. Основные из них следующие:

*Жаропрочность* – сохранение высокого значения предела текучести и сопротивления истиранию в нагретом состоянии.

*Термостойкость*. Работа горячего штампа связана с циклическими нагревами и охлаждением, когда металл испытывает чередующиеся расширения и сжатия, что приводит к появлению на рабочей поверхности разгарных трещин (термическая усталость). Поэтому металл, применяемый для горячих штампов, должен обладать высоким сопротивлением термической усталости.

*Прокаливаемость*. Для получения хороших свойств по всему сечению, особенно вязкости, штамповая сталь должна глубоко прокаливаться.

*Слипаемость*. При высоких температурах и давлениях может происходить схватывание деформируемого металла с металлом штампа. Это явление ускоряет износ штампа. Поэтому процессы схватывания (слипаемость) должны быть минимальными.

Для штампов холодного ударного деформирования используются стали, содержащие 0,4...0,6% С и легированные хромом, кремнием, вольфрамом в целях повышения прокаливаемости. Стали, содержащие

вольфрам, обладают повышенной вязкостью, так как вольфрам заметно измельчает зерно в стали.

Наиболее широкое применение нашли стали 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, 6ХВ2С. Термическая обработка их заключается в закалке от температур 840...880 °С для сталей 4ХС и 6ХС и 860...900 °С – для сталей 4ХВ2С и 6ХВ2С. Закалка ведется в масле. Температура последующего отпуска назначается в зависимости от необходимой твердости и составляет обычно 240...270 °С. Твердость в этом случае находится в пределах 51...53 HRC.

Для штампов, деформирующих металл без ударов, чаще всего используются сравнительно дешевые высокохромистые стали, содержащие 6...12% Cr и 1,0...2,0% С.

Наиболее износостойкими являются стали с 12% Cr. По своей природе эти стали относятся к ледебуритному классу и этим они похожи на быстрорежущие. Теплостойкость высокохромистых сталей не превышает 400...450 °С. Интересной особенностью сталей типа X12Ф1 является то, что количество остаточного аустенита в них после закалки может меняться в широких пределах – от 0 до 100%. Если после закалки получить мартенситную структуру без остаточного аустенита, то все размеры инструмента увеличатся, так как мартенсит имеет наибольший удельный объем из всех структурных составляющих. При 100% остаточного аустенита объем инструмента (и его размеры) уменьшается, так как аустенит имеет наименьший удельный объем из всех структурных составляющих. При определенной температуре закалки ~1120 °С соотношение мартенсита и аустенита (~40%) станет таким, что объем закаленной стали будет точно равен исходному.

В практике термообработки всегда имеется вероятность отклонений от заданной температуры закалки. Поэтому после закалки штамп

может изменить размеры в ту или иную сторону, по сравнению с исходными. В высокохромистых сталях возможна так называемая термическая доводка размеров.

Если штамп «сел», то делается отпуск при 520 °С. В результате чего аустенит частично превратится в мартенсит и размеры увеличатся. Если же размеры штампа при закалке возросли, то отпуск делается при 350 °С. Аустенит при этих температурах остается не превращенным, а тетрагональный мартенсит превращается в отпущенный и размеры уменьшаются. Термической доводкой можно довести размеры крупных штампов до заданных с точностью  $\pm 0,1$  мм.

Технологическая обработка высокохромистых сталей состоит из следующих основных операций. Заготовка для будущего инструмента тщательно проковывается с тем, чтобы разрушить грубую карбидную эвтектику и уменьшить карбидную ликвационную неоднородность (строчечность карбидов хрома). Послековки проводится изотермический отжиг. Отожженная сталь имеет структуру, подобную быстрорежущей стали: первичные карбиды хрома, вторичные карбиды хрома и сорбитообразный перлит. Из отожженной стали, которая имеет твердость  $\sim 250$  НВ (2500 НВ, МПа), изготавливают инструмент и подвергают окончательной термообработке. Типовая термообработка заключается в закалке в масле от 1170 °С  $\pm 10$ . Структура после закалки: мартенсит + карбиды +  $\sim 15\%$  аустенита; твердость 62...64 HRC. Отпуск проводят при 150...160 °С, твердость при этом практически не изменяется.

В целях повышения вязких свойств отпуск делают при  $\sim 200$  °С на твердость 58...60, но износостойкость в этом случае будет меньше.

Для штампов горячего деформирования наиболее распространенной (и самой лучшей) является сталь 5ХНМ. Остальные (5ХГМ, 5ХНТ, 5ХНСВ) представляют собой стали-заменители, в которых никель или молибден заменены другими элементами.

Из сталей этих марок изготавливают так называемые кубики, т.е. поковки большого размера призматической формы, на одной из плоскостей которых вырезается рабочая фигура. Послековки проводится изотермический отжиг: аустенизация при 850...880 °С, охлаждение до 600...650 °С и выдержка до окончания распада аустенита. Штампы, прошедшие механическую обработку, закаляют по режиму: медленный нагрев до температуры на 20...40 °С выше  $A_{c3}$  (для стали 5ХНМ – 820...860 °С), охлаждение в масле до 100...150 °С (затем на воздухе), немедленный отпуск при 520...540 °С (при высоте штампа 300...400 мм) в течение ~10 ч на твердость 387...445 НВ (3870...4450 НВ, МПа).

Для прессового инструмента и штампов горизонтально-ковочных машин рекомендуется применять стали типа 3Х2В8, похожие на быстрорежущие, но из-за пониженного содержания углерода имеющие повышенную вязкость.

Послековки и отжига делается необходимая механическая обработка инструмента, затем закалка в масле от 1100 °С на твердость 49...51 HRC (структура – мартенсит, небольшое количество остаточного аустенита и избыточные карбиды). Отпуск проводится при температуре 600...620 °С на твердость ~38...44 HRC.

### **Вопросы для самоконтроля**

#### *Штамповые стали*

1. Для изготовления каких инструментов применяются штамповые стали?
2. На какие группы делятся штамповые стали?
3. Какие требования предъявляются к сталям для холодных штампов?

4. Какие требования предъявляются к сталям для горячих штампов?

5. Назовите 2–3 марки сталей для холодных штампов ударного деформирования. Укажите цель легирования.

6. Назначьте режим термообработки одной из выбранных сталей, охарактеризуйте микроструктуру и свойства (твердость) после каждого этапа термообработки.

7. Охарактеризуйте структуру и свойства высокохромистой штамповой стали (например, X12Ф1). Почему эту сталь называют малодеформирующейся при закалке?

8. Опишите технологическую обработку стали типа X12Ф1. Охарактеризуйте структуру и свойства (твердость) после каждого этапа обработки.

9. Назовите 2–3 марки сталей для горячих штампов. Назначьте режим термообработки одной из них, охарактеризуйте микроструктуру и свойства (твердость) после каждого этапа термообработки.

10. Выберите сталь для горячих штампов горизонтально-ковочных машин. Назначьте режим термообработки и укажите структуру и свойства (твердость) после каждого этапа термообработки.

#### *Твердые сплавы*

Твердые сплавы имеют очень высокую твердость ( $>70$  HRC) и износостойкость. Такие свойства сохраняются до температур  $850\text{--}900$  °С, что значительно превышает красностойкость лучших быстрорежущих сталей, нагрев режущего лезвия которых выше  $600\text{--}650$  °С недопустим. По этой причине режущий инструмент, оснащенный твердым сплавом, выдерживает скорости резания  $>300$  м/мин, а инструмент из быстрорежущей стали –  $\sim 50$  м/мин.

Твердые сплавы изготавливают в виде пластинок, которыми оснащают режущую часть инструмента. Твердые сплавы производят методом порошковой металлургии из порошков карбидов вольфрама, титана, тантала и связки-кобальта.

Различают три группы твердых сплавов. Однокарбидные по составу и структуре. Это сплавы типа ВК: ВК2, ВК3, ВК6, ВК8, в которых содержится от 2 до 8% Со (К2...К8), остальное – карбид вольфрама.

Двухкарбидные (ВТК), состоящие из карбидов титана (TiC), карбидов вольфрама (WC) и кобальтовой связки: Т15К6; Т5К10 и др. Марка двухкарбидного сплава, например, Т15К6 расшифровывается так: 6% Со (К6), 15% TiC (Т15) и WC – остальное.

Сплавы типа ТК (Т30К6, Т60К6) по структуре относятся к однокарбидным, так как представляют собой твердый раствор вольфрама в карбиде титана (Ti, W)C; состав сплавов (на примере Т30К6) расшифровывается как 6% Со, 30% TiC, WC – остальное.

Сплавы типа ВК рекомендуется применять при обработке чугуна, ВТК – для обработки стали, а ТК применяют при обработке горных пород, бурении скважин.

### **Вопросы для самоконтроля**

#### *Твердые сплавы*

1. Сравните красностойкость твердых сплавов и быстрорежущих сталей.
2. Сравните допустимые скорости резания инструментами из быстрорежущих сталей и твердых сплавов.
3. Назовите три группы твердых сплавов.
4. Назовите и расшифруйте по одной марке твердых сплавов каждой группы. Укажите область применения.

## Специальные стали

### *Жаростойкость. Жаростойкие стали и сплавы*

Под жаростойкостью (окалиностойкостью) понимают сопротивление металла окислению при высоких ( $>550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) температурах. Начальная стадия образования окислой пленки чисто химический процесс. После образования окисного слоя процесс усложняется: требуется встречная диффузия кислорода атмосферы и металла через многофазный окисный слой.

Железо с кислородом образует несколько химических соединений (в соответствии с диаграммой Fe – O<sub>2</sub>): FeO (вюсит), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит) и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит).

Ниже  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$  окалина состоит из двух зон окислов Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Кристаллическая решетка этих соединений сложная, скорость диффузии железа и кислорода в них мала, поэтому окисление при температурах ниже  $570\text{...}550\text{ }^{\circ}\text{C}$  идет медленно.

При температурах выше  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$  основным окислом окарины является закись железа (FeO), которая имеет «рыхлую» кристаллическую решетку, через которую легко диффундирует как кислород, так и атомы железа. По этой причине скорость образования окарины выше  $570\text{ }^{\circ}\text{C}$  заметно ускоряется.

Для повышения окалиностойкости (жаростойкости) необходимо легировать сталь такими элементами, которые образуют плотную окисную пленку, через которую диффузия кислорода к основному металлу была бы затруднена. Такими элементами является Cr, Si, Al. Чем больше содержание этих элементов в стали, тем выше жаростойкость. Например, для обеспечения достаточной окалиностойкости при рабочей температуре  $850\text{...}900\text{ }^{\circ}\text{C}$  сталь должна содержать не менее 10% Cr, а при  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  – не менее 20...25 %Cr.

Из наиболее распространенных жаростойких сталей можно назвать 12Х17 (до 900 °С); 15Х25Т (до 1050 °С); 10Х23Н18 (до 1050 °С); 15Х25Н19С2Л (до 1050 °С).

### *Жаропрочность. Жаропрочные стали*

Жаропрочность – это способность материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах.

Если металл при комнатной температуре нагрузить постоянной нагрузкой выше предела текучести, то произойдет пластическая деформация. В результате возникнет упрочнение (наклеп) и деформация прекратится. Если же такое нагружение проводить при температурах выше температуры рекристаллизации, то возникший наклеп будет сниматься рекристаллизационными процессами, и металл будет продолжать деформироваться под постоянной нагрузкой вплоть до разгрузки. Чем больше действующие напряжения и выше температура, тем за меньший промежуток времени произойдет разрушение. Можно сказать, что при температурах  $>T_{рек}$  прочность металла зависит от времени действия нагрузки (или от времени жизни конструкции).

Явление, связанное с деформацией металла во времени под действием постоянного по величине напряжения, называется ползучестью.

Основными характеристиками жаропрочности являются длительная прочность  $\sigma_d$  и предел ползучести  $\sigma_p$ .

Длительная прочность – это напряжения, вызывающие разрушение металла за определенный промежуток времени при данной температуре. Например 1000-часовая прочность при 500 °С ( $\sigma_{1000}^{500}$ ).

Предел ползучести – это напряжение, вызывающее заданную скорость деформации при данной температуре. Например,

$$\sigma_{0,1\%;10000}^{700^0} = 10 \text{ кгс/мм}^2$$

означает напряжение ( $10 \text{ кгс/мм}^2$ ), которое вызывает за  $10\,000 \text{ ч}$   $0,1\%$  суммарной деформации.

Явление ползучести при высоких температурах отличают работу конструкции при температурах ниже температуры рекристаллизации, где это явление отсутствует. Ясно, что такое поведение металла необходимо учитывать при расчетах на прочность. В качестве примера приведем свойства стали X18H9T при  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если конструкция из этой стали должна «прожить»  $500 \text{ ч}$ , то разрушающие напряжения составят  $\sigma_d = 20 \text{ кгс/мм}^2$ , а если продолжительность эксплуатации достигает  $10\,000 \text{ ч}$ , то  $\sigma_d \approx 10 \text{ кгс/мм}^2$ .

По этой причине стационарная газовая турбина (срок эксплуатации  $>10\,000 \text{ ч}$ ) имеет большие размеры по сравнению с авиационной газовой турбиной такой же мощности, срок «жизни» которой составляет  $\sim 500 \text{ ч}$ .

#### *Влияние состава и структуры на жаропрочность*

Основное влияние на жаропрочные свойства оказывает температура, при которой становится заметной ползучесть. Эта температура определяется силами атомных связей, которые тем сильнее, чем выше температура плавления металла. Отсюда следует, что в качестве жаропрочных сплавов следует применять твердые растворы с элементами, повышающими температуру рекристаллизации. Как правило, это элементы с высокой температурой плавления. Жаропрочность можно повысить за счет дисперсного твердения (старения) пересыщенного твердого раствора. Однако необходимо иметь в виду, что такие сплавы применимы в условиях краткосрочной службы, так как через определенный промежуток времени может наступить «перестаривание» – коагуляция выделившейся упрочняющей фазы и быстрое снижение

жаропрочных свойств. Для длительной службы следует выбирать сплавы, не склонные к дисперсному твердению, т.е. структурно стабильные сплавы.

Жаропрочные сплавы условно делят на группы для работы в определенных интервалах температур: 350...550 °С (котлостроение); 550...650 °С (турбостроение и другие отрасли техники); >650 °С (газовые турбины, ракетная техника).

По структуре котельные жаропрочные стали могут быть перлитного (12ХМФ), мартенситного (12Х2МФБ) и мартенситно-ферритного (15Х11МБ, 10Х12В2МФ) классов.

Термообработка легированных котельных сталей заключается в закалке в масле (или на воздухе) с последующим высоким отпуском при температурах выше рабочих (~720...750 °С,  $A_{C1} = 760...780$  °С).

Для работы при температурах 600...700 °С (горячие детали газовых турбин и реактивных двигателей) применяют стали аустенитного класса. По структуре эти стали делятся на гомогенные и дисперсионно-твердеющие. Гомогенные стали в процессе эксплуатации практически не изменяют структуру. Наиболее часто применяются стали типа 10Х18Н10Т и 10Х14Н16Б. Термообработка этих сталей заключается в закалке от 1050...1100 °С в воде с последующим стабилизирующим отпуском при 750 °С. Закалка фиксирует аустенитную структуру с небольшим количеством второй фазы (главным образом карбидов хрома типа  $Cr_{23}C_6$ ). При отпуске происходит коагуляция избыточной фазы. Гомогенные стали рекомендуется применять для длительных сроков (>500 ч) службы.

Дисперсионные стали, кроме хрома и никеля, содержат такие элементы, как W, Ti, Mo, V в количествах, превышающих предел раство-

римости их в аустените (40X14H14B2M, 40X12H8Г8МФБ). После закалки с 1100...1050 °С в них, как и в гомогенных сталях, фиксируется аустенитная структура. При отпуске 650...750 °С из аустенита выделяются в значительном количестве дисперсные фазы (карбиды, интерметаллиды), которые заметно повышают жаропрочные свойства, по сравнению с гомогенными сталями. Однако это преимущество сохраняется при сравнительно кратковременных сроках службы (<500 ч). При более длительной эксплуатации дисперсные фазы скоагулируют (укрупняются). В результате жаропрочность заметно снизится и может стать меньше, чем у гомогенных.

В современных турбореактивных двигателях лопатки турбин разогреваются до температур 700...900 °С, и имеется тенденция к повышению этой температуры.

В этих условиях преимущественное применение имеют сплавы на никелевой основе, которые содержат хром (15...20%) и различные элементы в значительно меньших количествах (алюминий, титан, вольфрам, молибден, ванадий и др.).

Как и аустенитные стали, сплавы на основе никеля можно разделить на гомогенные (нихромы) и дисперсионно-твердеющие (нимоники).

*Нихромы* содержат никель (основа), хром, железо и другие элементы в таких количествах, что они полностью растворяются в гранецентрированной решетке никеля. В результате образуется однофазная (гомогенная) структура. Нихромы редко используются как жаропрочные материалы, а применяются в качестве реостатных сплавов и для нагревательных элементов электрических печей. В качестве примера можно привести нихром Х20Н80 ( $\leq 0,12\%$  С, 20% Cr, Ni – остальное).

### *Тугоплавкие металлы и сплавы*

К тугоплавким относятся металлы, температура плавления которых превышает 1700 °С. Это чаще всего металлы VA- и VIA-подгрупп: ванадий, ниобий, тантал, хром, молибден и вольфрам.

Температура рекристаллизации этих металлов находится в интервале от 1000 (молибден) до 1800 °С (рений). Более высокая температура рекристаллизации сплавов на основе перечисленных тугоплавких металлов, чем у сплавов на основе железа и никеля, позволяет использовать их как жаропрочные для горячих деталей ракетных двигателей при температурах от 1300 (сплавы на основе ниобия) до 2000...2500 °С (вольфрам и его сплавы).

Основными недостатками тугоплавких металлов являются плохая жаростойкость (кроме хрома) и повышенная хрупкость (кроме Та, Nb, Re).

Для защиты от окисления применяют окалиностойкие интерметаллидные термодиффузионные покрытия типа MoSi<sub>2</sub>, WSi<sub>2</sub>, и др.

Наибольшее распространение в настоящее время находят сплавы на основе ниобия (ВН2А: 4,1% Мо; 0,7 Zr; ≤ 0,08 С; Nb – остальное); на основе тантала (Та + 10% W); на основе молибдена (ВМЗ: 1,1% Ti; 0,5 Zr; 0,4 С; 1,4 Nb; Мо – остальное) и на основе вольфрама (W + 27% Re; W + 15% Мо).

Из неметаллических жаропрочных материалов находят применение гогорит ( $\geq 1000$  °С), SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> и системы Si–Al–O–N, которые способны работать до 1500 °С (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) – 1800 °С (SiC). К недостаткам высокотемпературной керамики относятся хрупкость и технологическая сложность получения беспористого материала. Более технологичным является графит, который относительно легко прессуется при высокой температуре, хорошо обрабатывается резанием.

## Вопросы для самоконтроля

### *Специальные стали. Жаростойкие стали*

1. Что такое жаростойкость?
2. Каким образом можно повысить жаростойкость сталей?
3. Укажите примерное содержание Cr в стали для обеспечения жаростойкости при 850 и 1100 °С.
4. Назовите наиболее распространенные марки жаростойких сталей для работы при температурах 800, 1000 °С.

### *Жаропрочные стали*

5. Дайте определение жаропрочности.
6. Назовите характеристики жаропрочности.
7. Почему металл при нагревании при температурах выше  $T_{\text{рекр}}$  течет под постоянной нагрузкой?
8. Укажите пути повышения жаропрочности сталей.
9. По каким признакам классифицируют жаропрочные стали?
10. Выберите сталь для работы при температурах 350...550 °С.

Назначьте режим термообработки стали.

11. Выберите стали для работы при температурах 600...700 °С:

а) для длительного срока службы ( $>10^4$  ч);

б) для кратковременной службы ( $\leq 600$  ч).

Назначьте режим термообработки и охарактеризуйте структуру после каждого этапа термообработки.

12. Чем отличаются дисперсионно-твердеющие стали от гомогенных?

13. Выберите сплав для работы при температурах 700...900 °С для нагревателей электрических печей сопротивления. Расшифруйте состав, назовите структуру и роль основных элементов, входящих в сплав.

14. Выберите сплав для работы при температурах 700...900 °С (для лопаток газовых турбин). Охарактеризуйте роль компонентов, входящих в сплав.

15. Какие процессы, происходящие в сплаве типа нимоник, обеспечивают высокие жаропрочные свойства?

16. Назовите важнейшие тугоплавкие элементы и сплавы на их основе, применяемые для горячих (1300...2000 °С) деталей ракетных двигателей.

#### *Коррозионно-стойкие стали и сплавы (нержавеющие)*

По причине коррозионных разрушений выходит из строя около 33% металлоконструкций. Поэтому защита от коррозии и создание коррозионно-стойких сталей и сплавов является актуальной задачей.

Отмечают два вида коррозии: электрохимическую и газовую.

Электрохимическая коррозия предполагает возникновение гальванической пары, поэтому этот вид коррозии развивается в жидких средах – электролитах: влажной атмосфере и почве; морской и речной воде; водных растворах солей, щелочей и кислот.

Для сравнительной оценки электрохимической стойкости металлов используют стандартный электродный потенциал ( $V^\circ$ , В):

Ион ...	$Al^{3+}$	$Zn^{2+}$	$Fe^{2+}$	$Sn^{2+}$	$H^+$	$Cu^+$	$Ag^+$	$Pt^{2+}$	$An^+$ ;
$V^\circ$ , В...	-1,63	-0,76	-0,44	-0,14	0	+0,52	+0,8	+1,19	+1,68.

Чем отрицательнее электродный материал, тем меньше устойчивость металла против электрохимической коррозии. Так, олово более коррозионно-стойко, чем железо.

Однако это правило не всегда выполняется. Большое значение имеют свойства продуктов коррозии. Примером может служить алюминий. На его поверхности в окислительных средах образуется очень плотная инертная пленка окисла  $Al_2O_3$ , которая непроницаема для элек-

тролитической среды. Поэтому, несмотря на отрицательный электродный потенциал, алюминий не корродирует во многих окислительных средах. Однако в щелочной среде окисная пленка активно растворяется и алюминий быстро разрушается.

*Химическая коррозия* развивается в сухих газах и жидких диэлектрических средах. Чаще всего это кислородсодержащие газы: сухой воздух, углекислый газ, сухой водяной пар, чистый кислород.

При химической коррозии поверхность металла окисляется, чем выше температура, тем активнее идет процесс химической коррозии. Устойчивость против газовой коррозии (жаростойкость) определяется главным образом сродством металла к кислороду и плотностью окисной пленки. Наибольшей плотностью обладают окислы таких металлов, как Cr, Al, Si, поэтому они хорошо защищают металл от газовой коррозии. (см. «жаростойкость»).

#### *Нержавеющие стали*

Если железо (или низкоуглеродистую сталь) легировать хромом в количестве  $>12,5\%$ , то железо, а также сталь становятся пассивными; коррозионный ток и скорость коррозии резко снижаются. Другими словами, сталь, содержащая  $>12,5\%$  Cr, становится нержавеющей. Хромистые стали устойчивы при температуре  $\leq 30$  °C во влажной атмосфере воздуха, водопроводной и речной воде, в азотной и многих органических кислотах; в морской воде эти стали имеют невысокую коррозионную стойкость, а многие из них подвержены коррозионному растрескиванию.

С увеличением содержания хрома свыше 17% коррозионная стойкость стали возрастает, но сталь приобретает ферритную однофазную структуру и теряет возможности ее упрочнения термической обработкой.

кой. Стали, содержащие 13% Cr, при нагреве и охлаждении претерпевают превращение аустенит  $\leftrightarrow$  феррит ( $\gamma \leftrightarrow \alpha$ ) и могут поэтому подвергаться термообработке. Прочность (твердость) после закалки и отпуска тем выше, чем больше углерода содержит сталь. Наиболее распространенными хромистыми сталями являются стали 12X13 (феррито-мартенситный класс), 20X13, 30X13, 40X13 (мартенситный класс).

Стали 12X13, 20X13 – наиболее пластичные, они могут подвергаться холодной обработке давлением, хорошо свариваются.

Стали 30X13 и 40X13 менее пластичны, могут подвергаться только горячей обработке давлением. При сварке этих деталей возникают трещины в зоне сварного шва.

Стали 12X13, 20X13 используют в изделиях, изготавливаемых штамповкой и сваркой: лопатки гидротурбин, емкости, аппаратура, бытовая техника. Термообработка этих сталей заключается в закалке с 1000...1050 °C в масле (структура феррит + мартенсит) с последующим отпуском при 700 °C (структура феррит + карбиды хрома).

Сталь 30X13 применяется для деталей машин и приборов (шестерни, валы, пружины), которые работают в агрессивной среде при больших циклических нагрузках. Термообработка стали 30X13: закалка в масле от 1050 °C на мартенсит (~55 HRC) + высокий отпуск ~700...750 °C на структуру сорбит (~30 HRC).

Сталь 40X13 по структуре и свойствам соответствует инструментальным сталям. Применяется она чаще всего для хирургического и бытового режущего инструмента, для шарикоподшипников, работающих в агрессивных средах. Сталь 40X13 закаливается с 1050 °C в масле на структуру мартенсит (~60 HRC) с последующим отпуском при 200 °C (отпущенный мартенсит).

Введение в 18%-ную хромистую сталь определенного количества (9...10%) никеля переводит ее в аустенитное состояние. Хромоникелевая аустенитная сталь имеет лучшие механические и технологические свойства, обладает более высокой коррозионной стойкостью и не теряет вязкости при температурах глубокого холода. В состоянии после медленного охлаждения от 1000...1100 °С сталь имеет многофазную структуру А + Ф + К; такая структура не обеспечивает высокой коррозионной стойкости и пластичности.

Эти свойства значительно улучшаются, если сталь быстро охладить (в воде) из однофазной аустенитной области (~1050...1100 °С). Быстрое охлаждение фиксирует аустенитное состояние при комнатной температуре. В однофазном состоянии практически весь хром находится в растворе (аустените) и обеспечивает стали максимальную коррозионную стойкость в окислительных средах. В аустенитном состоянии хромоникелевые нержавеющие стали обладают высокой пластичностью, хотя имеют сравнительно невысокие прочностные характеристики ( $\sigma_B = 500...600$  МПа,  $\delta = 35...45\%$ ), что позволяет подвергать их холодной пластичной деформации; эти стали хорошо свариваются.

Хромоникелевые стали, содержащие  $>0,08\%$  С, подвержены межкристаллитной коррозии (МКК). Склонность к МКК проявляется только после нагрева выше 500 °С. Это явление связано с тем, что при нагреве выше 500 °С из аустенита в приграничной зоне выделяются карбиды хрома ( $Cr_{23}C_6$ ) и эта зона обедняется хромом настолько, что теряет коррозионную стойкость (в растворе остается  $<12,5\%$  Cr). Сталь в таком состоянии в агрессивной среде будет корродировать по границам аустенитных зерен.

Пластичность и прочность в результате межкристаллитной резки снизятся, и при небольшом усилии сталь легко разрушается и может быть превращена в порошок.

Существует несколько способов предотвращения МКК:

а) уменьшить содержание углерода до значений  $<0,05\%$ ;

б) легировать сталь титаном ( $\sim 1\% \text{ Ti}$ ); титан активнее хрома связывается с углеродом, и карбиды хрома не образуются;

в) если карбиды хрома выделились, то сталь можно нагреть до  $1000 \dots 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ . Карбиды хрома растворяются в аустените. Последующее быстрое охлаждение (в воде) зафиксирует однофазное (аустенитное) состояние, и склонность к МКК будет подавлено.

Из сталей рассматриваемого класса наиболее широкое применение находят стали 04X18H10; 08X18H10; 10X17H13M3T. Они используются для изготовления емкостей, трубопроводов, химической аппаратуры, в самолетостроении, машино-, приборо- и судостроении и т.д.

В качестве кислотостойких применяются аустенитные стали, дополнительно легированные молибденом и медью с повышенным содержанием никеля (06X23H28M3Д3T). Эти стали обладают коррозионной стойкостью в таких средах, как фосфорная кислота, в том числе и горячая, разбавленная соляная кислота (до  $5\%$ ) при комнатной температуре, серная кислота при комнатной температуре и т.д.

Более высокой кислотостойкостью обладают сплавы на никелевой основе, например так называемый хастеллой типа  $80\% \text{ Ni} + 20\% \text{ Mo}$  с дополнительным легированием кобальтом и другими элементами.

Наивысшей коррозионной стойкостью в кислотах обладают такие тугоплавкие металлы, как молибден, ниобий, тантал.

## Вопросы для самоконтроля

### *Нержавеющие стали*

1. Какие виды коррозии встречаются? Кратко охарактеризуйте их.
2. Чем определяется устойчивость металла против коррозии?
3. Назовите легирующие элементы, повышающие коррозионную стойкость сталей.
4. Назовите наиболее распространенные хромистые нержавеющие стали и среды, в которых эти стали являются коррозионностойкими.
5. Укажите свойства (технологические) этих сталей и область их применения.
6. Назовите режим термообработки стали типа 20X13; 30X13 и 40X13; охарактеризуйте структуру и свойства сталей после каждого этапа термообработки.
7. Как перевести хромистую нержавеющую сталь в аустенитный класс?
8. Охарактеризуйте структуру и свойства нержавеющих сталей аустенитного класса.
9. Что такое межкристаллитная коррозия (МКК) аустенитных нержавеющих сталей. Укажите причины, ее вызывающие.
10. Назовите способы предотвращения межкристаллитной коррозии.
11. Выберите любую марку аустенитной нержавеющей стали, укажите роль легирующих элементов.
12. Назначьте режим термообработки и укажите структуру, механические и технологические свойства и область применения.
13. Назовите по одной марке кислотостойких сталей и сплавов. Укажите роль легирующих элементов.

### *Титан и сплавы на его основе*

Титан имеет невысокую плотность (4,5 г/см<sup>3</sup>) и высокую температуру плавления; имеет две аллотропических модификации:

$\alpha$ -низкотемпературную с гексагональной решеткой (ниже 882 °С);

$\beta$ -высокотемпературную (выше 882 °С) с кубической объемно-центрированной решеткой.

Свойства титана существенно зависят от чистоты. Например, титан 99,99 имеет твердость ~100 НВ, а титан чистоты 99,4...225 НВ.

Технический титан имеет сравнительно невысокую прочность ( $\sigma_B \approx 60$  кгс/мм<sup>2</sup>). В промышленности находят применение более прочные легированные алюминием (ВТ-5; ~5% Al), алюминием и молибденом (ВТ-8; ~6% Al + 3% Mo + Ti остальное) сплавы.

Например, прочность сплава ВТ-8 может достигать значений  $\sigma_B \approx 110$  кгс/мм<sup>2</sup> после соответствующей термообработки.

Титановые сплавы в интервале температур 300...600 °С показывают самую высокую удельную прочность ( $\sigma_B/\gamma$ ), что имеет важное значение в авиации, ракетной технике, где титановые сплавы нашли широкое применение.

Коррозионная стойкость титана и его сплавов выше, чем у аустенитных нержавеющей сталей.

### *Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами*

В приборах нередко требуются сплавы с коэффициентом линейного расширения, равным коэффициенту линейного расширения стекла, или с коэффициентом, равным нулю, или с очень большим коэффициентом и т.д. Эти сплавы, а также магнитные и электротехнические называют *прецизионными сплавами*. В качестве материалов с заданным коэффициентом термического расширения в основном применяются

железоникелевые сплавы, у которых коэффициент термического расширения  $\alpha$  изменяется в зависимости от концентрации по сложному закону. Так, сплав с 25% Ni имеет  $\alpha$  почти в 2 раза больше ( $\alpha = 20 \cdot 10^{-6}$ ), чем у железа ( $11,6 \cdot 10^{-6}$ ), а сплав с 36% Ni имеет в 8 раз меньший коэффициент линейного расширения ( $\alpha \approx 1,5 \cdot 10^{-6}$ ).

Сплав, содержащий 36% Ni, называется инваром (марка 36Н); его можно считать практически не расширяющимся в интервале температур от  $-80$  до  $+100$  °С.

Сплав с 42% Ni, имеет постоянный коэффициент термического расширения ( $\alpha = 7,5 \cdot 10^{-6}$ ) в интервале температур от  $20$  до  $200$  °С.

Существуют сплавы, у которых коэффициент  $\alpha$  равен коэффициенту линейного расширения различных материалов, например стеклу, платине.

#### *Сплавы с постоянным модулем упругости*

Для ряда деталей прецизионных приборов (пружины, камертоны и т.д.) требуется металл с не изменяющимися с температурой модулями упругости ( $E$ ,  $G$ ). В этом случае применяют сплавы элинвары (неизменная упругость), которые содержат примерно 36% Ni; 8% Cr, Fe – остальное. В качестве примера можно привести сплав Н35ХМВ, содержащий  $\sim 1,2\%$  С,  $\sim 9\%$  Cr,  $\sim 35\%$  Ni, 3% Wо, 2% Мо, Fe – остальное. Температурный коэффициент модуля нормальной упругости этого сплава настолько незначителен, что обеспечивает температурную погрешность часов  $\sim 0,5$  с в сутки на  $1$  °С.

#### *Магнитные стали и сплавы*

К магнитным (или ферромагнитным) относятся такие материалы, которые способны сгущать магнитные силовые линии. Из всех металлов только железо, кобальт, никель и редкоземельный гадолиний обладают

ферромагнетизмом. Магнитные свойства характеризуются остаточной индукцией  $B_r$  (измеряется в гауссах, Гс, или в тесла, Тл) и коэрцитивной силой  $H_c$  (измеряется в эрстедах, Э, или кА/м).

Остаточная магнитная индукция – это индукция, которая остается в металле после снятия намагничивающего внешнего поля. Коэрцитивная сила – это напряженность магнитного поля, которая необходима для размагничивания металла.

Магнитные сплавы подразделяются на две группы:

- 1) магнитно-мягкие;
- 2) магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие сплавы легко намагничиваются и размагничиваются в слабых магнитных полях.

Магнитно-твердые сплавы намагничиваются до насыщения и размагничиваются только в сильных магнитных полях.

Магнитно-твердые сплавы используются для изготовления постоянных магнитов. Они должны иметь высокие значения остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы.

В качестве постоянных магнитов в настоящее время применяются стали типа У10 – У12, стали легированные хромом (ЕХ3: ~1% С, ~3% Cr, Fe – остальное), хромом и кобальтом (ЕХ9К15М: ~1% С, ~9% Cr, ~15% Со, ~1% Мо, Fe – остальное).

Кобальтовые стали имеют наиболее высокие магнитные свойства из магнитных сталей ( $H_c \approx 200$  Э,  $B_r \approx 0,80...0,85$  Тл). Однако эти стали имеют в настоящее время ограниченное применение из-за дефицитности кобальта; кроме того, более высокие магнитные свойства можно получить в менее дефицитных сплавах системы Fe–Ni–Al, содержащих 11...14% Al; 22...34% Ni, железо – остальное. Наилучшие магниты системы Fe–Ni–Al (Ални 2, Ални 3) имеют коэрцитивную силу

400...500 Э при остаточной индукции 0,6...0,7 Тл (6000...7000 Гс). Добавка кобальта (15...24%) к этим сплавам увеличивают магнитные характеристики до значений  $H_c \approx 500...650$  Э,  $B_r \approx 0,75...1,2$  Тл. Недостатками Fe–Ni–Al и Fe–Ni–Al–Co-сплавов являются сложность термомагнитной обработки и плохие технологические свойства (хрупкость, высокая твердость).

В последнее время начинают применять более пластичные, хорошо обрабатываемые резанием сплавы типа викаллой: 52% Co, 14% V, Fe – остальное. Викаллой указанного состава показывает остаточную индукцию около 1,0 Тл (10 000 Гс) при коэрцитивной силе ~400 Э.

Самые высокие магнитные свойства в настоящее время получены в сплавах на основе редкоземельных металлов ( $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ;  $\text{SmCo}_5$ ):  $H_{cb} \approx 800$  кА/м и  $B_r \approx 1,0$  Тл.

#### *Магнитно-мягкие сплавы*

Магнитно-мягкие материалы должны иметь, возможно, меньшее значение коэрцитивной силы и высокую магнитную проницаемость в слабых, средних и сильных магнитных полях, а также низкие потери на перемагничивание.

Высокая коэрцитивная сила в магнитно-твердых сплавах достигается неравновесной, высокодисперсной структурой, которая затрудняет движение границ доменов при перемагничивании.

Для получения минимальных значений коэрцитивной силы в магнитно-мягких материалах необходимо получить структуру, которая не препятствовала бы движению доменных границ. Поэтому в магнитно-мягких материалах желательно иметь максимально равновесную однофазную структуру с минимальным количеством точечных и линейных дефектов. Таким требованиям удовлетворяют чистые металлы ферромагнетики (Fe, Co, Ni) и сплавы на их основе с максимально

крупным зерном. Однако чистые металлы имеют существенный недостаток: из-за малого электросопротивления у них при перемагничивании возникало больше потери на токи Фуко.

Для уменьшения этих потерь железо легируют кремнием (~3%). Кремнистое железо называют электротехнической сталью. Хотя в кремнистом твердом растворе-феррите коэрцитивная сила немного больше, чем у чистого железа, но отсутствие превращения  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  позволяет вырастить очень крупное зерно при термообработке и заметно понизить величину  $H_c$ .

Электротехнические стали маркируют следующим образом. Первая цифра определяет структуру и вид прокатки: 1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой кристаллической решетки. Вторая цифра указывает на содержание кремния в стали: 0 – до 0,4%; 1 – 0,4...0,8%; 2 – 0,8...1,8%; 3 – 1,8...2,8%; 4 – 2,8...3,8%; 5 – 3,8...4,8%. Третья цифра определяет потери на гистерезис и тепловые потери. Четвертая цифра – код числового значения нормируемого параметра. Чем цифра больше, тем меньше удельные потери при перемагничивании,  $P_{1,5/50}$ . Так, для листовой стали 1212 удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте тока 50 Гц ( $P_{1,5/50}$ ) составляют 7,2 Вт/кг, а для стали – 1514 –  $P_{1,5/50} \leq 2,7$  Вт/кг.

Наилучшими магнитно-мягкими материалами с наименьшей коэрцитивной силой и наибольшей магнитной проницаемостью являются железоникелевые сплавы (пермаллой). Сплавы Fe + Ni, содержащие около 78,5% Ni, обладают исключительно высокой магнитной проницаемостью, приблизительно в 10 раз больше, чем у чистого железа. Это качество пермаллов очень важно для приборов, работающих в слабых магнитных полях (радио, телефон и пр.). Наибольшее применение нахо-

дят пермаллои 50Н и 79НМ, где «50Н» и «79Н» указывают на содержание никеля в процентах; буква М указывает на присутствие молибдена.

Пермаллой типа 50Н (45...50% Ni) без сложной термообработки превосходят по свойствам высококачественные высоконикелевые сплавы (79НМ), но уступают им, если 79НМ подвергнуть специальной термомагнитной обработке.

### *Электротехнические стали и сплавы*

Эти материалы можно разделить на проводники и сплавы с высоким электросопротивлением.

Первые применяют для передачи электроэнергии на расстоянии, а вторые – для преобразования электроэнергии в тепло.

В качестве проводников используют чистые металлы: медь, алюминий, железо, реже – серебро, золото, платину. Сплавы с высоким электросопротивлением делятся на две группы: реостатные (для изготовления реостатов) и сплавы для нагревательных элементов различных приборов и электрических печей. Для элементов высокого электросопротивления чаще всего используются сплавы – твердые растворы с высокой концентрацией компонентов.

Для реостатов применяют сплавы на основе меди: никелин, константан, манганин, которые являются сплавами меди с никелем, цинком и марганцем.

В качестве реостатных сплавов в основном используется манганин (МНМц3-12: 2,5...3,0% Ni; 11,6...13,5% Mg, Cu – остальное).

Высоконикелевые сплавы (константан) чаще всего применяются для изготовления термопар (МНМц-40-1,5: 39...41% Ni; 1...2% Mn, Cu – остальное), так как константан дает в паре с медью большое значение

ТЭДС (термо-ЭДС). Рабочая температура константана не должна превышать 500 °С, а манганина – 200 °С.

Для нагревательных элементов электрических печей, работающих ниже 1200 °С используются сплавы Fe + Cr + Al (X23Ю5-хромаль) и Ni + Cr (X20М80 – нихром). Нихромы более пластичны, чем хромали, но последние более дешевые и это является их преимуществом.

При температурах выше 1200 °С (в вакуумных печах) используют тугоплавкие металлы (W, Mo, Ta) и сплавы на их основе. В обычной атмосфере применяют также керамические материалы, например, силикатные стержни, которые спекают из карбида кремния. Распространены также нагреватели из дисилицида молибдена.

### **Вопросы для самоконтроля**

#### *Титан и его сплавы*

1. Охарактеризуйте основные физические, механические и технологические свойства титана.
2. Сравните коррозионную стойкость титана существующих нержавеющей сталей.
3. Назовите 2–3 сплава на основе титана и охарактеризуйте их прочностные свойства.

#### *Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами*

4. Какие сплавы называют прецезионными?
5. Назовите сплавы с заданным коэффициентом термического (линейного) расширения  $\alpha$ .
6. Назовите сплав, не расширяющийся в интервале температур от –800 до +1000 °С.

7. Назовите сплав, имеющий постоянный коэффициент термического расширения в интервале температур от 200 до 2000 °С.
8. Назовите сплавы с постоянными модулями упругости ( $E$ ,  $G$ ).
9. Магнитные стали и сплавы.
10. Назовите характеристики магнитных свойств.
11. На какие группы делятся магнитные сплавы?
12. Чем отличаются (по структуре и свойствам) магнитно-мягкие от магнитно-твердых сплавов?
13. Назовите несколько марок (3–4) магнитно-твердых материалов. Охарактеризуйте их структуру и основные магнитные свойства ( $H_c$ ,  $B_r$ ).
14. Назовите несколько марок (3–4) магнитно-мягких сплавов и охарактеризуйте их свойства ( $H_c$ ,  $B_r$ ).
15. Приведите несколько ( $\geq 2$ ) марок немагнитных сталей.
16. Приведите несколько (3–4) марок реостатных сплавов для нагревателей электропечей.

## 8.9. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

### *Алюминий*

Алюминий относится к легким металлам. Его плотность  $\gamma = 2,7$  г/см<sup>3</sup> (у магния  $\gamma = 1,7$  г/см<sup>3</sup>, у бериллия  $\gamma = 1,8$  г/см<sup>3</sup>); температура плавления 660 °С; алюминий кристаллизуется в гранцентрированную кубическую решетку, имеет высокие электро- и теплопроводность.

Механические свойства чистого алюминия невысокие:  $\sigma_B = 6$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2} = 2$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $HB = 25$  кгс/мм<sup>2</sup>,  $\psi = 85\%$ ,  $\delta = 40\%$ . Алюминий имеет высокую коррозионную стойкость в обычной влажной среде и в некоторых окислительных и органических средах,

что объясняется образованием на поверхности плотной окисной пленки  $Al_2O_3$ , которая защищает металл от коррозии.

Чистый алюминий чаще всего применяется для электротехнических целей как проводниковый металл. Применять алюминий в чистом виде как конструкционный материал из-за низкой прочности нецелесообразно. По этой причине для деталей машин и приборов используются сплавы алюминия с медью, магнием, кремнием, марганцем и другими элементами.

#### *Сплавы на основе алюминия*

Все сплавы алюминия можно разделить на три группы: деформируемые неупрочняемые термообработкой, деформируемые упрочняемые термообработкой и литейные сплавы. Такая классификация сделана на основе диаграммы состояния алюминий–легирующий элемент, рис. 51.

Первая группа сплавов имеет однофазную структуру и обладает наивысшей пластичностью. При нагреве и охлаждении в них не происходит никаких превращений, поэтому термообработкой в них невозможно изменить структуру и свойства, кроме как рекристаллизационным отжигом снять наклеп, вызванный холодной пластической деформацией.

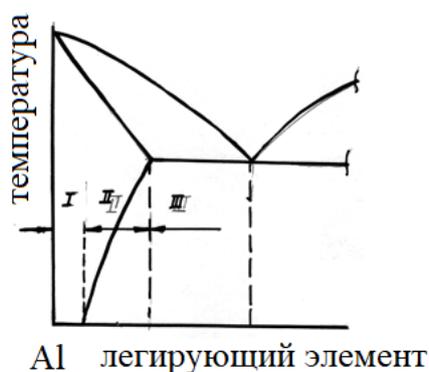


Рис. 51. Диаграмма состояния алюминий–легирующий элемент

Во второй группе сплавов при охлаждении из-за переменной растворимости легирующих элементов в алюминии происходит выделение второй фазы, которая представляет собой интерметаллиды – различные химические соединения с алюминием ( $\text{Al}_6\text{Mn}$ ,  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  и др.), которые заметно упрочняют сплавы.

*Деформируемые сплавы, не упрочняемые термообработкой*

Эти сплавы обладают высокой пластичностью, коррозионной стойкостью и имеют сравнительно невысокую прочность; применяют их для изделий, получаемых глубокой штамповкой.

Наибольшее распространение нашли сплавы систем  $\text{Al} + \text{Mn}$  (типа АМц) и  $\text{Al} + \text{Mg}$  (типа АМг), например АМц (~1,0...2,6 Мн; Al – остальное), АМг3 (3,2...3,8 Мг; 0,3...0,6 Мн; Al – остальное). Сплавы типа АМц и АМг могут изготавливаться в отожженном (мягком) состоянии (в марке добавляется буква М), в полунагартованном (П) и нагартованном (Н) состояниях, т.е. после разной степени наклепа. Прочность в наклепанном состоянии выше, чем в отожженном.

*Деформируемые сплавы, упрочняемые термообработкой*

Наиболее распространенным сплавом этого типа является дюралюминий. Основными легирующими элементами являются медь (~4% Cu) и магний (~0,5% Mg). Избыточными (вторичными) фазами в дюралюминии являются  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , которые после закалки от ~500 °С и отпуска при 120...140 °С (старения) могут выделиться в очень дисперсном виде. Дисперсионное твердение (старение) повышает прочность, по сравнению с отожженным или закаленным состояниями, примерно в 2 раза.

Чаще других применяются сплавы Д1 (3,8...4,8% Cu; 0,4...0,8% Mn; 0,4...0,8% Mg; Al – остальные) и Д16 (3,8...4,5% Cu; 0,3...0,9% Mn; 1,2...1,8% Mg; Al – остальное).

Режим термической обработки этих сплавов заключается в закалке с 495...506 °С для Д1 и с 490...500 °С – для Д16 в воде с последующим естественным старением при 20 °С в течение 4 суток. После такой термообработки получают свойства (для Д1):

$$\sigma_b = 45 \text{ кгс/мм}^2; \sigma_{0,2} = 30 \text{ кгс/мм}^2; \delta = 15...17\%.$$

Для поковок и штамповок (например, лопасти винта) применяют сплавы, по составу близкие к дюралюминию (АК6, АК8).

#### *Литейные алюминиевые сплавы*

Из литейных находят применение эвтектические сплавы алюминия с кремнием, так называемые силумины. Они используются в авиа- и автостроении. Очень редко применяются эвтектические системы Al + Mg, Al + Cu и др. из-за неудовлетворительных механических свойств.

Обычный силумин содержит 12...13% Si и по структуре является заэвтектическим: структура его представляет собой грубоигольчатую эвтектику (Al + Si) с включениями первичного кремния. После модифицирования перед заливкой специальной смесью (обычно  $2/3\text{NaF} + 1/3\text{NaCl}$ ) сплав становится доэвтектическим с мелкозернистой эвтектикой и небольшим количеством первичных кристаллов алюминия. После модифицирования предел прочности классического силумина (10...13% Si) возрастает с  $\sigma_b = 14 \text{ кгс/мм}^2$  до  $\sigma_b = 18 \text{ кгс/мм}^2$ . Силумины дополнительно легируют небольшими количествами Mg, Mn, Cu. В результате чего они приобретают способность упрочняться термообработкой как дюралюминий.

Из алюминиевых литейных сплавов наиболее широкое применение находят АЛ2 (10...13% Si; Al – остальные), АЛ3 (0,2...0,8% Mg; 4...6% Si; 0,2...0,8% Mn; 1,5...3,5% Cu; 1,0...1,5% Fe; Al – остальные) и АЛ8 (9,2...11,5% Mg; Al – остальные).

### *Магний и магниевые сплавы*

Магний из промышленных металлов обладает наименьшей плотностью ( $1,7 \text{ г/см}^3$ ), что обусловило применение магния и его сплавов в авиации наряду с алюминиевыми сплавами. Однако, в отличие от алюминия, магний неустойчив против коррозии. В качестве упрочняющих легирующих добавок используются алюминий, цинк, марганец, имеющие переменную растворимость. Это позволяет применять для этих сплавов термическую обработку, заключающуюся в закалке и старении. Необходимо отметить, что термообработка магниевых сплавов дает меньший эффект по сравнению с алюминиевыми сплавами.

Как и алюминиевые, сплавы магния делятся на деформируемые (МА) и литейные (МЛ).

К типичным деформируемым сплавам относятся МА1 (1,3... 2,5 Мп; Mg – остальное); МА1 применяются в отожженном состоянии,  $\sigma_{\text{в}} = 32 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $\delta = 14\%$ . Из литейных сплавов можно выделить МЛ5 (7,5...9,6% Al; 0,2...0,8 Zn; 0,15..0,50% Mn; Mg – остальное), который после закалки и старения имеет  $\sigma_{\text{в}} = 26 \text{ кгс/мм}^2$  и  $\delta = 2,3\%$ .

### *Медь и ее сплавы*

Чистая медь обладает рядом ценных технических качеств: хорошей пластичностью, высокими электро- и теплопроводностью, малой окисляемостью. Высокая электропроводность меди (второе место после серебра) обуславливает ее преимущественное применение как проводникового материала. В качестве конструкционного материала чистая медь практически не используется. Применение находят сплавы на основе меди: латуни и бронзы.

## Латуни

Латунями называют сплавы меди с цинком (Cu–Zn). С помощью диаграммы состояния Cu–Zn можно описать структуру и свойства этих сплавов, рис. 52 (изображена часть диаграммы, важная для практики).

Из диаграммы видно, что сплавы, содержащие до 39% Zn, являются однофазными и представляют собой  $\alpha$ -твердый раствор цинка в меди. В сплавах, содержащих от 39 до 55% Zn, – двухфазная структура. В них наряду с  $\alpha$ -фазой существуют кристаллы  $\beta$ -твердого раствора на основе химического соединения CuZn.

Если однофазные  $\alpha$ -латуни имеют высокую пластичность, то  $\alpha + \beta$ -латуни обладают более высокой прочностью, но значительно меньшей пластичностью. Структура латуней определяет физические и технологические свойства и область их применения. Однофазные латуни легко куются и штампуются в холодном состоянии. Из них изготавливают катаный полуфабрикат: сортовые профили, листы, ленты, трубы и т.д.

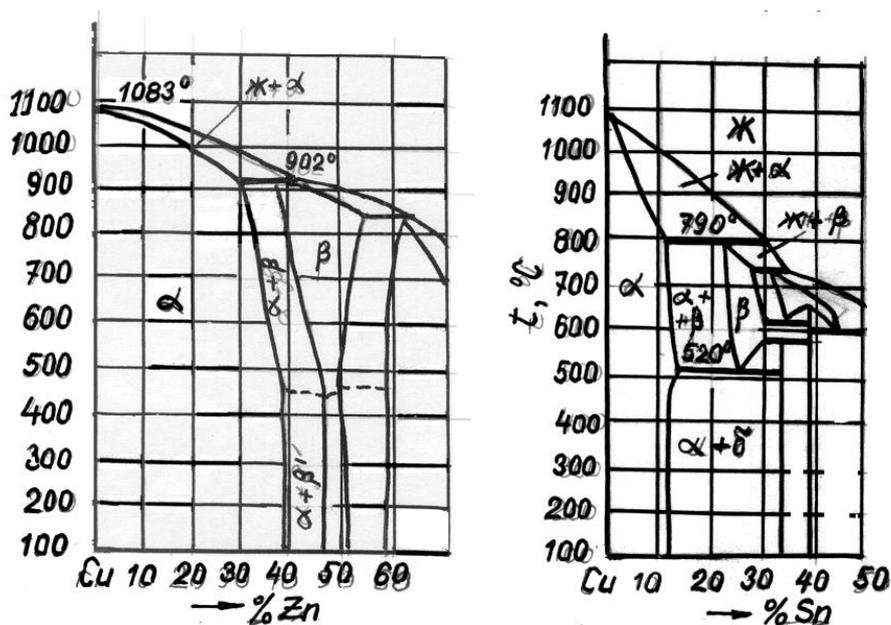


Рис. 52. Диаграммы состояния Cu–Zn и Cu–Sn

Обработка давлением двухфазных латуней возможно только в горячем состоянии ( $>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), когда металл обладает повышенной пластичностью. Двухфазная латунь изготавливается, главным образом в виде прутков, из которых обработкой резанием получают различные детали машин и приборов. Латунь с  $\alpha + \beta$ -структурой имеют хорошие антифрикционные свойства, поэтому их используют в сопряженных движущихся деталях (плунжерные пары, подшипники скольжения и др.). Для улучшения свойств латуни дополнительно легируют свинцом (для улучшения обрабатываемости резанием), оловом – для повышения коррозионной стойкости (морская латунь), алюминием, никелем и др. – для улучшения механических свойств.

Маркируются латуни буквой Л, за которой следует цифра, указывающая процентное содержание меди (Л62, Л58 и др.). Однофазные латуни содержат не менее 61% Cu;  $\alpha + \beta$ -латуни обычно содержат 55...60% Cu (Л58); Морская латунь – Л070-1 (70% Cu; 1% Sn; Zn – остальное).

### *Бронзы*

Наибольшее распространение находят оловянистые бронзы (сплавы меди с оловом). Диаграмма состояния Cu–Sn как и Cu–Zn, состоит из нескольких перетектических элементов, рис. 52.

В равновесном состоянии (после длительного отжига) до 14% Sn сохраняется однофазная структура –  $\alpha$ -структура. В отличие от латуней, в оловянистых бронзах наблюдаются твердофазные реакции. В промышленных бронзах при  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  протекает эвтектидная реакция  $\beta \rightarrow (\alpha + \delta)$  и при комнатных температурах наряду с пластичной  $\alpha$ -фазой всегда присутствуют кристаллы химического соединения  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  ( $\delta$ -фаза). Наличие твердых включений  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  в мягкой матрице ( $\alpha$ ) обеспечивают бронзе низкий коэффициент трения и высокую стойкость против истирания. Поэтому бронза является одним из лучших анти-

фрикционных материалов, что обусловило ее широкое применение как подшипникового сплава.

Благодаря высокой коррозионной стойкости и хорошим литейным свойствам (малая усадка) бронзы используют для сложных отливок паровой и водяной арматуры.

Следует отметить, что при обычных скоростях охлаждения отливок эвтектоид появляется уже при содержании олова 5...6%.

Для удешевления бронзы часть олова заменяют цинком, а для улучшения обрабатываемости резанием в бронзу вводят до 3...5% Pb.

Бронзы маркируют начальными буквами Бр и буквами, обозначающими легирующий элемент, после чего следуют цифры, показывающие количество этих элементов в процентах. Например бронза БрОЦС-6-6-3 расшифровывается: «Бр»-бронза; «ОЦС»-олово, цинк, свинец; 6-6-3-соответственно количество этих элементов в процентах.

Большое применение находят бронзы, не содержащие олова. Они значительно дешевле оловянистых, имеют более высокие механические свойства, но уступают им по литейным свойствам (имеют большую усадку).

Из безоловянистых можно назвать алюминиевую бронзу (БрА7) и кремнистую бронзу (БрКЦ4-4).

Интересными свойствами обладает бериллиевая бронза, содержащая около 2% Ве (БрБ2). После закалки такой бронзы от 800 °С в воде фиксируется перенасыщенный твердый раствор бериллия в меди.

Искусственное старение при 300...350 °С вызывает дисперсионное твердение из-за выделения мельчайших частиц  $\gamma$ -фазы (химические соединения CuBe).

В результате твердость возрастает с 100 до 400 НВ, а предел прочности возрастает с 50 кгс/мм<sup>2</sup> до 120 кгс/мм<sup>2</sup>.

Высокая прочность и упругость при высокой коррозионной стойкости, хорошей свариваемости и обрабатываемости резанием делают

бронзу хорошим материалом для ответственных пружин, мембран, пружинящих контактов, а также для безыскрового инструмента при взрывоопасных горных работах.

## Вопросы для самоконтроля

### *Цветные металлы и сплавы*

#### *Сплавы на основе алюминия*

1. Охарактеризуйте физические и механические свойства алюминия.
2. На какие группы делятся алюминиевые сплавы?
3. Назовите несколько марок деформируемых не упрочняемых термообработкой алюминиевых сплавов; расшифруйте состав, укажите структуру, свойства и область применения.
4. Назовите несколько марок (две-три) деформируемых упрочняемых термообработкой алюминиевых сплавов; расшифруйте состав, назначьте режим термообработки, укажите структуру после каждого этапа термообработки и свойства ( $\sigma_B$ ), рекомендуйте область применения.
5. Назовите несколько марок (две-три) литейных сплавов, расшифруйте состав, укажите структуру и область применения.

#### *Магний и магниевые сплавы*

6. Охарактеризуйте физические и механические свойства магния и укажите область применения магниевых сплавов.
7. Назовите по одной марке деформируемых и литейных сплавов магния; расшифруйте состав и укажите примерно свойства ( $\sigma_B$ ).

#### *Сплавы на основе меди*

#### *Латуни*

8. Назовите любую марку однофазной латуни. До какого процентного содержания цинка латуни являются однофазными? Укажите свойства и область применения однофазной латуни.

9. Назовите любую марку двухфазной латуни. Укажите свойства и область применения двухфазной латуни.

### *Бронзы*

10. Какие бронзы (по составу) находят наибольшее распространение?

11. Назовите структуру бронзы в равновесном (после длительного отжига) и неравновесном (после охлаждения на воздухе) состояниях.

12. Назовите наиболее распространенную марку бронзы, расшифруйте состав, назначение легирующих элементов и укажите структуру, свойства и область применения.

13. Укажите любую марку бериллиевой бронзы, расшифруйте состав и укажите структуру, свойства после термообработки и область применения.

### *Сплавы для подшипников скольжения*

К материалам подшипников скольжения предъявляются высокие требования. Основные из них следующие:

- возможно меньший и стабильный коэффициент трения;
- хорошая теплопроводность;
- высокая коррозионная стойкость;
- отсутствие способности схватываться с сопряженным металлом;
- хорошая прирабатываемость;
- высокие прочность и сопротивление усталостному разрушению и др.

Согласно «принципу Шарпи» структура подшипникового сплава должна представлять собой мягкую матрицу с равномерно распределенными включениями твердой фазы. При такой структуре после непродолжительной приработки на поверхности подшипника образуется микрорельеф. Вал будет опираться на выступающие включения под-

шипника. Между поверхностью вала и матрицей подшипника образуется пространство, в котором удерживается смазка.

В современном машиностроении для вкладышей подшипников применяются чугуны, бронзы, баббиты. Самым дешевым материалом является серый перлитный чугун (марки АЧЦ-1, АЧЦ-2). Он выдерживает высокие удельные давления, но из-за недостаточной теплопроводности и более высокого коэффициента трения может применяться лишь при небольших скоростях скольжения.

Бронзовые подшипниковые вкладыши изготавливаются из оловянистых и свинцовых бронз. Эти бронзы обладают достаточно высокой прочностью, хорошей теплопроводностью и коррозионной стойкостью, имеют более низкий коэффициент трения, чем у чугунов. Все это позволяет применять бронзу для подшипников, работающих в тяжелых условиях (высокие удельные давления и скорости скольжения).

Наряду с чугунными и бронзовыми вкладышами в машиностроении широко применяют подшипники из легкоплавких сплавов на основе олова, свинца, а также цинка и алюминия. Их называют баббитами.

Из оловянистых баббитов лучшим является сплав Б89 (7,25...8,25 Sb; 2,5...3,5 Cu; Sn – остальное), в котором твердыми включениями являются SnSb, Cu<sub>3</sub>Sn, а мягкой основой – твердый раствор на основе олова.

Свинцовые баббиты имеют более высокую температуру плавления (400...460 °С), по сравнению с оловянистыми (342...380 °С). Самым дешевым является баббит Б6 (5...6% Sn; 14...16% Sb; 2,5...3,5% Cu; Pb – основа).

В последние годы находят применение подшипниковые сплавы на основе алюминия, в которых мягкой основой является твердый раствор на основе алюминия, а твердыми включениями – различные химические соединения. В качестве примера укажем состав алюминиевого подшипникового сплава АСМ6-5 (5...6% Sb; 4...5% Pb; 0,5...0,7% Mg; Al – основа).

Реже применяются сравнительно дешевые сплавы на основе цинка ЦАМ10-5 (10% Al; 5% Cu; Zn – остальное) и ЦАМ5-10 (5% Al; 10% Cu; Zn – основа); они уступают по свойствам оловянистым баббитам и примерно равноценны свинцовым баббитам.

### *Припои*

Припои делят на две группы:

а) мягкие припои с низкой температурой плавления, прочность которых невелика и не превышает  $\sigma_B = 5 \dots 7$  кгс/мм<sup>2</sup>;

б) твердые припои имеют сравнительно высокую температуру плавления, поэтому пайка ими затруднительна, но полученный спай по прочности не уступает основному металлу.

Наиболее легкоплавкими являются припои на основе сплавов системы Pb–Sn:

– ПОС-61 (61% Sn, Pb – остальное) с температурой плавления 183...185 °С;

– ПОС-40 и ПОС-30 содержат 40 и 30% Sn соответственно с температурами кристаллизации (плавления) 183...235 и 183...256 °С.

Для лужения пищевой посуды применяется чистое олово О1 и О2.

Кроме оловяно-свинцовых, находят применение оловяно-цинковые, наилучшим из которых является ПОЦ-90 (90% Sn, 10% Zn), отвечающей эвтектике с температурой плавления 198 °С. Припои ПОЦ более прочные, но менее пластичные, чем оловяно-свинцовые.

Твердые припои имеют температуру плавления 800...900 °С и являются сплавами Cu + Zn (латуни) и Cu + Zn + Ag, так называемые серебряные припои, например ПСр-45 (29,5...30,5% Cu; 24...26,5% Zn; Ag – остальное) с температурой плавления 660...725 °С.

### *Легкоплавкие сплавы*

К таким сплавам относятся обычно многокомпонентные сплавы эвтектического и близкого к эвтектическому составу с температурой

плавления ниже 230 °С. Из широко известных сплавов можно отметить сплав Вуда Л68 (12,5% Sn; 25% Pb; 12,5% Cd и 50% Bi), имеющий температуру плавления 68 °С.

### **Вопросы для самоконтроля**

#### *Сплавы для подшипников скольжения*

1. Перечислите требования, предъявляемые к подшипникам скольжения (эксплуатационные).
2. Назовите требования, предъявляемые к структуре (правило Шарпи).
3. Назовите по одной марке подшипниковых сплавов на разной основе; расшифруйте их состав, укажите структуру и свойства.

#### *Припой и легкоплавкие сплавы*

4. На какие группы делятся припои?
5. Назовите марки наиболее распространенных легкоплавких припоев и укажите их состав и примерную температуру кристаллизации.
6. Назовите марки наиболее распространенных твердых припоев, укажите их состав и температуру плавления.
7. Какие сплавы называются легкоплавкими?
8. Назовите самый легкоплавкий промышленный сплав ( $t_{пл} \approx 68$  °С), расшифруйте состав, укажите структуру и область применения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пособии рассмотрены вопросы строения реальных кристаллов, типы сплавов, дано понятие фаз и микроструктур сплавов, диаграммы состояния сплавов. Подробно описаны сплавы железа с углеродом и сплавы на основе цветных металлов, легированные стали. Приведено описание термообработки деталей и превращения в структуре сталей при изменении температуры.

Изложены теория и практика, касающиеся специальных сталей. Рассмотрены общие закономерности влияния легирующих элементов на превращения и свойства сталей. Приведены различные группы сталей, применяемые для различного назначения.

В пособии подробно показано, что характеристики готовых изделий зависят от технологии повышения их механических и эксплуатационных свойств, а также от качества самого сплава, его чистоты и однородности.

Приведены вопросы для самоконтроля по всем разделам пособия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анисович, А. Г.** Практика металлографического исследования материалов / А. Г. Анисович, И. Н. Румянцева. – Минск : Беларус. наука, 2013. – 221 с.
2. **Сироткин, О. С.** Основы современного материаловедения : учебник / О. С. Сироткин. – М. : ИНФРА-М, 2015. – 362 с.
3. **Методология** выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении. Т. 1. Стали и чугуны [Электронный ресурс] : учебное пособие / М. А. Филиппов и др. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2013. – 231 с. – URL : <http://www.iprbookshop.ru/66548.html> – ЭБС «IPRbooks»
4. **Королев, А. П.** Материаловедение в машиностроении [Электронный ресурс, мультимедиа] : учебное пособие / А. П. Королев, Д. М. Мордасов, М. В. Макаrchук. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – URL : <https://www.tstu.ru/book/elib3/mm/2019/korolev/>
5. **Королев, А. П.** Теория и технология термической и химико-термической обработки металлов и сплавов (web-формат) [Электронный ресурс, мультимедиа] : учебное пособие / А. П. Королев, Д. М. Мордасов, М. В. Макаrchук. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – URL : [http://www.tstu.ru/book/elib3/mm/2016/korolev\\_makarchuk/](http://www.tstu.ru/book/elib3/mm/2016/korolev_makarchuk/)
6. **Металловедение.** Т. 2. Термическая обработка. Сплавы [Электронный ресурс] : учебник / И. И. Новиков и др. – М. : Издательский Дом МИСиС, 2014. – 526 с. – URL : <http://www.iprbookshop.ru/56564>. – ЭБС «IPRbooks»
7. **Елагина, О. Ю.** Технологические методы повышения износостойкости деталей машин [Электронный ресурс] : учебное пособие / О. Ю. Елагина. – М. : Логос, Университетская книга, 2009. – 488 с. – URL : <http://www.iprbookshop.ru/9101.html>
8. **Берлин, Е. В.** Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей [Электронный ресурс] / Е. В. Берлин, Н. Н. Коваль, Л. А. Сейдман. – М. : Техносфера, 2012. – 464 с. – URL : <http://www.iprbookshop.ru/26900.html>
9. **Наумов, С. В.** Материаловедение. Защита от коррозии [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / С. В. Наумов, А. Я. Самуилов. – Казань : Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2012. – 84 с. – URL : <http://www.iprbookshop.ru/60479.html>
10. Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия [Электронный ресурс]. – URL : <http://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7350>

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ .....	4
1.1. Реальное строение металлов .....	5
1.2. Типы сплавов .....	8
1.3. Кристаллизация металлов и сплавов .....	11
1.4. Диаграммы состояния (равновесия) двойных сплавов .....	13
1.4.1. Основные равновесные диаграммы состояния двойных сплавов .....	13
1.5. Связь свойств сплавов с типом диаграммы состояния (закономерности Курнакова) .....	20
2. ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....	24
2.1. Механизм пластической деформации .....	25
3. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ .....	31
4. КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ .....	39
5. ЧУГУНЫ .....	43
6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ .....	49
6.1. Термическая обработка сталей .....	50
6.1.1. Четыре основные превращения в стали .....	50
6.2. Практика термообработки стали .....	56
7. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....	64
8. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ .....	70
8.1. Влияние легирования на структуру и свойства железа .....	70
8.2. Отношение легирующих элементов к углероду .....	71
8.3. Влияние легирования на термообработку сталей .....	71
8.4. Влияние легирования на диаграмму состояния Fe–C .....	72
8.5. Классификация и маркировка легированных сталей .....	73
8.6. Маркировка легированных сталей .....	76
8.7. Конструкционные стали .....	77
8.8. Инструментальные стали .....	90
8.9. Цветные металлы и сплавы .....	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	139

Учебное электронное издание

КОРОЛЕВ Андрей Павлович  
МОРДАСОВ Денис Михайлович

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова  
Графический и мультимедийный дизайнер Н. И. Кужильная  
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбаровой

ISBN 978-5-8265-2802-0



Подписано к использованию 29.08.2024.  
Тираж 50 шт. Заказ № 94

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14  
Тел./факс (4752) 63-81-08.  
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru