

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО КУРСУ МКЭС

ДЛЯ БАКАЛАВРОВ

ЛЕКТОР - к.т.н., доц. КОВАЛЕВА ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА

Введение

- Развитие элементной базы РЭА происходит благодаря развитию электроники.
- Материалы, применяемые в электронной технике, подразделяются на радиоматериалы (РМ) и конструкционные материалы (КРМ).
- Радиоматериалы – материалы, свойства которых зависят от электрических и магнитных полей.
- КРМ обеспечивают прочность изделий, создаваемых из этих материалов.
- В программе курса предусмотрено изучение свойств материалов:
 - - КР - металлов, сплавов, композитов
 - - РМ - магнитных, диэлектриков, полупроводников

СТАНДАРТНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ В МИРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СБОРКЕ

- Изучения свойств радиоматериалов проводится для всей имеющейся номенклатуры компонентов, используемых в стандартных сборочно-монтажным технологических процессах :
 - поверхностно-монтируемых (**SMC**);
 - - выводных (или компонентов «в отверстия») (**IMC**) ;
 - - нестандартных компонентов.
- **Обозначения типов монтажа**
- Технология монтажа в отверстия (Through Hole Technology, **ТНТ**), также называемая иногда штырьковым монтажом
- Технология поверхностного монтажа **ТПМ** (Surface mounted technology **SMD**) или **ТМП** - (технология монтажа на поверхность)

Компоненты

- Радиокомпоненты или электрокомпоненты (ЭК), используемые в технологии монтажа в отверстия, по типу корпуса можно разбить на следующие основные группы (примеры корпусов приведены на рис.1):
 - - а) ЭК с осевыми (часто встречается обозначение axial, аксиальными) выводами;
 - - б) ЭК с радиальными выводами (radial);
 - - в) SIL, SIP (Single In-Line Package) – многовыводной корпус с однорядным расположением выводов;
 - - г) DIP (Dual In-Line Package) – корпус с двухрядным расположением выводов;
 - - д) разъемы, слоты;

Компоненты

- - е) панели для ИС, в том числе DIP; ZIF (Zero Insertion Force, панели с нулевым усилием вставки для штырьковых ИС); PGA (Pin Grid Array, панели для штырьковых ИС с матрицей выводов);
- -ж) различные компоненты сложной формы.
- Такое разделение компонентов прежде всего связано с особенностями технологии их монтажа.
- Так например, осевые и радиальные выводы компонентов требуют формовки и обрезки, тогда как большинство других компонентов в этом не нуждаются.
- Примеры компонентов представлены на рис. 1

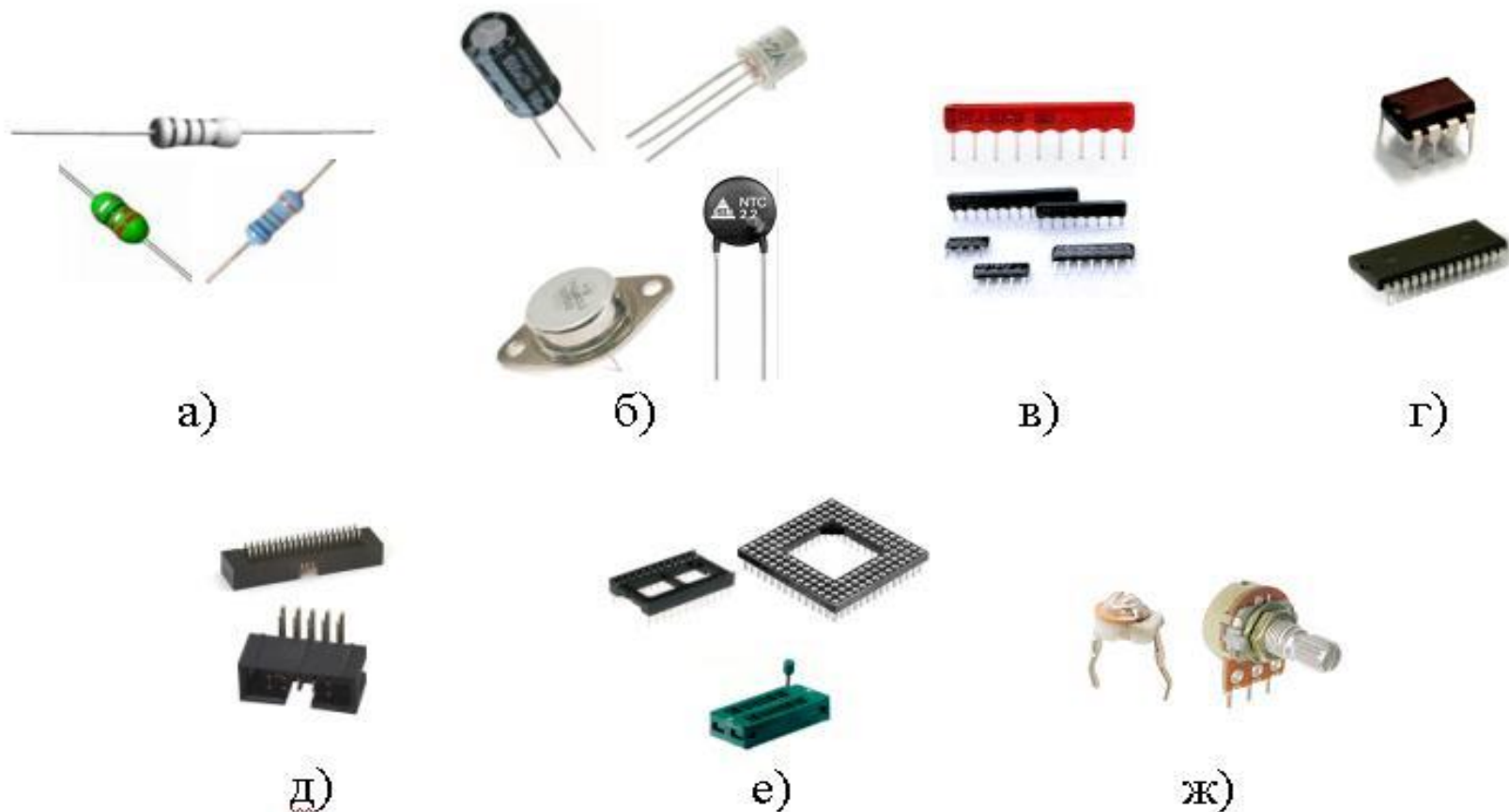


Рис.1 Примеры ТНТ-компонентов: а) с осевыми выводами; б) с радиальными выводами; в) в корпусах SMT; г) в корпусах DIP; д) разъемы; е) панели для ИС; ж) ЭК сложной формы (нестандартные)

1. Л.1 Общие сведения о строении вещества

- Межатомная связь возникает благодаря тому, что атомы в веществе расположены близко друг к другу (рис .2.)

Виды химической связи.

- ионная связь (гетерополярная),
- металлическая связь,
- ковалентная связь (гомеополярная),
- молекулярную связь

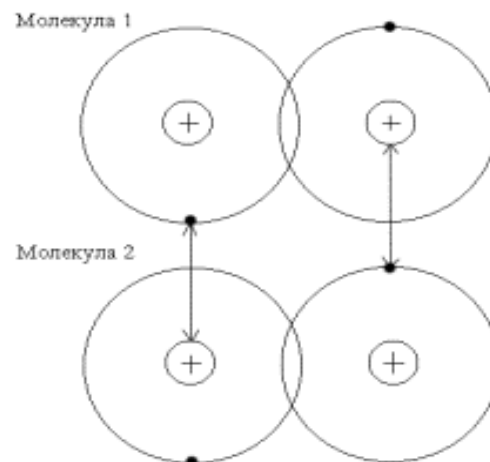


Рис. 4

Рис.2

- Материалы, полученные из веществ с разными связями, сильно различаются по своим электрическим и другим свойствам.

2. Л.1 **Общие сведения о строении вещества**

- **При ионной связи** валентные электроны перемещаются от одних атомов к другим. Как следствие в структуре возникают ионы и электростатическое притяжение разноименно заряженных ионов. (например хлористый натрий)).
- **Ионные связи** обусловлены кулоновским притяжением противоположно заряженных ионов.
- Такие связи наиболее характерны для неорганических диэлектриков, имеющих в своем составе ионы противоположных знаков, например $\text{Na}^+ \text{---} \text{Cl}^-$, $\text{L} = \text{F}^-$.
При металлической связи кристаллическая решетка, построенная из положительных ионов (атомных остовов), находится в среде свободных коллективизированных электронов.
- **Металлические связи** — это связи положительно заряженных ионов металла, образуемые оторвавшимися от атомов коллективизированными валентными электронами.

3. Л.1 **Общие сведения о строении вещества**

- «Электронный газ» оказывает цементирующее действие на кристаллическую структуру металлов и приводит к их высокой теплопроводности и электропроводности.
- Коллективизированные электроны в металлах «стягивают» главным образом электростатическими силами положительные ионы, уравновешивая отталкивание между ионами.
- При уменьшении расстояния между атомами в решётке растёт электронная плотность и, силы ,стягивающие ионы, а также силы отталкивания между ионами.
- При определённых расстояниях (периоде решётки) эти силы уравновешиваются и возникает устойчивая металлическая решётка кристалла.
- Ненаправленный характер связи обуславливает высокую пластичность металлов.

4. Л.1 Общие сведения о строении вещества

- В случае **ковалентной связи** внешние, так называемые валентные, электроны становятся общими для ближайших соседних атомов (как у двухатомной модели водорода).
- **Атомные (ковалентные) связи** возникают между атомами путем образования общих пар валентных электронов — по одному от каждого атома.
- Такая пара электронов устойчива в результате обменного взаимодействия при противоположной ориентации спиновых и соответствующих орбитальных магнитных моментов электронов.

5.л.1 Общие сведения о строении вещества

- В отличие от ионной **атомная связь** имеет направленный характер — она образуется в том направлении, в котором расположена наибольшая плотность объединенных электронов.
- Поэтому вещества с атомными связями обычно твердые и хрупкие.
- К ним относятся кристаллы германия, кремния, алмаза, соединения элементов из средних групп таблицы Д. И. Менделеева — SiC, BN.

6. Л.1 Элементы зонной теории твердого тела

- Самая верхняя из заполненных электронами зон – **валентная зона**. Ближайшая к ней незаполненная электронами зона – **зона проводимости**.
- Эти зоны отделены друг от друга **запрещенной зоной**, в которой электроны находиться не могут (рисунок).
- **Проводники (а,б)** – запрещенная зона практически отсутствует. Валентная зона вплотную прилегает к зоне проводимости или даже перекрывается ею, вследствие чего электроны в металле свободны.
- Удельное электрическое сопротивление проводников $r_v < 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

7Л.1 Элементы зонной теории твердого тела

- Отличительное свойство – сильно выраженная электропроводность.
- **Полупроводники (в)** – Ширина запрещенной зоны < 3 эВ.
- Удельное электрическое сопротивление проводников $10^{-5} \text{ Ом*м} < r_v < 10^8 \text{ Ом*м}$.
- Отличительное свойство – сильная зависимость удельной проводимости от концентрации и вида примесей и дефектов в материале, а также от внешних воздействий (температуры, света, электрических и магнитных полей...).

8.Л.1 Элементы зонной теории твердого тела

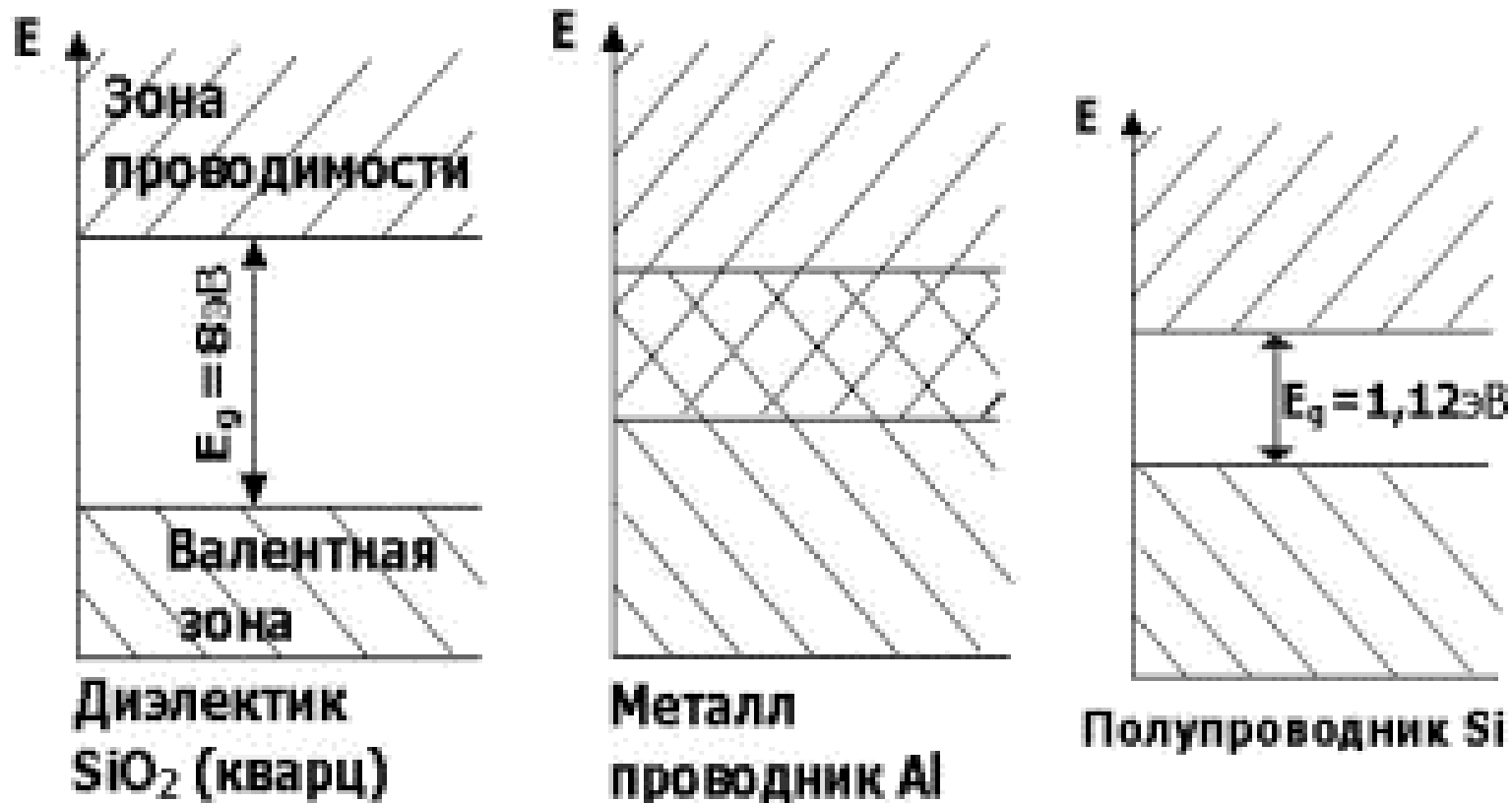


Рис 27

9. Л.1 Строение и свойства материалов

- Кристаллические тела имеют фиксированную температуру плавления и затвердевания, характеризуются упорядоченным расположением в пространстве элементарных частиц (имеют ближний и дальний порядок).
- Аморфные тела имеют только ближний порядок в расположении элементарных частиц, при нагреве размягчаются в большом температурном интервале, становятся вязкими
- Существует семь кристаллических систем элементов (семь сингоний): триклинная, моноклинная, ромбическая, ромбоэдрическая, гексагональная, тетрагональная, кубическая.
- Системы отличаются размерами ребер (параметров решетки) и углами между ребрами.

8.Л.1

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РЕШЕТКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА	ПРОСТРАНСТВЕННАЯ РЕШЕТКА		СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ОСЕВЫМИ УГЛАМИ И ОСЕВЫМИ ЕДИНИЦАМИ
1. ТРИКЛИННАЯ	I	ПРОСТАЯ	$a \neq b \neq c; \gamma \neq \beta \neq \alpha = 90^\circ$
2. МОНОКЛИННАЯ	II III	ПРОСТАЯ БАЗОЦЕНТРИРОВАННАЯ	$a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
3. РОМБОЭДРИЧЕСКАЯ (ОРТОДРОМИЧЕСКАЯ)	IV V VI VII	ПРОСТАЯ БАЗОЦЕНТРИРОВАННАЯ ОБЪЕМОЦЕНТРИРОВАННАЯ ГРАНЕЦЕНТРИРОВАННАЯ	$a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
4. ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ	VIII IX	ПРОСТАЯ РОМБОЭДРИЧЕСКАЯ	$a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ \gamma = 120^\circ$
5. ТЕТРАГОНАЛЬНАЯ	X XI	ПРОСТАЯ ОБЪЕМОЦЕНТРИРОВАННАЯ	$a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
6. КУБИЧЕСКАЯ	XII XIII XIV	ПРОСТАЯ ОБЪЕМОЦЕНТРИРОВАННАЯ ГРАНЕЦЕНТРИРОВАННАЯ	$a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

9. Л.1 **Строение и структура твёрдых тел.**

- Многие свойства твердых тел объясняются той периодичностью, с которой размещены в пространстве их структурные элементы, т.е. в кристаллической решетке.
- В периодической кристаллической решетке можно выделить некоторую элементарную ячейку, которая повторяется периодически по всему кристаллу
- Выделяя такую ячейку, удастся описать положения атомов и ионов в веществе, с ее помощью характеризовать структуру кристаллов.
- Положения занимаемые атомами или ионами называют точками (узлами) решетки.

10. Л.1 Особенности атомно-кристаллического строения металлов

- **Металлы** – один из классов конструкционных материалов, характеризующийся определенным набором свойств:
 - «металлический блеск» (хорошая отражательная способность);
 - пластичность;
 - высокая теплопроводность;
 - высокая электропроводность.

Все металлы, затвердевающие в нормальных условиях, представляют собой кристаллические вещества, то есть укладка атомов в них характеризуется определенным порядком – периодичностью, как по различным направлениям, так и по различным плоскостям. Этот порядок определяется понятием **кристаллическая решетка**.

- **кристаллическая решетка** это воображаемая пространственная решетка, в узлах которой располагаются частицы, образующие твердое тело.

Иллюстрация

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Кристаллическое строение вещества

Природные кристаллы : кварца-горного хрусталя (а) и топаза (б).



(а) (б)

Схематическая модель расположения частиц в веществе

Кристалл жидкость газ



СЗТУ кафедра МТМИП лекцию составил Сивенков АВ 01.001.001

- рис.1

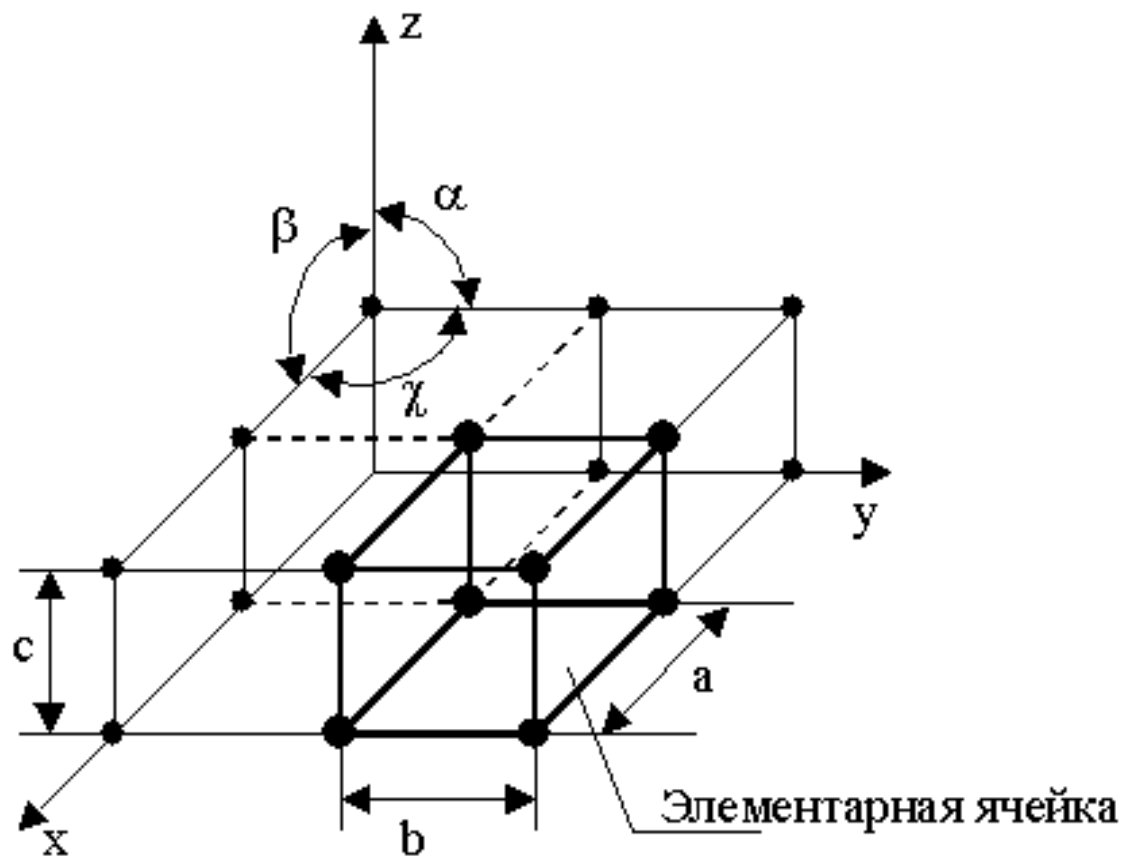
Элементарная ячейка

- *Элементарная ячейка* – элемент объема из минимального числа атомов, многократным переносом которого в пространстве можно построить весь кристалл.
- Элементарная ячейка характеризует особенности строения кристалла.
- Основными параметрами кристалла являются:
 - **размеры ребер** элементарной ячейки a , b , c , или периоды решетки – расстояния между центрами ближайших атомов. В одном направлении выдерживаются строго определенными.
 - **углы между осями** (α, β, γ).

Элементарная ячейка

- **Дополнительные параметры:**
 - **координационное число (K)** указывает на число атомов, расположенных на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома в решетке
 - **базис решетки**- количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки.
 - **плотность упаковки атомов в кристаллической решетке** - отношение объема, занятого атомами к объему ячейки (для объемно-центрированной кубической решетки – 0,68, для гранецентрированной кубической решетки – 0,74)


Схема кристаллической решетки



Кристаллическая решетка рис. 3 (иллюстрация)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

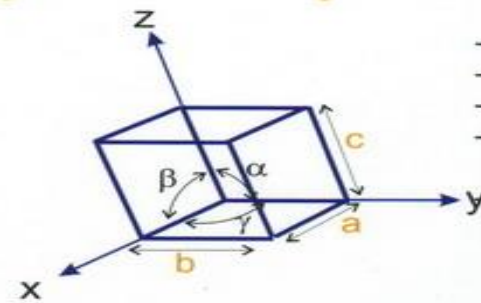
Пространственно-кристаллическая решетка



x, y, z - пространственные оси
 a, b, c - кратчайшие трансляции

элементарная кристаллическая ячейка

Основные характеристики кристаллической решетки



- углы между осями α, β, γ ;
- периоды решетки a, b, c ;
- число атомов, приходящееся на ячейку n ;
- координационное число Z , равное числу ближайших равноудаленных атомов ;
- коэффициент компактности K , равный доле объема ячейки, занятой атомами:

$$K = \frac{n \cdot 4/3 \pi R^3}{V_{\text{яч.}}}$$

СЗТУ кафедра МТМиП лекцию составил Сивенков АВ

01.001.003

Основные типы кристаллических решеток металлов

- а – объемно-центрированная кубическая;
- б – гранецентрированная кубическая;
- в – гексагональная плотноупакованная
- Всего 14 типов решеток Браве

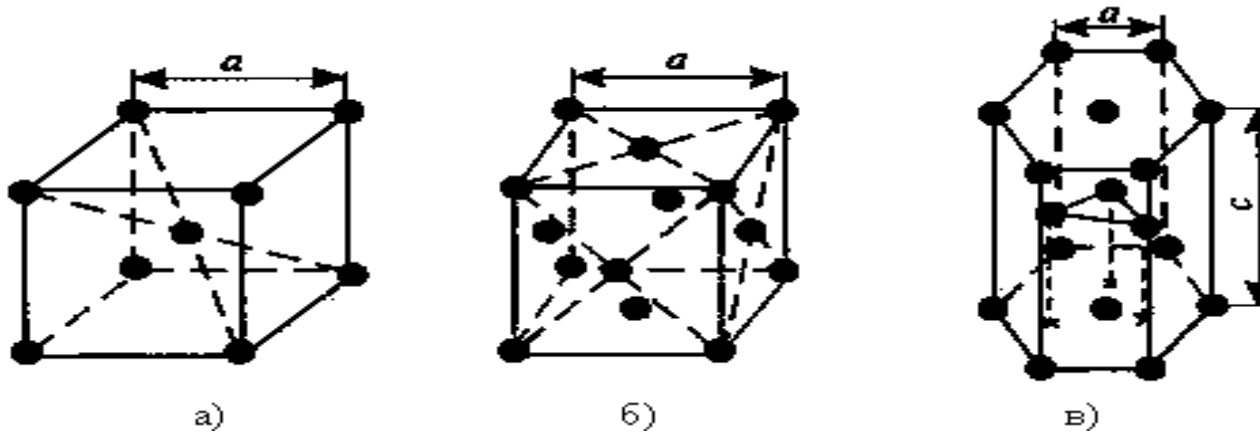


Рис. 4

Основные типы кристаллических решеток

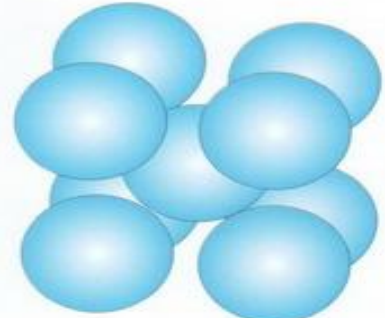
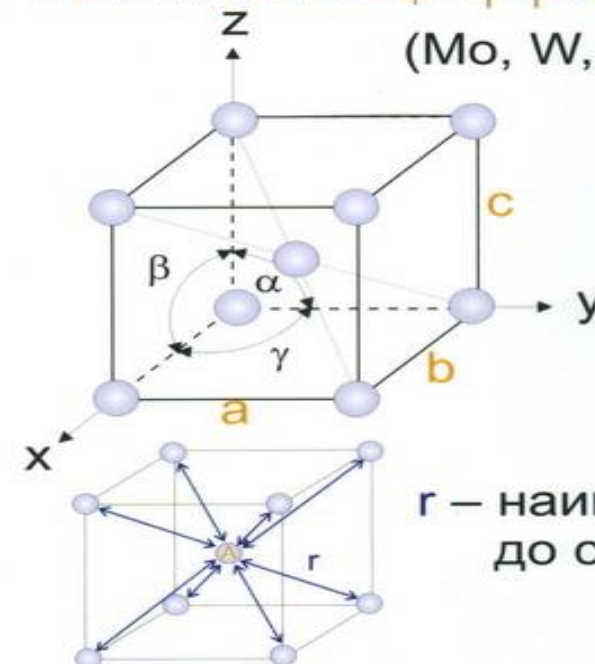
- Основными типами кристаллических решеток являются :
 1. **Объемноцентрированная кубическая (ОЦК)** (рис. 4а), атомы располагаются в вершинах куба и в его центре (V, W, Ti,)
 2. **Гранецентрированная кубическая (ГЦК)** (рис.4б), атомы располагаются в вершинах куба и по центру каждой из 6 граней (Ag, Au,)
 3. **Гексагональная**, в основании которой лежит шестиугольник:
 - простая** – атомы располагаются в вершинах ячейки и по центру 2 оснований (углерод в виде графита);
 - плотноупакованная (ГПУ)** (рис.4в) – имеется 3 дополнительных атома в средней плоскости (цинк).

Кристаллические типы решеток продолжение

- 1.тип ОЦК

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Решетка объемноцентрированная кубическая (ОЦК)
(Mo, W, V, Fe_α)



r – наименьшее расстояние до соседних атомов.

Характеристики решетки:

Углы между осями	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Период решетки	$a = b = c$
Число атомов на ячейку	$n = 2$
Координационное число	$Z = 8$
Коэффициент компактности	$K = 0,68$

СЗТУ кафедра МТМиП лекцию составил Сивенков АВ

01.001.009

Кристаллических типы решеток продолжение

- 2.тип ГЦК

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Решетка гранецентрированная кубическая (ГЦК)
Z (Al, Cu, Au, Ag, Fe_γ)



The diagram shows a 3D coordinate system with x, y, and z axes. A cube is drawn with its edges labeled a, b, and c. Atoms are represented by blue spheres. One is at the center of each of the six faces, and eight are at the corners. Angles α, β, and γ are indicated between the axes. To the right is a cluster of blue spheres representing a portion of the crystal lattice.

г – наименьшее расстояние до соседних атомов.



The diagram shows a central atom (yellow) surrounded by 12 nearest neighbor atoms (blue) in an FCC lattice. Blue arrows point from the central atom to each of the 12 neighbors, representing the coordination number.

Характеристики решетки:

Углы между осями	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Период решетки	$a = b = c$
Число атомов на ячейку	$n = 4$
Координационное число	$Z = 12$
Коэффициент компактности	$K = 0,74$

СЗТУ кафедра МТМиП лекцию составил Сивенков АВ

01.001.010

Кристаллические типы решеток продолжение

- 3 тип ГПУ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Решетка гексагональная плотноупакованная (ГП)
(Mg, Co_α, Zn, Ti_α, Cd)



Характеристики решетки:

Углы между осями	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Период решетки	$a = b \quad c/a = 1,633$
Число атомов на ячейку	$n = 6$
Координационное число	$Z = 12$
Коэффициент компактности	$K = 0,74$

СЗТУ кафедра МТМиП лекцию составил Сивенков АВ

01.001.011

Понятие об изотропии и анизотропии

- Свойства тела зависят от природы атомов, из которых оно состоит, и от силы взаимодействия между этими атомами.
- . В аморфных телах с хаотическим расположением атомов в пространстве ,расстояния между атомами в различных направлениях равны, свойства будут одинаковые- аморфные тела **изотропны**
- В кристаллических телах атомы правильно располагаются в пространстве, причем по разным направлениям расстояния между атомами неодинаковы, что предопределяет существенные различия в силах взаимодействия между ними и, разные свойства. Зависимость свойств от направления называется анизотропией
- Плоскость, проходящая через узлы кристаллической решетки, называется **кристаллографической плоскостью**.
- Прямая, проходящая через узлы кристаллической решетки, называется **кристаллографическим направлением**.
- Для обозначения кристаллографических плоскостей и направлений пользуются **индексами Миллера**.

Примеры обозначения кристаллографических плоскостей (а) и кристаллографических направлений (б)

- Для определения индексов кристаллографической плоскости необходимо:
 - установить координаты точек пересечения плоскости с осями координат в единицах периода решетки;
 - взять обратные значения этих величин;
 - привести их к наименьшему целому кратному, каждому из полученных чисел.
- Для определения индексов кристаллографического направления необходимо:
 - одну точку направления совместить с началом координат;
 - установить координаты любой другой точки, лежащей на прямой, в единицах периода решетки
 - привести отношение этих координат к отношению трех наименьших целых чисел.

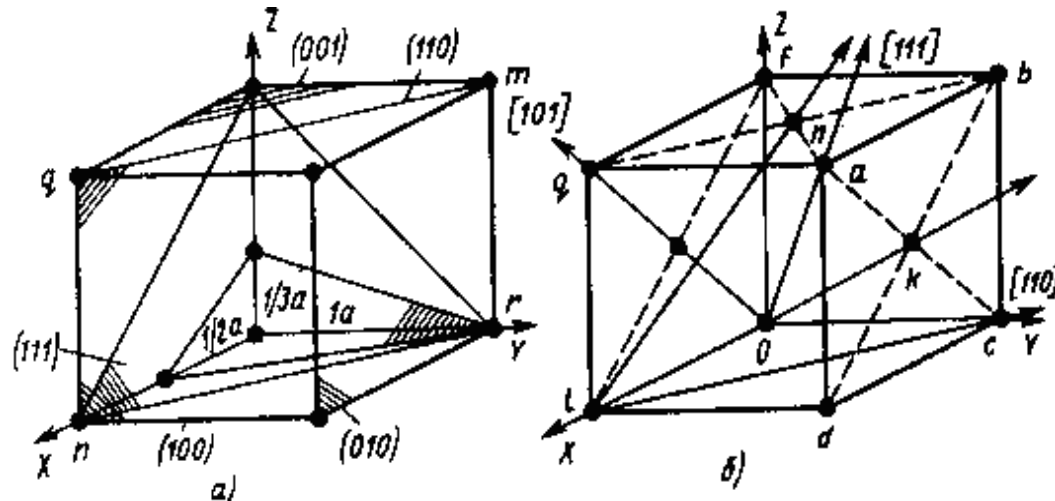


Рис.5.

Аллотропия или полиморфные превращения.

- Способность некоторых металлов существовать в различных кристаллических формах в зависимости от внешних условий (давление, температура) называется **аллотропией или полиморфизмом**.
- Каждый вид решетки представляет собой **аллотропическое** видоизменение или **модификацию**. Примером **аллотропического видоизменения** в зависимости от температуры является железо (**Fe**).
- **$Fe: t < 911^{\circ}C$ - ОЦК - $Fe\alpha$**
- **$911 < t < 1392^{\circ}C$ - ГЦК - $Fe\beta$**
- **$1392 < t < 1539^{\circ}C$ - ОЦК – $Fe\delta$ высокотемпературное**
- Примером **аллотропического** видоизменения, обусловленного изменением давления, является углерод: при низких давлениях образуется графит, а при высоких – алмаз.

Магнитные превращения

- Некоторые металлы намагничиваются под действием магнитного поля. После удаления магнитного поля они обладают остаточным магнетизмом. Это явление впервые обнаружено на железе и получило название ферромагнетизма. К ферромагнетикам относятся **железо, кобальт, никель** и некоторые другие металлы.
- При нагреве **ферромагнитные** свойства металла уменьшаются постепенно: вначале слабо, затем резко, и при определенной температуре (**точка Кюри**) исчезают (точка Кюри для железа –768 град.С). Выше этой температуры металлы становятся парамагнетиками. Магнитные превращения не связаны с изменением кристаллической решетки или микроструктуры, они обусловлены изменениями в характере межэлектронного взаимодействия.

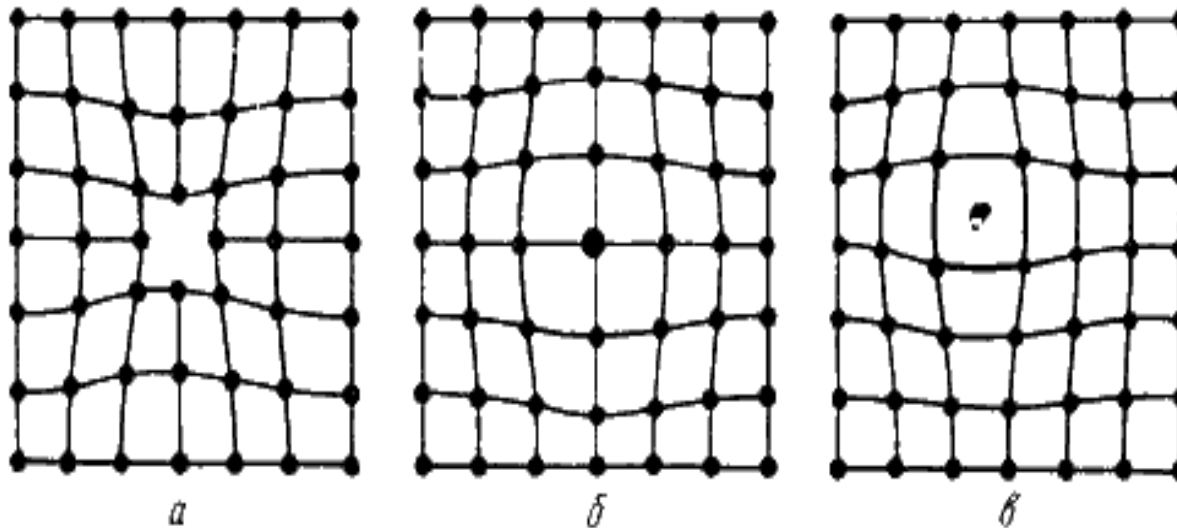
Л. 1 Строение реальных металлов. Дефекты кристаллического строения

- [Точеные дефекты](#)
- [Линейные дефекты:](#)
- [Простейшие виды дислокаций – краевые и винтовые.](#)

- В кристаллической решетке реальных металлов имеются различные дефекты (несовершенства), которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов. Различают следующие структурные несовершенства:
 - точечные – малые во всех трех измерениях;
 - линейные – малые в двух измерениях и сколь угодно протяженные в третьем;
 - поверхностные – малые в одном измерении

Точечные дефекты

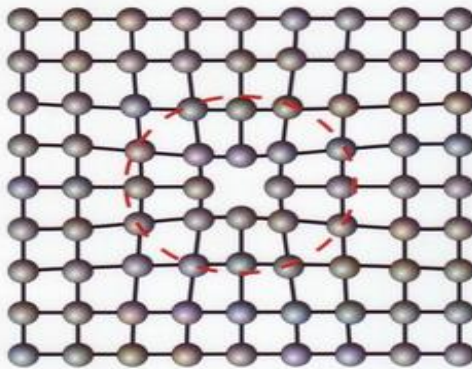
- Одним из распространенных несовершенств кристаллического строения является наличие точечных дефектов: вакансий, дислоцированных атомов и примесей. (рис. 6)
- a – вакансии, b – дислоцированные атомы, $в$ – атомы примесей



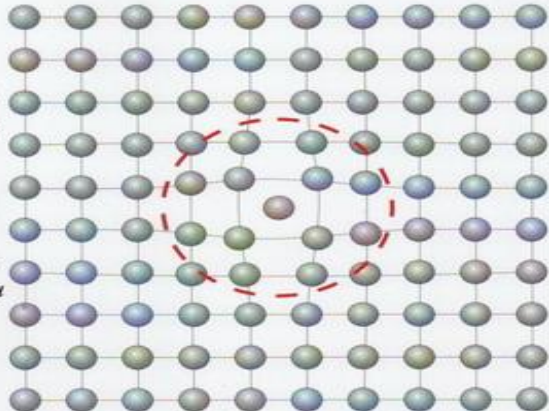
Точечные дефекты. иллюстрация

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Точечные дефекты



Вакансия - это узел кристаллической решетки незанятый атомом или ионом.



Межузельный атом - атом, расположенный в межатомной пространстве кристаллической решетки.

Образование вакансии или межузельного атома приводит к локальному искажению решетки кристалла.

СЗТУ кафедра МТМиП лекцию составил Сивенков АВ 01.001.013

Краевая дислокация

- Представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край “лишней“ полуплоскости (рис. 7)
- Экстраплоскость - неполная плоскость
- Дислокации образуются путем сдвигового механизма. Сдвигается нижняя часть (ABCD), рис.2.2. относительно верхней на один период решетки в направлении, перпендикулярном АВ, а затем вновь атомы сближаются на краях разреза внизу.
- Наибольшие искажения в расположении атомов в кристалле имеют место вблизи нижнего края экстраплоскости.
- Вправо и влево от края экстраплоскости эти искажения малы (несколько периодов решетки).
- Вдоль края экстраплоскости искажения простираются через весь кристалл и могут быть очень велики (тысячи периодов решетки) (рис. 2.3). Рис. 2.3. Искажения в кристаллической решетке при наличии краевой дислокации

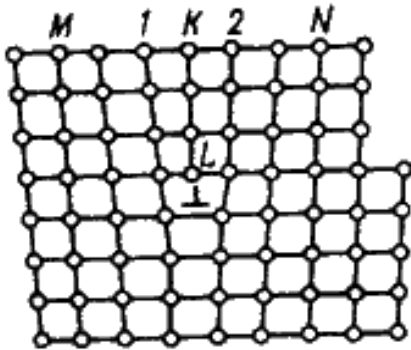


Рис.7 Искажения в кристаллической решетке при наличии краевой дислокации

Краевые дислокации иллюстрация



Винтовая дислокация

- Получена за счет частичного сдвига по плоскости Q вокруг линии EF (рис. 8)
- На поверхности кристалла образуется ступенька, проходящая от точки E до края кристалла.
- Такой частичный сдвиг нарушает параллельность атомных слоев. Кристалл превращается в одну атомную плоскость, закрученную по винту в виде полого геликоида вокруг линии EF .
- Линия EF представляет границу, отделяющую часть плоскости скольжения, где сдвиг уже произошел, от части, где сдвиг не начинался.
- Винтовая дислокация может перемещаться по любой плоскости, проходящей через линию дислокации.

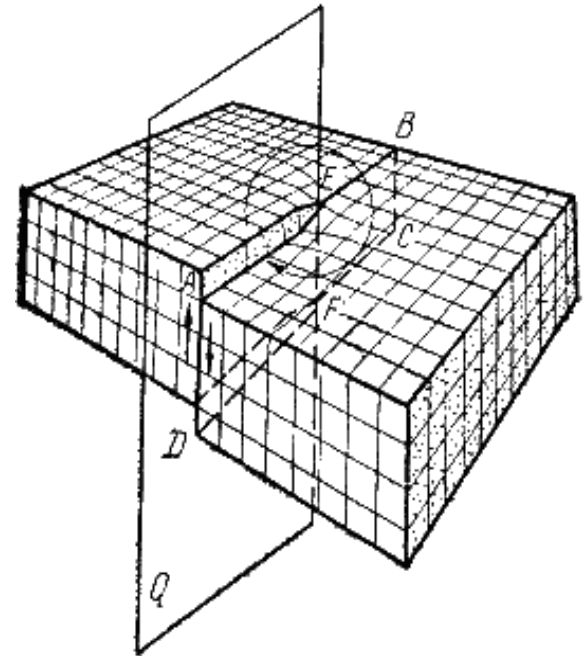


Рис. 8. Механизм образования винтовой дислокации

Винтовая дислокация иллюстрация



Описание дислокаций

- Линии дислокаций не могут обрываться внутри кристалла, они либо замкнутые и образуют петлю, либо разветвляются на несколько дислокаций, либо выходят на поверхность кристалла.
- Дислокационная структура материала характеризуется **плотностью дислокаций**.
- **Плотность дислокаций** в кристалле определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью 1 м², или как суммарная длина линий дислокаций в объеме 1 м³

$$\rho = \frac{\sum l}{V} \quad (\text{см}^{-2}; \text{м}^{-2})$$

- Плотность дислокаций изменяется в широких пределах и зависит от состояния материала.
- После тщательного отжига плотность дислокаций - 10⁵ - 10⁷ м⁻²,
- В кристаллах с сильно деформированной кристаллической решеткой плотность дислокаций достигает 10¹⁵...10¹⁶ м⁻².
- Плотность дислокации в значительной мере определяет пластичность и прочность материала.
- Минимальная прочность определяется критической плотностью дислокаций

Поверхностные дефекты

- Поверхностные дефекты— границы зерен, фрагментов и блоков (рис. 9).
- Размеры зерен составляют до 1000 мкм.
- Углы разориентации составляют до нескольких десятков градусов (θ).
- Граница между зернами представляет собой тонкую в 5 – 10 атомных диаметров поверхностную зону с максимальным нарушением порядка в расположении атомов.
- На границах зерен повышена концентрация примесей, которые понижают поверхностную энергию.
- Внутри зерна не идеальное строения кристаллической решетки. Имеются участки, разориентированные один относительно другого на несколько градусов (θ_1).
- Эти участки - *фрагменты*.
- каждый фрагмент состоит из блоков, размерами менее 10 мкм, разориентированных на угол менее одного градуса (θ_2).

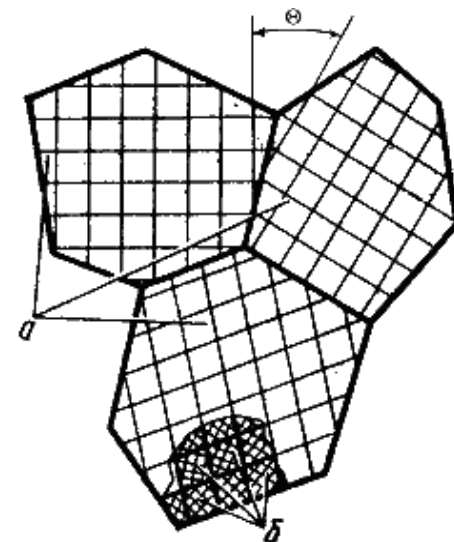
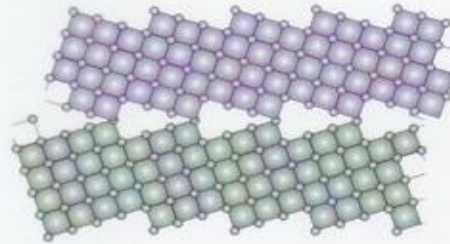


Рис 9. Разориентация зерен и блоков

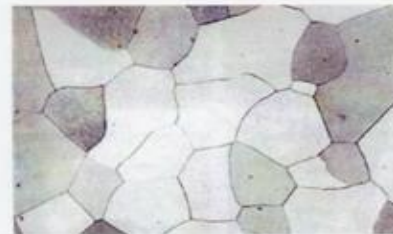
Иллюстрации

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Границы зерен и субзерен



x 10000



x 250

Малоугловые и большеугловые границы в Fe_α

Иллюстрации

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Схемы скольжения дислокаций

Схема движения краевой дислокации

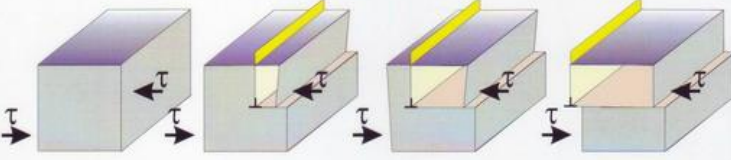
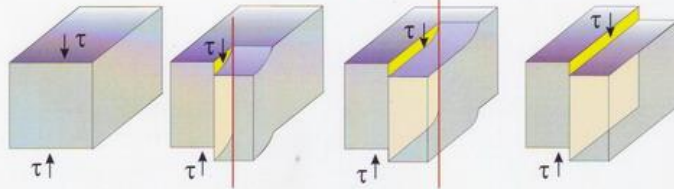


Схема движения винтовой дислокации



СЗТУ кафедра МТМиП лекцию составил Сивенков АВ 01.001.017

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Контур и вектор Бюргера краевой дислокации



Контур Бюргера



Вектор Бюргера

СЗТУ кафедра МТМиП лекцию составил Сивенков АВ 01.001.018

Лекция 2

Кристаллизации металлов.

- [Механизм и закономерности кристаллизации металлов](#)
- [Строение металлического слитка](#)
- [Изучение структуры.](#)
- [Физические методы исследования](#)
- Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном.
- Возможен переход из одного состояния в другое, если новое состояние в новых условиях является более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.
- Процесс кристаллизации – диффузионный (иллюстрация)
- С изменением внешних условий свободная энергия Гиббса изменяется по сложному закону различно для жидкого и кристаллического состояний.
- Характер изменения свободной энергии жидкого и твердого состояний с изменением температуры показан на рис. 11.

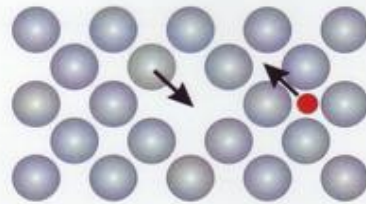
Понятие о диффузии в металлах иллюстрация

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Диффузия в металлах

Под диффузией понимают перемещение атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные для данного вещества

Диффузия может осуществляться по **вакансионному** и **межузельному** механизмам.



Диффузия сопровождается массопереносом.

Поток диффундирующего вещества \bar{Q} подчиняется закону Фика:

$$\bar{Q} = -D \nabla C$$

где D - коэффициент диффузии

∇C - градиент концентрации вещества

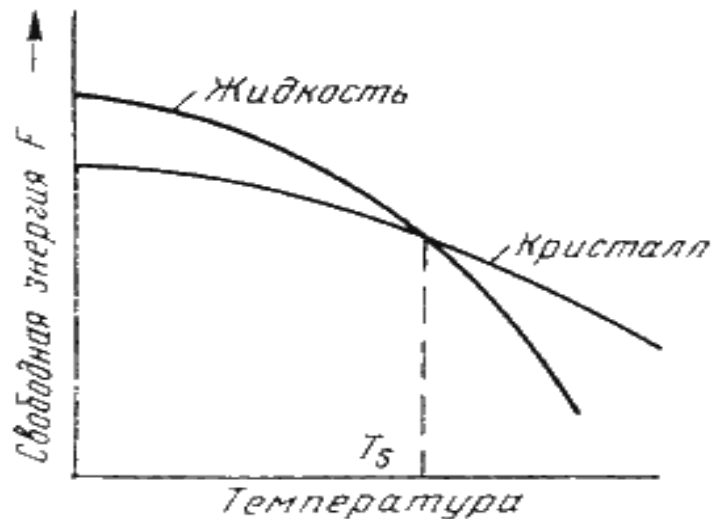
$$D = D_0 e^{-U/RT}$$

U - энергия активации.

Изменение свободной энергии в зависимости от температуры

Выше температуры T_S вещество должно находиться в жидком состоянии, а ниже T_S – в твердом.

При температуре равной T_S жидкая и твердая фаза обладают одинаковой энергией, металл в обоих состояниях находится в равновесии, поэтому две фазы могут существовать одновременно бесконечно долго.



Температура T_S – *равновесная или теоретическая температура кристаллизации*

Рис.11. Изменение свободной энергии в зависимости от температуры

Процесс кристаллизации чистого металла

- До точки 1 охлаждается металл в жидком состоянии, процесс сопровождается плавным понижением температуры

$$\Delta T = T_{\text{теор}} - T_{\text{кр.}}$$

- $T_{\text{теор}}$. – теоретическая температура кристаллизации;
- $T_{\text{кр.}}$. – фактическая температура
- Участок 1-2 процесс кристаллизации, сопровождается выделением тепла – скрытая теплота кристаллизации, поэтому t постоянна.
- После окончания кристаллизации в точке 2 температура снова начинает снижаться, металл охлаждается в твердом состоянии

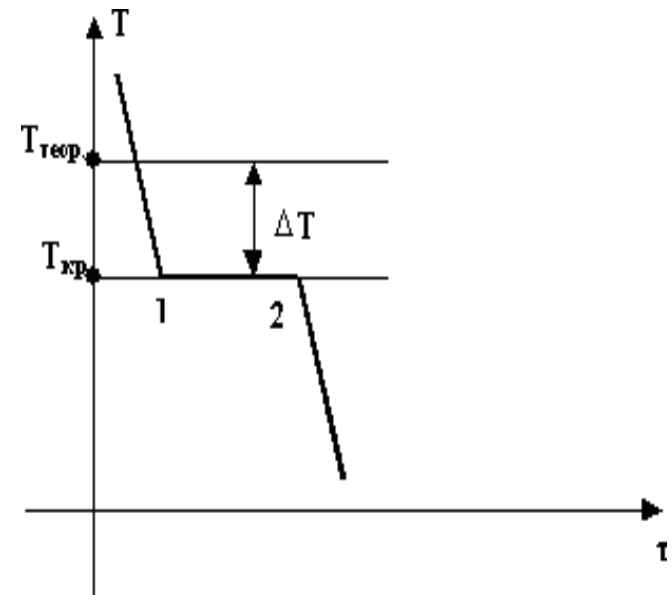


Рис.12. Кривая охлаждения чистого металла

Иллюстрация

Самопроизвольная кристаллизация

Изменение свободной энергии металла



Кривые охлаждения при кристаллизации

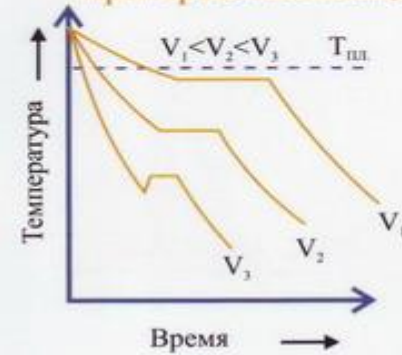
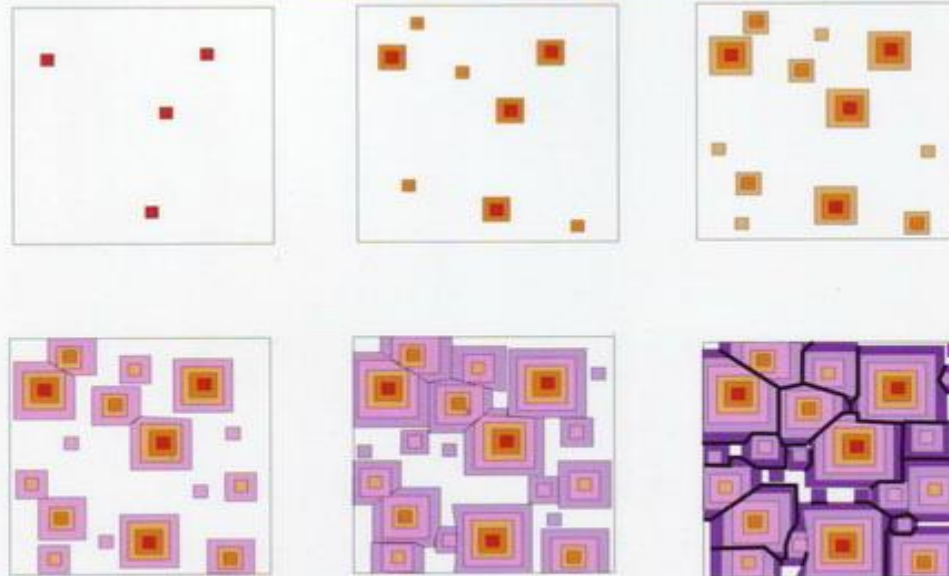


Схема процесса кристаллизации



Самопроизвольная кристаллизация продолжение

Самопроизвольная кристаллизация

Изменение свободной энергии (ΔF)
при кристаллизации

$$\Delta F = -V\Delta f + S\sigma$$

где

Δf - разность удельных свободных энергий
жидкой и твердой фаз

V - объём зародыша твердой фазы

S - площадь поверхности зародыша

σ - удельная поверхностная
энергия межфазной границы

Для зародыша шаровидной формы

$$\Delta F = -4/3\pi r^3 \Delta f + 4\pi r^2 \sigma$$

где r - радиус зародыша

Критический радиус зародыша рассчитывается
из следующего уравнения:

$$\frac{d\Delta F}{dr} = 0$$

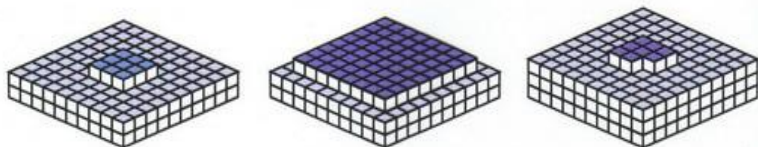
Отсюда
$$r^{sp} = \frac{2\sigma}{\Delta f}$$



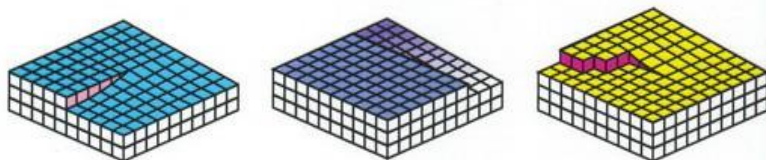
Самопроизвольная кристаллизация продолжение

Рост зародышевых центров

с образованием двумерного зародыша



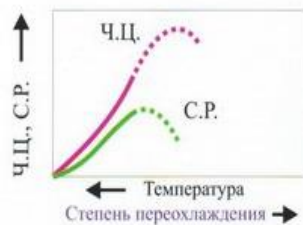
при наличии винтовой дислокации



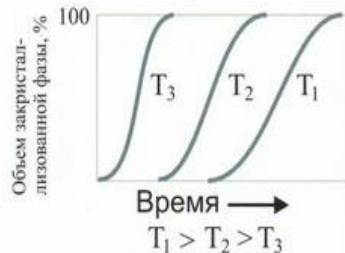
Параметры кристаллизации

Ч.Ц. - число зародышевых центров, возникающих в единице объема за единицу времени

С.Р. - скорость увеличения линейных размеров растущего кристалла



Кинетика кристаллизации



Строение слитка

Схема дендритных кристаллов



Схема макроструктуры слитка



Механизм кристаллизации металлов.

- При соответствующем понижении температуры в жидком металле начинают образовываться кристаллики – *центры кристаллизации* или *зародыши*. Для начала их роста необходимо уменьшение G Гиббса металла, иначе зародыш растворится.
- Минимальный размер, способного к росту зародыша, называется *критическим размером*, а зародыш – *устойчивым*.
- Зародыши с размерами равными и большими критического растут с уменьшением энергии и поэтому способны к существованию.
- Центры кристаллизации образуются независимо друг от друга в случайных местах.

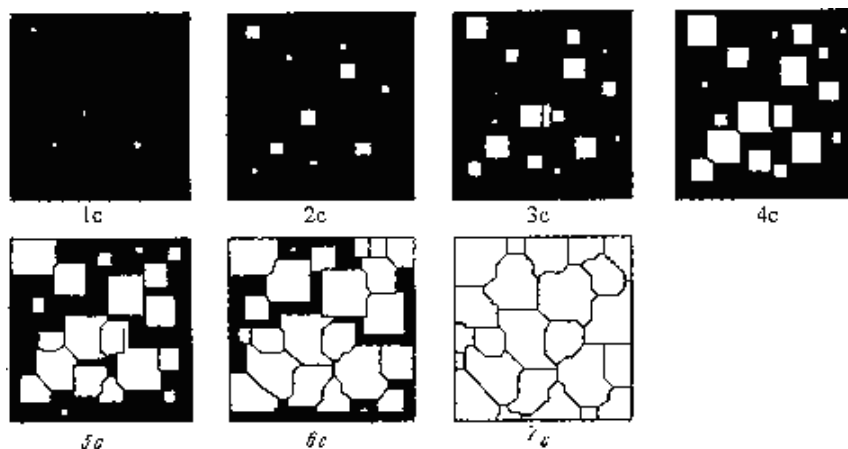


Рис.13. Модель процесса кристаллизации

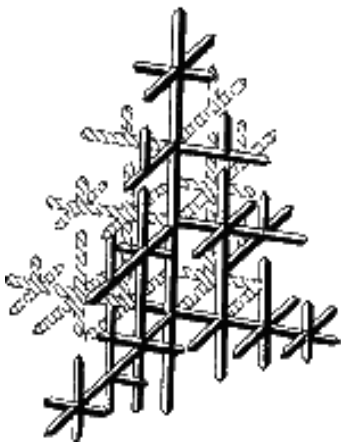
Т. О., процесс кристаллизации состоит из образования центров кристаллизации и роста кристаллов из этих центров.

В свою очередь, число центров кристаллизации.) и скорость роста кристаллов зависят от степени переохлаждения. Мелкозернистая

структуры – при максимальном числе центров кристаллизации и малой скорости роста кристаллов.

Практически *модифицированием*, когда в жидкие металлы добавляются вещества – *модификаторы*,

Строение металлического слитка



- Слиток состоит из трех зон:
- мелкокристаллической корковой зоны;
- зоны столбчатых кристаллов; -
- внутренняя зона крупных равноосных
- Растут дендриты с направлением, близким к направлению теплоотвода.

- Рис. 14 Схема стального слитка

Изучение структуры.

- Различают макроструктуру, микроструктуру и тонкую структуру.
- **1. Макроструктурный анализ** – изучение строения металлов и сплавов невооруженным глазом или при небольшом увеличении, с помощью лупы.
- **2. Микроструктурный анализ** – изучение поверхности при помощи световых микроскопов. Увеличение – 50...2000 раз. Позволяет обнаружить элементы структуры размером до 0,2 мкм. Образцы – микрошлифы с блестящей полированной поверхностью, так как структура рассматривается в отраженном свете.
- **Рентгенографические методы** – для изучения атомно-кристаллического строения твердых тел (тонкое строение).

Лекция 3

Общая теория сплавов

- [Основные понятия в теории сплавов.](#)
- [Особенности строения, кристаллизации и свойств сплавов: механических смесей; твердых растворов; химических соединений](#)

Под сплавом понимают вещество, полученное сплавлением двух или более элементов.

Основные понятия в теории сплавов

- **Система** – группа тел выделяемых для наблюдения и изучения.
- **Компоненты** – вещества, образующие систему. В качестве компонентов выступают чистые вещества и химические соединения, если они не диссоциируют на составные части в исследуемом интервале температур.
- **Фаза** – однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностного раздела, при переходе через которую структура и свойства резко меняются.
- **Вариантность** (С) (число степеней свободы) – это число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация), которые можно изменять без изменения количества фаз в системе.
- **Правило фаз** или **закон Гиббса** $C = K - \Phi + 2$ при постоянном давлении $C = K - \Phi + 1$,
где: С – число степеней свободы, К – число компонентов, Ф – число фаз, учитывает возможность изменения температуры.
- Строение металлического сплава зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, составляющие сплав.

Лекция 3

- Почти все металлы в жидком состоянии растворяются друг в друге в любых соотношениях.
- При образовании сплавов в процессе их затвердевания возможно различное взаимодействие компонентов.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Основные определения

Фазой называют совокупность однородных частей сплава (системы), одинаковых по химическому составу, атомному строению и отделенных от других частей системы поверхностью раздела

Система - совокупность взаимодействующих фаз, образующих сплав.

Компонентами сплава (системы) называются химические элементы и соединения, из которых может быть образована любая фаза сплава.

Число степеней свободы - количество независимых термодинамических переменных, полностью описывающих состояние системы.

Число степеней свободы (f) подчиняется **правилу фаз Гиббса**: $f = K - \Phi + 1$,
где K - число компонентов, образующих систему;
 Φ - количество фаз, находящихся в равновесии

Лекция 3 Особенности строения, кристаллизации и свойств сплавов

- В зависимости от характера взаимодействия компонентов различают сплавы:
 1. механические смеси;
 2. химические соединения;
 3. твердые растворы.
- Сплавы *механические смеси* образуются, когда компоненты не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения.

Условия образования сплавов - *механические смеси*

- Образуются между элементами значительно различающимися по строению (размер атомов сильно отличается) и свойствам (разные группы в табл. Менделеева), когда сила взаимодействия между однородными атомами больше чем между разными.
- Сплав состоит из кристаллов входящих в него компонентов (рис. 15).
- В сплавах сохраняются кристаллические решетки компонентов



Рис. 15 Схема микроструктуры механической смеси

Лекция 3 Сплавы химические соединения и твердые растворы

Сплавы химические соединения

- Сплавы *химические соединения* образуются между элементами, значительно различающимися по строению и свойствам, если сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем между однородными.

Особенности сплавов типа хим. соединения

- Постоянство состава (сплав образуется при определенном соотношении компонентов), химическое соединение обозначается $A_n B_m$
- Образуется специфическая, отличающаяся от решеток элементов, составляющих химическое соединение, кристаллическая решетка с правильным упорядоченным расположением атомов
- Ярко выраженные индивидуальные свойства
- Постоянство температуры кристаллизации, как у чистых компонентов

Сплавы твердые растворы

- Сплавы *твердые растворы* – это твердые фазы, в которых соотношения между компонентами могут изменяться. Являются кристаллическими веществами.
- Характерной особенностью твердых растворов является: наличие в их кристаллической решетке разнородных атомов, при сохранении типа решетки растворителя.
- Твердый раствор состоит из однородных зерен

Лекция 3 Классификация сплавов твердых растворов

- По степеням растворимости компонентов различают твердые растворы:
 - с неограниченной растворимостью компонентов;
 - с ограниченной растворимостью компонентов.

Для образования растворов с неограниченной растворимостью необходимы:

- изоморфность (однотипность) кристаллических решеток компонентов;
- близость атомных радиусов компонентов, которые не должны отличаться более чем на 8...13 %.
- близость физико-химических свойств подобных по строению валентных оболочек атомов.

При неограниченной растворимости компонентов Кр. решетка компонента растворителя с увеличением концентрации растворенного компонента плавно переходит в Кр. решетку растворенного компонента.

При ограниченной растворимости компонентов возможна концентрация растворенного

вещества до определенного предела.

- По характеру распределения атомов растворенного вещества в кристаллической решетке растворителя различают твердые растворы:
 - замещения;
 - внедрения;
 - вычитания.

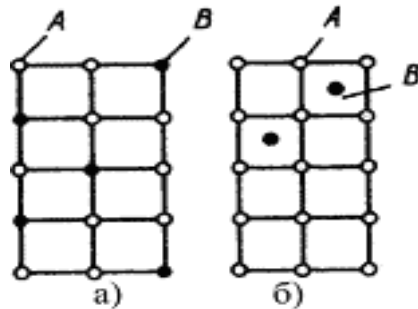
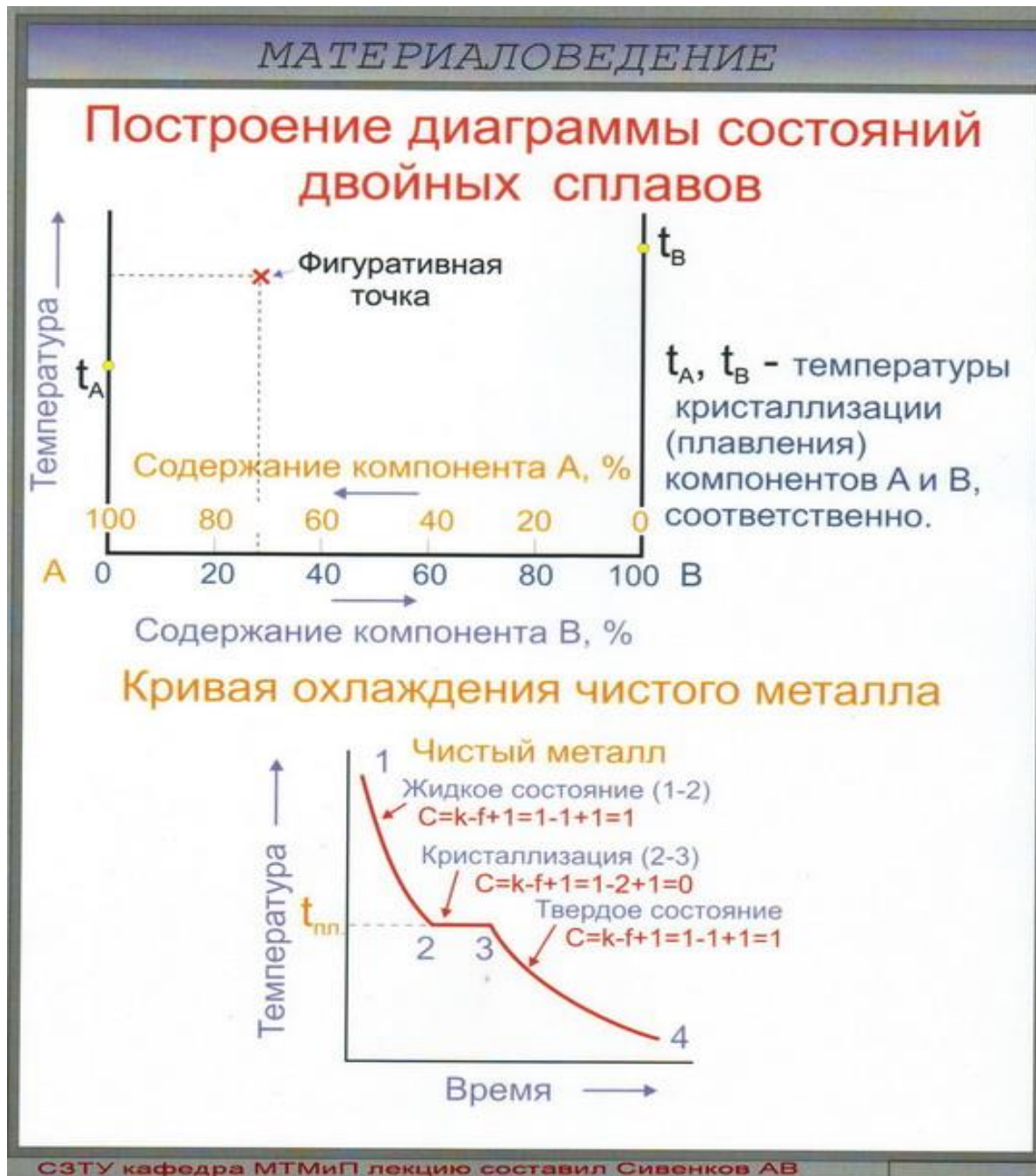


Рис.16. Кристаллическая решетка твердых растворов замещения (а), внедрения (б)

Лекция 3

Рис.17



Лекция 3 Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

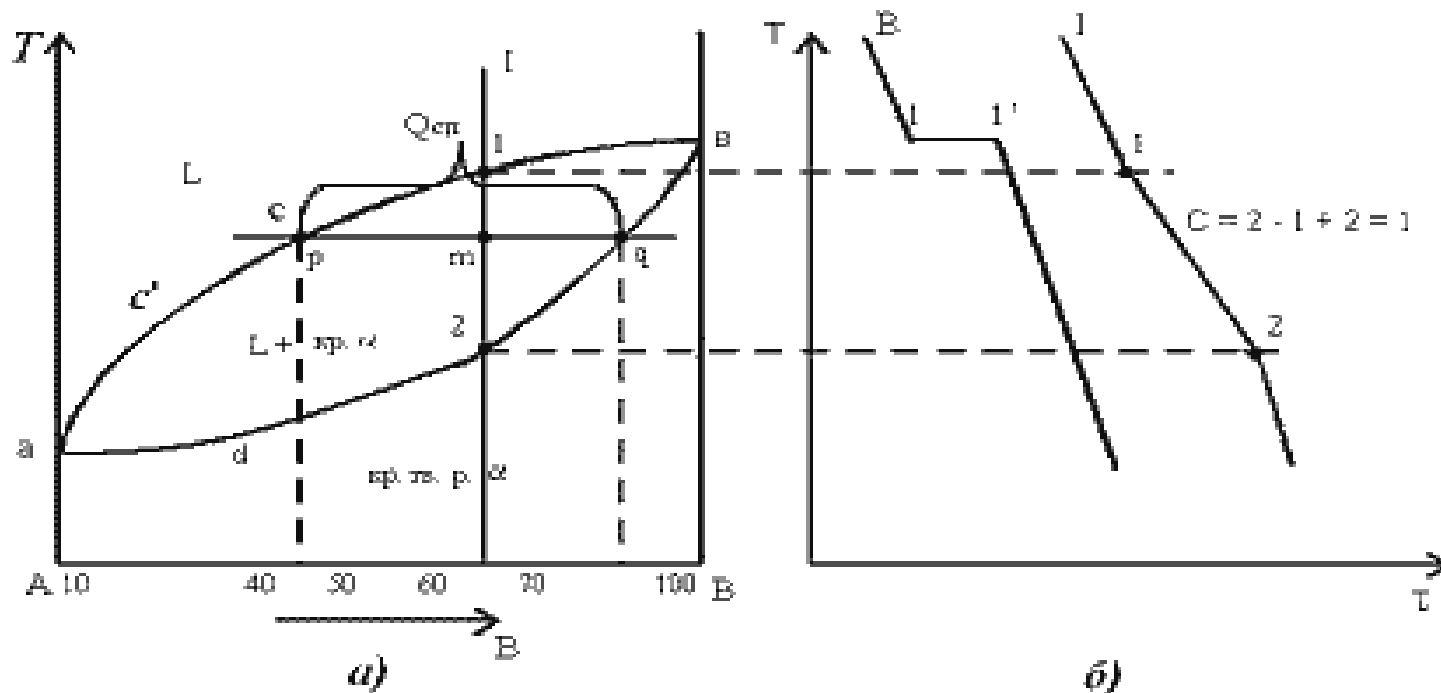


Рис.18 Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а); кривые охлаждения типичных сплавов (б)

Лекция 3 Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в компонентах в твердом состоянии (механические смеси)

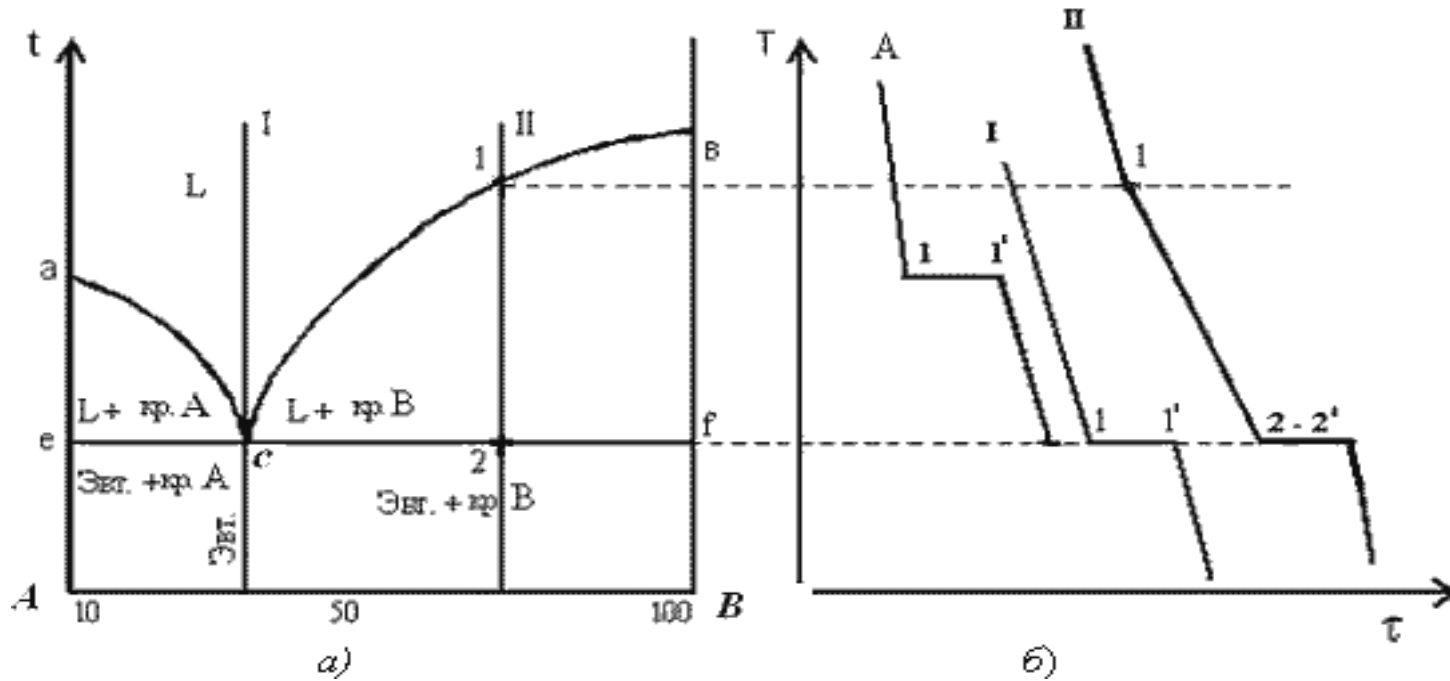


Рис 19. Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения сплавов (б)

Лекция 3 Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

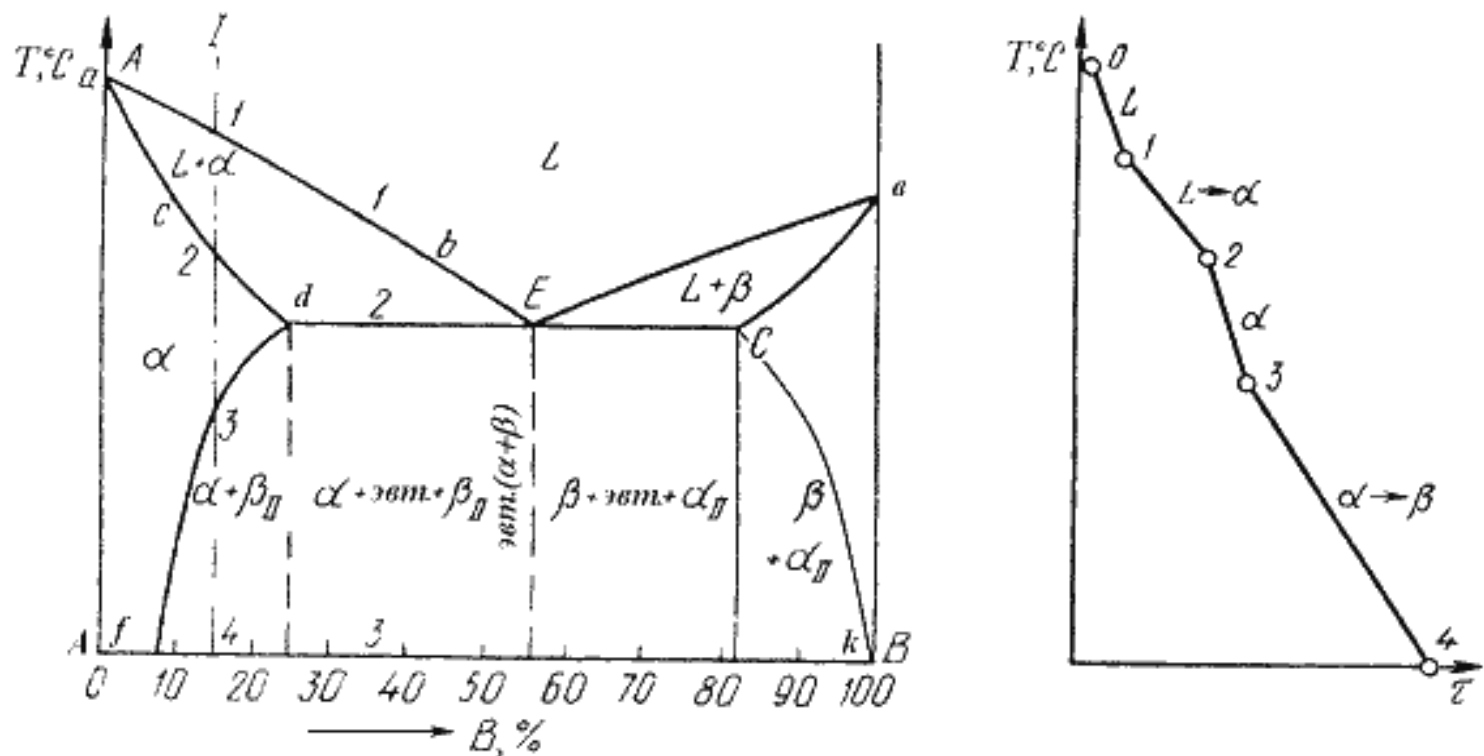


Рис. 20. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии (а) и кривая охлаждения сплава (б)

Лекция 3 Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения

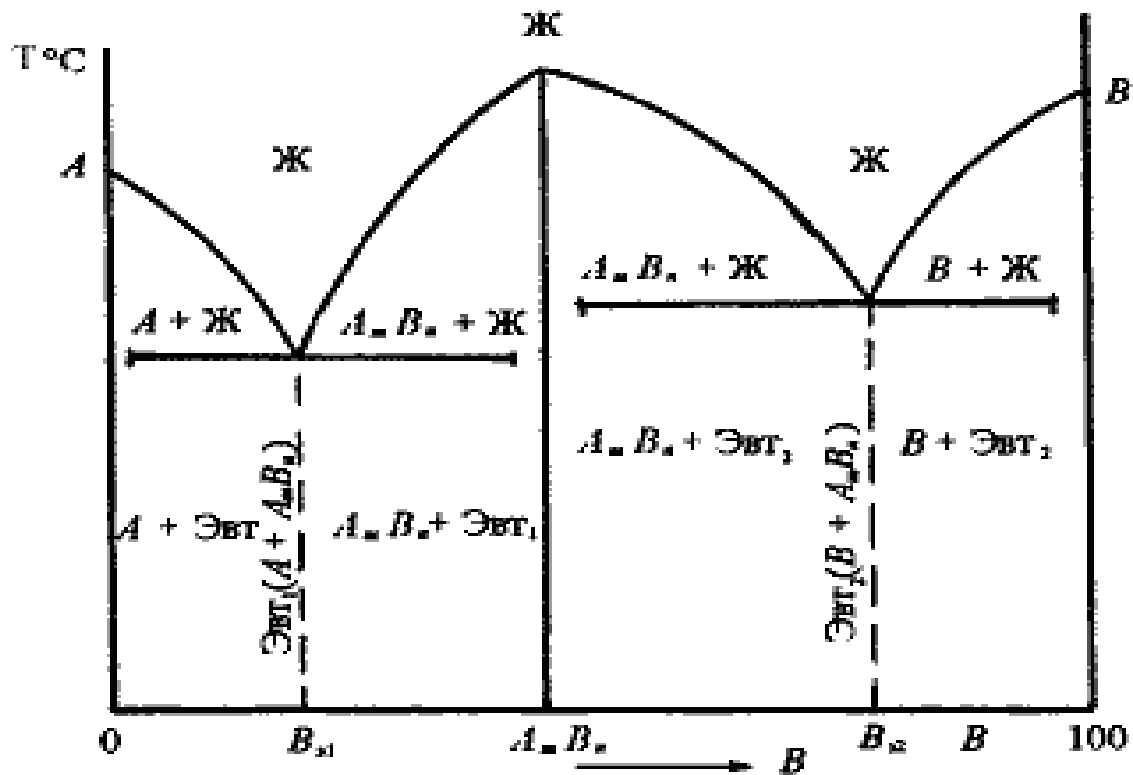


Рис. 21. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения

Лекция 3 Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния (ДС)

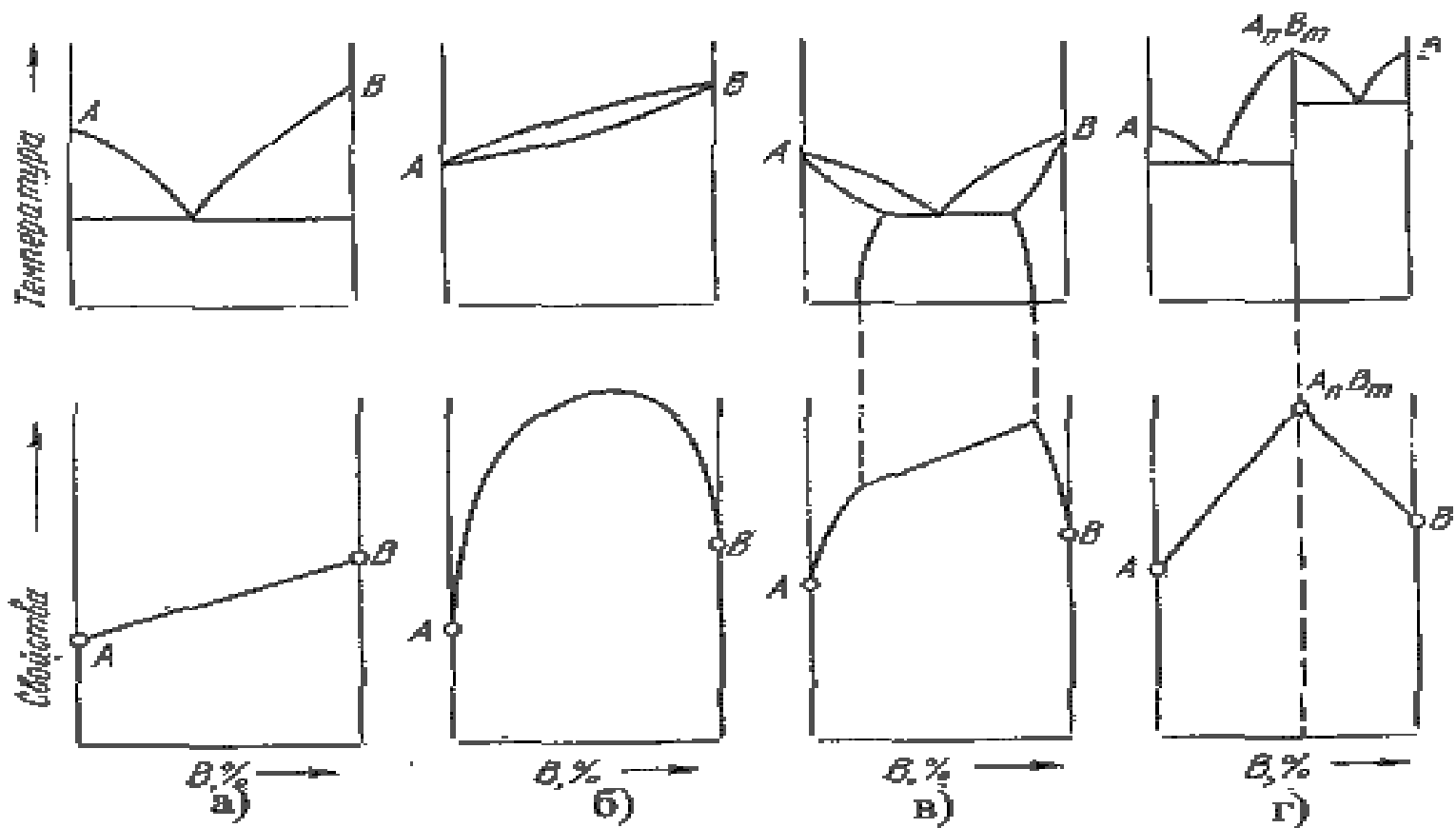


Рис.22 Зависимости свойств от типа ДС

а) - линейная ; б) нелинейная; в) смешанная г) с сингулярной точкой (минимума или максимума).

Лекция 4 Железоуглеродистые сплавы. Диаграмма состояния железо – углерод

- [Структуры железоуглеродистых сплавов](#)
- [Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов](#)
- [Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов](#)

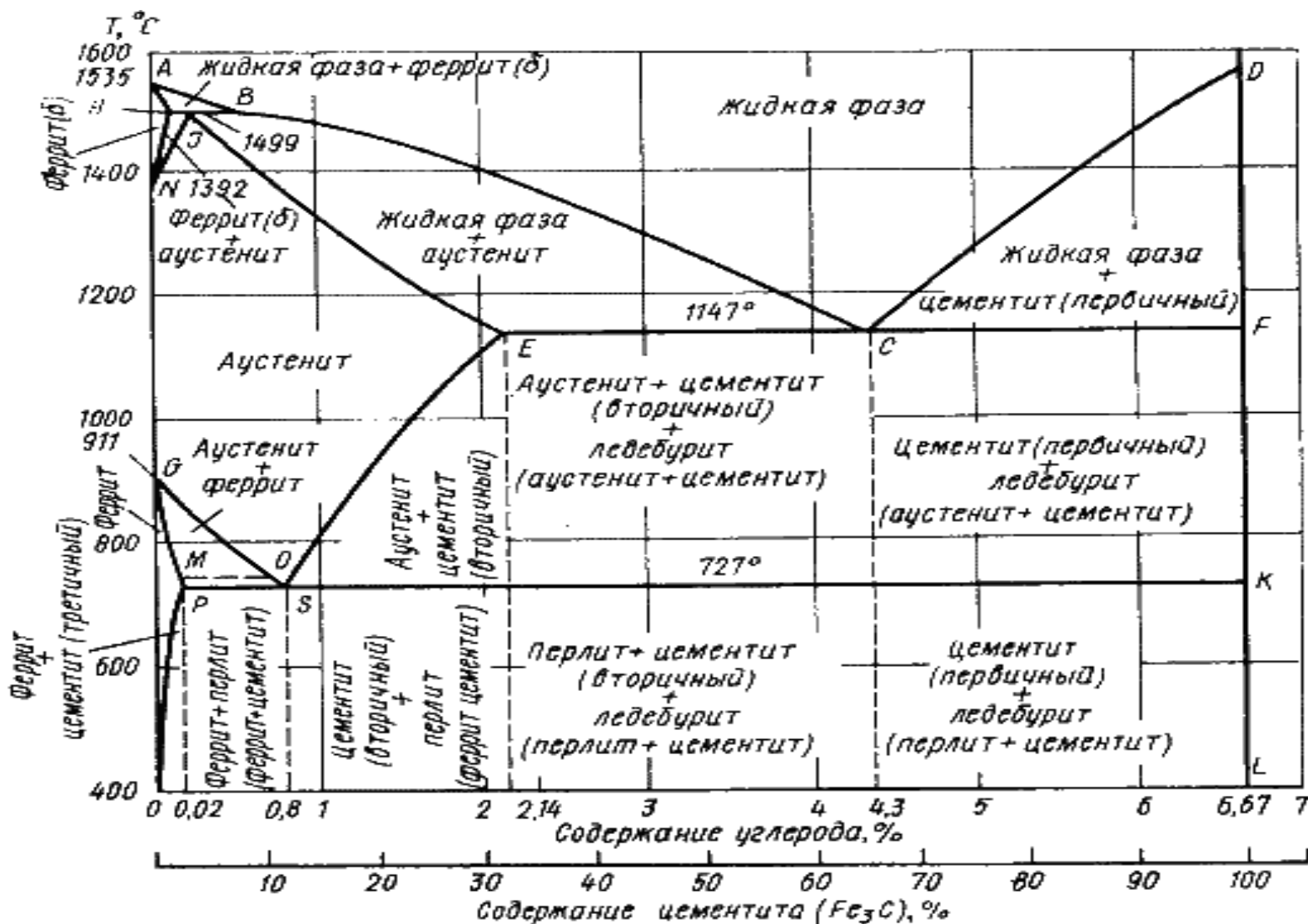
Структуры железоуглеродистых сплавов

- Диаграмма состояния железо – углерод дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов
- Начало изучению диаграммы железо – углерод положил Чернов Д.К. в 1868 г.
- Диаграмма железо – углерод должна распространяться от *Fe* до *C*.
- Железо образует с углеродом химическое соединение: цементит – Fe_3C .
- В химическом соединении Fe_3C содержание углерода **6,67%**.
- Рассматриваемая часть диаграммы состояния до **6,67%** углерода.
- Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо, углерод и цементит.
- В системе железо – углерод существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит, аустенит, цементит.

Лекция 4 Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов

- 1. **Железо** – переходный металл серебристо-светлого цвета. Имеет высокую температуру плавления – **1539° C**.
- В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях. **Полиморфные превращения** происходят при температурах **911° C** и **1392° C**. При температуре **ниже 911° C** существует **Fe α** с **ОЦК** решеткой. В интервале температур **911...1392° C** устойчивым является **Fe γ** с **ГЦК** решеткой.
- **Выше 1392° C** железо имеет **ОЦК** решетку и называется **Fe δ** или высокотемпературное. Высокотемпературная модификация не представляет собой новой аллотропической формы.
- **Критическую температуру 911° C** превращения **Fe α** в **Fe γ** обозначают точкой **A3**, а температуру **1392° C** превращения - точкой **A4**.
- При температуре **ниже 768° C** железо **ферромагнитно**, а **выше – парамагнитно**. **Точка Кюри** железа **768° C** обозначается **A2**.
- Железо технической чистоты обладает невысокой твердостью (**80 НВ**) и прочностью
- 2. **Углерод** относится к неметаллам, обладает полиморфным превращением, в зависимости от условий образования
- В сплавах железа с углеродом, углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и **в виде химического соединения – цементита (Fe $_3$ C)**, а также **в свободном состоянии в виде графита** (в серых чугунах).

Лекция 4 Диаграмма состояния железо – углерод



Лекция 4

Фазы в системе железо – углерод

- **1. Жидкая фаза.** Железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях .
- **2. Феррит (Ф)**– твердый раствор внедрения углерода в альфа -железо.
- Феррит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – $0,006\%$ при комнатной температуре (точка Q), максимальную – $0,02\%$ при температуре $727^{\circ}C$ (точка P).
- Углерод располагается в дефектах решетки.
- При температуре выше $1392^{\circ}C$ существует высокотемпературный феррит), с предельной растворимостью углерода $0,1\%$ при $t = 1499^{\circ}C$ (точка J)
- Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость – 130 НВ), и пластичен, магнитен до $768^{\circ}C$.
- **3. Аустенит (А)**– твердый раствор внедрения углерода в гамма -железо.
- Углерод занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки.
- Аустенит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – $0,8\%$ при температуре $727^{\circ}C$ (точка S), максимальную – $2,14\%$ при температуре $1147^{\circ}C$ (точка E). Аустенит имеет твердость $200...250\text{ НВ}$, пластичен, парамагнитен.
- При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования.
- **4. Цементит (Fe_3C)** – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит $6,67\%$ углерода. Аллотропических превращений не испытывает.
- Температура плавления цементита точно не установлена ($1250, 1550^{\circ}C$). При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, **магнитные свойства теряет при $217^{\circ}C$.**
- Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ , легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность.

4 Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов

- Линия ***ABCD*** – ликвидус системы. На участке *AB* начало кристаллизации феррита, на участке *BC* начало кристаллизации аустенита, на участке *CD* – кристаллизация Fe_3C (1) го.
- Линия ***АНЕСС*** – линия солидус. На участке *АН* заканчивается кристаллизация феррита. На линии *НВ* при постоянной температуре 1499 °С идет перетектическое превращение, (жидкая фаза реагирует с кристаллами феррита), образуется аустенит:
- На участке *ЕС* заканчивается кристаллизация аустенита. На участке *ЕСС* при температуре 1147° С идет эвтектическое превращение. Жидкость, содержащая 4,3 % углерода превращается в эвтектическую смесь аустенита и Fe_3C (1):
- **Эвтектика** системы железо – цементит - **ледебурит (Л)**, содержит **4,3 %** углерода.
- При температуре ниже **727° С** в состав ледебурита входят цементит (1) и перлит, его называют **ледебурит превращенный (ЛП)**.
- По линии *НН* начинается превращение феррита в аустенит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии *НН* превращение феррита в аустенит заканчивается.
- По линии ***GS*** превращение **аустенита в феррит**, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии *РС* превращение аустенита в феррит заканчивается. По линии *ЕС* начинается выделение цементита (2) из аустенита, за счет снижения растворимости углерода в Fe_γ при понижении температуры.
- По линии ***МО*** при температуре **768° С** - **магнитные превращения**. По линии ***PSK*** при температуре **727° С** - **эвтектоидное превращение**. Аустенит, с **0,8 %** углерода, превращается в эвтектоидную смесь **феррита и Fe_3C (2) го** .
- **Эвтектоид** системы $Fe - Fe_3C$ наз. **перлитом (П)**, содержит **0,8 %** углерода

Лекция 4 Структуры железоуглеродистых сплавов

- Все сплавы системы железо – цементит по структурному признаку делят на две большие группы: стали и чугуны.
- Сплавы, с содержанием углерода менее **0,02%** (точка P) - **техническое железо**.. Структура таких сплавов после окончания кристаллизации состоит или из зерен феррита, при содержании углерода менее 0,006 %, или из зерен феррита и кристаллов цементита третичного, расположенных по границам зерен феррита, если содержание углерода от 0,006 до 0,02 %.
- **Углеродистыми сталями** называют сплавы железа с углеродом, содержащие **0,02...2,14 % углерода**.
- По содержанию углерода и по структуре стали подразделяются на доэвтектоидные (С **0,02...0,8 %**) , структура **феррит + перлит**; эвтектоидные , (С= **0,8 %**) структура **перлит (П)**, перлит может быть пластинчатый или зернистый; заэвтектоидные (С **0,8...2,14 %**), структура **перлит + цементит** вторичный (П + ЦП), цементитная сетка располагается вокруг зерен перлита.
- Фазовый состав сталей и чугунов при нормальных температурах один и тот же, они состоят из феррита и цементита. Однако свойства сталей и белых чугунов значительно различаются.
- Основным фактором, определяющим свойства сплавов системы железо – цементит является их структура

Лекция 4 Стали. Классификация и маркировка сталей

- [Влияние углерода и примесей на свойства сталей](#)
- [Назначение легирующих элементов.](#)
- [Классификация и маркировка сталей](#)
- [Классификация сталей](#)
- [Маркировка сталей](#)

Влияние углерода на свойства сталей

С ростом содержания углерода в структуре стали:

- увеличивается количество цементита, одновременно снижается доля феррита, это приводит к уменьшению пластичности,
- повышается прочность и твердость,
- изменяются вязкие свойства,
- повышается порог хладноломкости,
- снижается ударная вязкость,
- повышаются электросопротивление и коэрцитивная сила,
- снижаются магнитная проницаемость и плотность магнитной индукции ,
- ухудшаются литейные свойства, обрабатываемость давлением и резанием,

Лекция 4

Влияние примесей.

- Четыре группы примесей: постоянные, скрытые, специальные, примеси
- Постоянные примеси: кремний, марганец, сера, фосфор.
- Марганец и кремний - технологические примеси для раскисления (при выплавке стали).
- **Марганец (0,5...0,8 %).** повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Вместо сульфида железа FeS , образуется соединение сульфид марганца MnS .
- **Кремний (0,35...0,4%)** дегазируя металл, повышает плотность слитка, кремний растворяется в феррите и повышает прочность стали и предел текучести, снижает пластичность.
- **Фосфор (0,025...0,045 %)**, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности и предел текучести, но **снижает пластичность и вязкость**. Повышение содержания фосфора на каждую 0,01 % повышает порог хладноломкости на 20...25оС.
- Содержание **серы** в сталях составляет **0,025...0,06 %**, вредная примесь. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – **сульфид серы FeS** , которое образует с железом легкоплавкую эвтектику с t плавления 988оС. При нагреве под прокатку или ковку эвтектика плавится, нарушаются связи между зернами, в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается – явление красноломкости.
- Красноломкость – повышение хрупкости при высоких температурах
- **S – уменьшает пластичность, свариваемость и коррозионную стойкость. P–искажает кристаллическую решетку.**
- Скрытые примеси - газы (азот, кислород, водород) – попадают в сталь при выплавке
Примеси внедрения (азот N , кислород O) повышают порог хладноломкости и снижают сопротивление хрупкому разрушению.

Лекция 3 Назначение легирующих элементов.

- *Специальные примеси* – специально вводятся в сталь для получения заданных свойств. Примеси называются легирующими элементами, а стали - легированные сталями
- Основным легирующим элементом является хром (0,8...1,2)%. Он повышает прокаливаемость, повышает равномерность твердости стали. Порог хладоломкости хромистых сталей - (0...-100)°C.

Дополнительные легирующие элементы.

- Бор - 0.003%. Увеличивает прокаливаемость, повышает порог хладоломкости (+20-60 °C).
- Марганец – увеличивает прокаливаемость, но содействует росту зерна, и повышает порог хладоломкости до (+40...-60)°C.
- Титан (~0,1%) вводят для измельчения зерна в хромомарганцевой стали.
- Молибден (0,15...0,46%) в хромистых сталях увеличивает прокаливаемость, снижает порог хладоломкости до -20-120°C, увеличивает статическую, динамическую и усталостную прочность стали, устраняет склонность к внутреннему окислению.
- Ванадий (0.1...0.3) % в хромистых сталях измельчает зерно и повышает прочность
- Никель в хромистых сталях, повышает прочность и прокаливаемость, понижает порог хладоломкости, но повышает склонность к отпускной хрупкости (молибден компенсирует этот недостаток). У хромоникелевых сталей, наилучший комплекс свойств. Однако никель дефицитен, и применение таких сталей ограничено. Никель можно заменить медью..
- При легировании хромомарганцевых сталей кремнием получают, стали – хромансиль (20ХГС, 30ХГСА), которые хорошо свариваются, штампуются и обрабатываются резанием.
- Кремний повышает ударную вязкость и температурный запас вязкости.
- Добавка свинца, кальция – улучшает обрабатываемость резанием. Термическая обработка улучшает комплекс механических свойств

Классификация сталей

- По химическому: составу: углеродистые и легированные.
- По содержанию углерода:
 - низкоуглеродистые, с содержанием углерода до 0,25 %;
 - среднеуглеродистые, с содержанием углерода 0,3...0,6 %;
 - высокоуглеродистые, с содержанием углерода выше 0,7 %
- По равновесной структуре: доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные.
- По качеству, содержания вредных примесей: серы и фосфора:
 - углеродистые стали обыкновенного качества;
 - качественные стали;
 - высококачественные стали.
- По способу выплавки:
 - в мартеновских печах;
 - в кислородных конверторах;
 - в электрических печах: электродуговых, индукционных и др.
- По назначению:
 - конструкционные – применяются для изготовления деталей машин и механизмов;
 - инструментальные – применяются для изготовления различных инструментов;
 - специальные – стали с особыми свойствами: электротехнические, с особыми магнитными свойствами и др.

Лекция 4

Маркировка сталей

Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380).

- Стали содержат повышенное количество серы и фосфора
- Маркируются Ст.2кп., БСт.3кп, ВСт.3пс, ВСт.4сп.
- Ст – индекс данной группы стали. Цифры от 0 до 6 - это условный номер марки стали, по возрастанию прочности и снижению пластичность стали.
- По гарантиям при поставке существует три группы сталей: А, Б и В. Для сталей группы А гарантируются механические свойства (индекс А не указывается). Для сталей группы Б гарантируется химический состав. Для сталей группы В гарантируются и механические свойства, и химический состав.
- Индексы кп, пс, сп указывают степень раскисленности стали: кп - кипящая, сп - спокойная. пс – полуспокойная.

Качественные углеродистые стали

- Конструкционные качественные углеродистые стали Маркируются двухзначным числом, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента. Сталь 08 кп, сталь 10 пс, сталь 45. Содержание углерода, соответственно, 0,08 %, 0,10 %, 0.45 %.
- Инструментальные качественные углеродистые стали (У) и число, указывающее содержание углерода в десятых долях процента. Сталь У8, сталь У13. (0,8 % и 1,3 %)
- Инструментальные высококачественные углеродистые стали. Маркируются аналогично качественным инструментальным углеродистым сталям, только в конце марки ставят букву А, для обозначения высокого качества стали. Сталь У10А.

Обозначения легирующих элементов:

- Х – хром, Н – никель, М – молибден, В – вольфрам, К – кобальт, Т – титан, А – азот (указывается в середине марки), Г – марганец, Д – медь, Ф – ванадий, С – кремний, П – фосфор, Р – бор, Б – ниобий, Ц – цирконий, Ю – алюминий. Сталь 15Х25Н19ВС2

Лекция 4 **Виды термической обработки металлов. Основы теории термической обработки стали**

- [Виды термической обработки металлов.](#)
- [Превращения, протекающие в структуре стали при нагреве и охлаждении](#)
- [Механизм основных превращений](#)
- [Превращение перлита в аустенит](#)
- [Превращение аустенита в перлит при медленном охлаждении](#)

Виды термической обработки металлов

- Термическая обработка - основной способ, изменения структуры и свойств сплавов. Основы термической обработки разработал Чернов Д.К.
- Термическая включает операции нагрева, выдержки и охлаждения, выполняемых в определенной последовательности при определенных режимах.
- **Цель - изменения внутреннего строения сплава и получения нужных свойств** (представляется в виде графика в осях температура – время, см. рис. 7..1).
- Различают следующие виды ТО: 1. Отжиг 1 рода и II рода. 2. .Закалка.. 3. Отпуск
- **Отжиг 1 рода** – возможен для любых металлов и сплавов. Включает нагрев, выдержку, при определенной температуре и медленное охлаждение Без фазовых превращений Разновидности отжига 1 рода :
- диффузионный;
- рекристаллизационный;
- отжиг для снятия напряжения послековки, сварки, литья

- **Отжиг II рода** – отжиг металлов и сплавов, испытывающих **фазовые превращения** в твердом состоянии при нагреве и охлаждении.
- Проводится для сплавов, в которых имеются полиморфные или эвтектоидные превращения, а также переменная растворимость компонентов в твердом состоянии.
- Проводят отжиг второго рода с целью получения более равновесной структуры и подготовки ее к дальнейшей обработке.

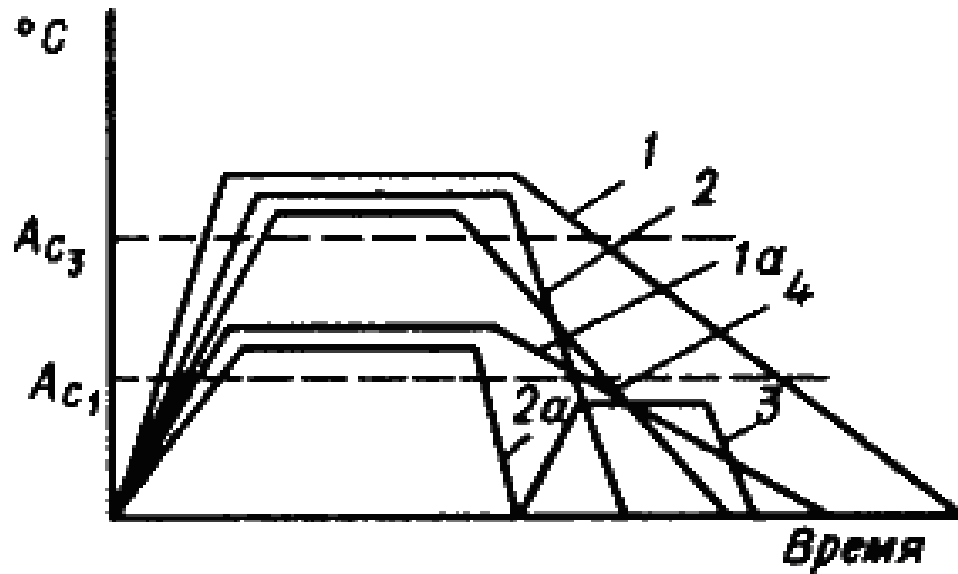


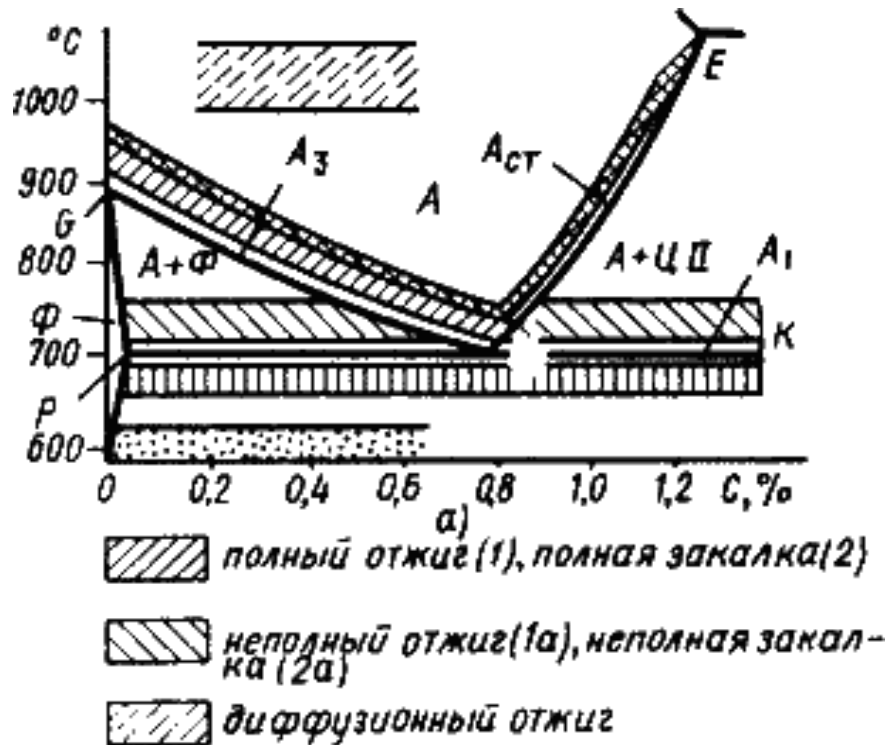
Рис. 23

- В результате отжига измельчается зерно, повышаются пластичность и вязкость, снижаются прочность и твердость, улучшается обрабатываемость резанием.
- Характеризуется нагревом до температур выше критических и очень медленным охлаждением, как правило, вместе с печью (рис. 21 (1, 1a)).
- **Закалка** – проводится для сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве и охлаждении, с целью повышение твердости и прочности путем образования неравновесных структур (сорбит, троостит, мартенсит).
- Характеризуется нагревом до температур выше критических и высокими скоростями охлаждения
- **.Отпуск** – проводится с целью снятия внутренних напряжений, снижения твердости и увеличения пластичности и вязкости закаленных сталей.
- Характеризуется нагревом до температуры ниже критической A_c . Скорость охлаждения роли не играет. Происходят превращения, уменьшающие степень неравновесности структуры закаленной стали.
- Термическую обработку подразделяют на **предварительную и окончательную**.
- **Предварительная** – применяется для подготовки структуры и свойств материала для последующих технологических операций (для обработки давлением, улучшения обрабатываемости резанием).
- **Окончательная** – формирует свойство готового изделия.

Л.4 Превращения, протекающие в структуре стали при нагреве и охлаждении

- Любая разновидность термической обработки состоит из комбинации четырех основных превращений, в основе которых лежат стремления системы к минимуму свободной энергии
- 1. Превращение **перлита в аустенит**, происходит при нагреве **выше A_1** - критической температуры, минимальной свободной энергией обладает аустенит.
- 2. Превращение **аустенита в перлит**, происходит при охлаждении **ниже A_1** , минимальной свободной энергией обладает перлит:
- 3. Превращение **аустенита в мартенсит**, происходит при **быстром охлаждении** ниже температуры неустойчивого равновесия
- 4. Превращение **мартенсита в перлит**; – происходит **при любых температурах**, т.к. свободная энергия мартенсита больше, чем свободная энергия перлита.
- При разработке технологии необходимо установить:
 - режим нагрева деталей (температуру и время нагрева);
 - характер среды, где осуществляется нагрев и ее влияние на материал стали;
 - условия охлаждения.
- **Режимы термической обработки** назначают **в соответствии с диаграммами состояния** и диаграммой изотермического распада аустенита.
- Нагрев может осуществляться в нагревательных печах, топливных или электрических, в соляных ваннах или в ваннах с расплавленным металлом, пропусканием через изделие электрического тока или в результате индукционного нагрева.

состояния железо – цементит и температурные области нагрева при ТО сталей (часть ДС)



Скорость нагрева тем выше, чем менее легирована сталь, однороднее ее структура, проще конфигурация. **Отжиг**, снижая твердость и повышая пластичность и вязкость за счет получения равновесной мелкозернистой структуры, позволяет:

- улучшить обрабатываемость заготовок давлением и резанием;
- исправить структуру сварных швов, перегретой при обработке давлением и литье стали;
- подготовить структуру к последующей термической обработке.

Характерно медленное охлаждение со скоростью $30 \dots 100 \text{ } ^\circ\text{C/}$

- **1. Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг.** Применяется для устранения ликвации, выравнивания химического состава сплава.
- В его основе – диффузия. В результате нагрева выравнивается состав, растворяются избыточные карбиды. Применяется, в основном, для легированных сталей.
- Температура нагрева зависит от температуры плавления, $TН = 0,8 T_{пл}$.
- Продолжительность выдержки: 8..- 20 часов.
- **2. Рекристаллизационный отжиг** проводится для снятия напряжений после холодной пластической деформации.
- Температура нагрева связана с температурой плавления: $TН = 0,4 T_{пл}$.
- Продолжительность зависит от габаритов изделия.
- **3. Отжиг для снятия напряжений** после горячей обработки (литья, сварки, обработки резанием, когда требуется высокая точность размеров).
- Температура нагрева выбирается в зависимости от назначения, находится в широком диапазоне: $TН = 160 \dots \dots 700 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- Продолжительность зависит от габаритов изделия.

- **Отжиг второго рода** предназначен для изменения фазового состава. Температура нагрева и время выдержки обеспечивают нужные структурные превращения. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы успели произойти обратные диффузионные фазовые превращения.
- Является подготовительной операцией, которой подвергают отливки, поковки, прокат.
- В зависимости от температуры нагрева различают отжиг:
 - **1. полный**, с температурой нагрева на **30...50 оС** выше критической t_{A3}
 - Проводится для **доэвтектоидных** сталей для исправления структуры.
 - При такой температуре нагрева аустенит получается мелкозернистый, и после охлаждения сталь имеет также мелкозернистую структуру.
 - **2. неполный**, с температурой нагрева на **30...50 оС** выше критической t_{A1}
 - Применяется для **заэвтектоидных** сталей. При таком нагреве в структуре сохраняется цементит вторичный, в результате отжига цементит приобретает сферическую форму (сфероидизация).
 - **3. циклический или маятниковый отжиг** применяют, если после проведения неполного отжига цементит остается пластинчатым. В этом случае после нагрева выше t_{A1} следует охлаждение до **680 оС**, затем снова нагрев до температуры **750...760) оС** и охлаждение. В результате получают зернистый цементит.
 - **4. изотермический отжиг** – после нагрева до требуемой температуры, изделие быстро охлаждают до температуры на **50...100 оС** ниже критической t_{A1} и выдерживают до полного превращения аустенита в перлит, затем охлаждают на спокойном воздухе. Температура изотермической выдержки близка к температуре минимальной устойчивости аустенита.

Л.4

Нормализация.

- **Нормализация** – разновидность отжига.
- Вид ТО, при которой изделие нагревают до аустенитного состояния, на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше A_3 или A_{cm} с последующим охлаждением на воздухе.

$$T_{\text{н}} = A_3 + (30...50)^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{н}} = A_{cm} + (30...50)^{\circ}\text{C}$$

- В результате - эвтектоид получают более тонкого строения (тонкий перлит или сорбит),

Достоинства:

- уменьшаются внутренние напряжения,
- устраняются пороки, полученные в процессе предшествующей обработки.
- Твердость и прочность несколько выше чем после отжига.
- В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет грубую сетку вторичного цементита.
- Нормализацию - промежуточная операция, улучшающую структуру. Иногда окончательная обработка, например, при изготовлении сортового проката.
- Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига.
- Для среднеуглеродистых сталей нормализацию применяется вместо закалки с высоким отпуском.
- Достоинство-изделие подвергается меньшей деформации, исключаются трещины.
- Недостаток - механические свойства несколько ниже.

Назначение:

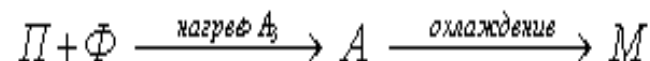
- повышения прочности и твердости,
- получения высокой пластичности, вязкости и высокой износостойкости,
- Инструментальные стали – для повышения твердости и износостойкости.

Основные параметры:

- температура нагрева и скорость охлаждения.
- По температуре нагрева различают виды закалки:
- – *полная*, с температурой нагрева на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше критической температуры A_3

$$T_{\text{н}} = A_3 + (30...50)^{\circ}\text{C}$$

- Применяют ее для доэвтектоидных сталей. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:



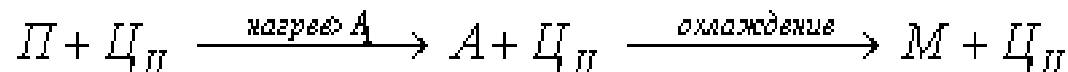
- Неполная закалка доэвтектоидных сталей недопустима, так как в структуре остается мягкий феррит. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:



- – *неполная* с температурой нагрева на 30...50 оС выше критической температуры A_1

$$T_{\text{н}} = A_1 + (30...50)^{\circ}C$$

- Применяется для заэвтектоидных сталей. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:

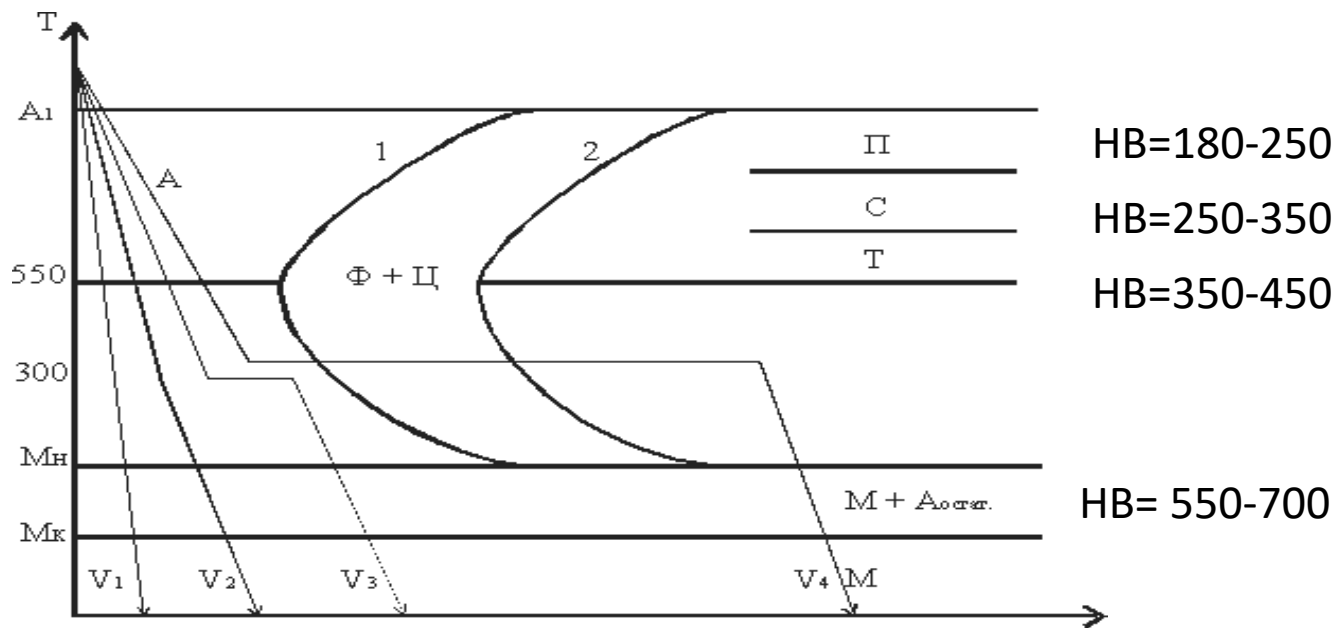


- После охлаждения в структуре остается вторичный цементит, который повышает твердость износостойкость режущего инструмента.

Л.4

Способы закалки

- В зависимости от формы изделия, марки стали и нужного комплекса свойств применяют различные способы охлаждения и режимы закалки
- На диаграмме представлено изотермическое превращение аустенита, при различных скоростях переохлаждения



Перлит, сорбит и троостит, образующиеся при диффузионном распаде Переохлажденного аустенита — феррито-цементитные структуры, имеющие пластинчатое строение, различающиеся степенью дисперсности

Л.4 **Превращение аустенита в мартенсит при высоких скоростях охлаждения**

- Данное превращение имеет место при высоких скоростях охлаждения, когда диффузионные процессы подавляются. Сопровождается **полиморфным превращением**
- При охлаждении стали со скоростью, большей критической ($V > V_k$), превращение начинается при температуре начала мартенситного превращения (M_n) и заканчивается при температуре окончания мартенситного превращения (M_k).
- В результате такого превращения аустенита образуется продукт закалки – **мартенсит**.
- Минимальная скорость охлаждения V_k , при которой весь аустенит переохлаждается до температуры начала превращения в M_n , называется **критической скоростью закалки**.
- Так как процесс диффузии не происходит, то весь углерод аустенита остается в решетке и располагается либо в центрах тетраэдров, либо в середине длинных ребер.
- **Мартенсит** – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в.
- При образовании мартенсита кубическая решетка сильно искажается, превращаясь в тетрагональную. Искажение решетки характеризуется **степенью тетрагональности**: $c/a > 1$. Степень тетрагональности прямо пропорциональна содержанию углерода в стали.

1.Механизм мартенситного превращения

- Механизм мартенситного превращения имеет бездиффузионный характер.
- Превращение осуществляется по сдвиговому механизму.
- В начале - непрерывный переход от решетки аустенита к решетке мартенсита (когерентная связь).
- При превращении ГЦК решетки в РЦК атомы смещаются на расстояния меньше межатомных, т.е. нет необходимости в самодиффузии атомов железа.

Л.4 Продолжение

• 2. Ориентированность кристаллов мартенсита.

- Кристаллы имеют форму пластин, сужающихся к концу, под микроскопом такая структура выглядит как игольчатая. Образуюсь мгновенно пластины растут либо до границы зерна аустенита, либо до дефекта. Следующие пластины расположены к первым под углами 60° или 120° , их размеры ограничены участками между первыми пластинами

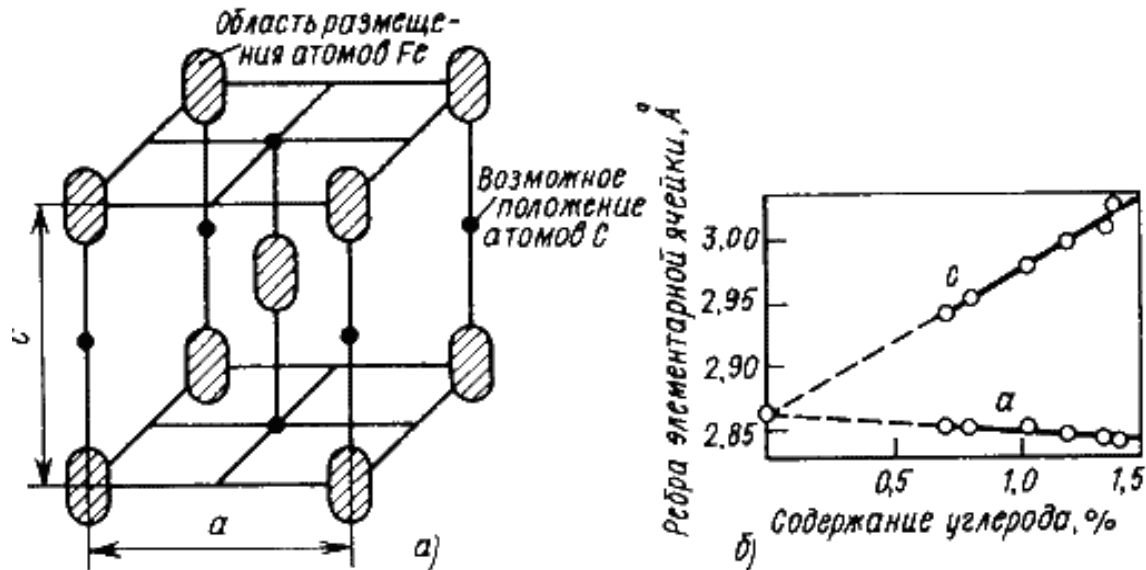


Рис. Кристаллическая решетка мартенсита (а); влияние содержания углерода на параметры a и c решетки мартенсита (б)

Л.4 продолжение

- В качестве охлаждающих сред при закалке используют воду при различных температурах, технические масла, растворы солей и щелочей, расплавленные металлы.
- При выборе охлаждающей среды необходимо учитывать **закаливаемость и прокаливаемость стали**.
- **Закаливаемость** – способность стали приобретать высокую твердость при закалке.
- Определяется содержанием углерода. Стали с содерж. С менее 0,20 % не закаливаются.
- **Прокаливаемость** – способность получать закаленный слой с мартенситной и троостомартенситной структурой, обладающей высокой твердостью, на определенную глубину.
- Чем меньше критическая скорость закалки, тем выше прокаливаемость. Укрупнение зерен повышает прокаливаемость.
- Нерастворимые частицы и неоднородность аустенита уменьшают прокаливаемость.

1. Закалка в одном охладителе (V1).

- Нагретую до нужной температуры деталь переносят в охладитель и полностью охлаждают. В качестве охлаждающей среды используют:
воду – для крупных изделий из углеродистых сталей;
масло – для небольших деталей простой формы
- Основной недостаток – значительные закалочные напряжения.

2. Закалка в двух сферах или прерывистая (V2).

- Нагретое изделие предварительно охлаждают в более резком охладителе (вода) до температуры ~ 300С и затем переносят в более мягкий охладитель (масло).
- Обеспечивает максимальное приближение к оптимальному режиму охлаждения.
- Применяется в основном для закалки инструментов.
- Недостаток: сложность определения момента переноса изделия из одной среды в другую.

Л.4 продолжение

3. Ступенчатая закалка (V3).

- Нагретое до требуемой температуры изделие помещают в охлаждающую среду, температура которой на $30 - 50^{\circ}\text{C}$ выше точки МН и выдерживают для выравнивания температуры по всему сечению.
- Время изотермической выдержки не превышает периода устойчивости аустенита при заданной температуре.
- В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли или металлы.
- После изотермической выдержки деталь охлаждают с невысокой скоростью.
- Способ используется для мелких и средних изделий.

4. Изотермическая закалка (V4).

- Отличается от ступенчатой закалки продолжительностью выдержки при температуре выше МН, в области промежуточного превращения.
- Изотермическая выдержка обеспечивает полное превращение переохлажденного аустенита в бейнит.
- При промежуточном превращении легированных сталей кроме бейнита в структуре сохраняется аустенит остаточный.
- Образовавшаяся структура характеризуется высокой прочностью, пластичностью и вязкостью.
- Снижается деформация из-за закалочных напряжений,
- Уменьшаются фазовые напряжения.
- В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли и щелочи.
- Применяются для легированных сталей.

Отпуск

- Отпуск является окончательной термической обработкой.
- Цель отпуска - повышение вязкости и пластичности, снижение твердости и уменьшение внутренних напряжений закаленных сталей.

Различают три вида отпуска:

- 1. **Низкий отпуск** с температурой нагрева $T_n = 150...300^{\circ}\text{C}$.
- В результате его проведения частично снимаются закалочные напряжения. Получают структуру – *мартенсит отпуска*.
- Проводят для инструментальных сталей; после закалки токами высокой частоты; после цементации.
- 2. **Средний отпуск** с температурой нагрева $T_n = 300...450^{\circ}\text{C}$.
- Получают структуру – *троостит отпуска*, сочетающую высокую твердость 40...45HRC с хорошей упругостью и вязкостью.
- Используется для изделий типа пружин, рессор.
- 3. **Высокий отпуск** с температурой нагрева $T_n = 450...650^{\circ}\text{C}$.
- Получают структуру, сочетающую достаточно высокую твердость и повышенную ударную вязкость (оптимальное сочетание свойств) – *сорбит отпуска*.
- Используется для деталей машин, испытывающих ударные нагрузки.
- Комплекс термической обработки, включающий закалку и высокий отпуск, называется *улучшением*.

Лекция 4

Химико-термическая обработка стали

- [Химико-термическая обработка стали](#)
- [Назначение и технология видов ХТО: цементации, азотирования, нитроцементации и диффузионной металлизации](#)
- [Цементация](#)
- [Цементация газовая и в твердом карбюризаторе.](#)
- [Структура цементированного слоя и термическая обработка после цементации](#)
- [Азотирование](#)
- [Цианирование и нитроцементация](#)
- [Диффузионная металлизация](#)

- **Химико-термическая обработка (ХТО)** – процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали.
- Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной, плазменной), в которой осуществляется нагрев.
- В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура,
- Основные параметры **ХТО** - температура нагрева и продолжительность выдержки.
- В основе любой разновидности **ХТО** лежат процессы диссоциации, адсорбции, диффузии.

Л.4

Химико-термическая обработка стали

- **Диссоциация** – получение насыщающего элемента в активированном атомарном состоянии в результате химических реакций, а также испарения.
- Например, $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ или $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$
- **Адсорбция** – захват поверхностью детали атомов насыщающего элемента,
- экзотермический процесс, приводящий к уменьшению свободной энергии.
- **Диффузия** – перемещение адсорбированных атомов вглубь изделия.
- Для осуществления процессов адсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения.
- ХТО является основным способом поверхностного упрочнения деталей.

Основные разновидности химико-термической обработки :

- **цементация** - насыщение поверхностного слоя углеродом;
- **азотирование** - насыщение поверхностного слоя азотом;
- **нитроцементация** или **цианирование** - насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом;
- **диффузионная металлизация** - насыщение поверхностного слоя различными металлами.

Л.4 Назначение и технология видов химико-термической обработки

Цементация

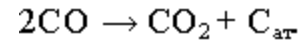
- **Цементация – ХТО**, заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры 900...950 оС.
- Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (до 0,25 %).
- Нагрев изделий осуществляют в среде, легко отдающей углерод. Поверхностный слой насыщают углеродом до требуемой глубины.
- Глубина цементации (h) – расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита ($h = 1...2$ мм).
- **Степень цементации** – среднее содержание углерода в поверхностном слое (обычно, не более 1,2 %).
- Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств цементита вторичного и к хрупкости слоя.
- На практике применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде).
- Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрываются медью (электролитическим способом) или глиняной смесью.

Цементация в твердом карбюризаторе.

- Почти готовые изделия, с припуском под шлифование, укладывают в металлические ящики.
- Пересыпают твердым карбюризатором. Используется древесный уголь с добавками углекислых солей $BaCO_3$, Na_2CO_3 в количестве 10...40 %.
- Закрытые ящики укладывают в печь, выдерживают при температуре 930...950 оС.

Л.4 Цементация, продолжение

- За счет кислорода воздуха происходит неполное сгорание угля с образованием окиси углерода (CO), которая разлагается с образованием атомарного углерода по реакции:



- Образующиеся атомы углерода адсорбируются и диффундируют вглубь металла.

Недостатками данного способа являются:

- значительные затраты времени (для цементации на глубину $0,1$ мм - 1 час);
- низкая производительность процесса;
- громоздкое оборудование;
- сложность автоматизации процесса.
- Способ применяется в мелкосерийном производстве.

Газовая цементация.

- Процесс проходит в печах с герметической камерой с газовым карбюризатором.
- Атмосфера углеродосодержащих газов включает азот, водород, водяные пары, а также окись углерода, метан и другие углеводороды, в виде активных газов.
- Глубина цементации определяется температурой нагрева и временем выдержки.

Преимущества способа:

- возможность получения заданной концентрации углерода в слое (регулировка содержания углерода, изменением соотношения составляющих атмосферу газов);
- сокращение длительности процесса за счет упрощения последующей термообработки;
- возможность полной механизации и автоматизации процесса.
- Способ применяется в серийном и массовом производстве.

Структура цементованного слоя

- На поверхности изделия образуется слой заэвтектоидной стали, состоящий из перлита и цементита.
- Вглубь, содержание углерода снижается и следующая зона - перлит.
- Следующая зона - феррит, количество зерен феррита вглубь увеличивается.
- Последняя зона - исходный состав.

Термическая обработка после цементации

- Свойства цементованной детали окончательно формирует последующая термообработка.
- Все изделия подвергают закалке с низким отпуском. Цементованное изделие приобретает высокую твердость и износостойкость, повышается предел выносливости при изгибе, при сохранении вязкой сердцевины.
- Комплекс термической обработки зависит от материала и назначения изделия.
- При газовой цементации изделия по окончании процесса подстуживают, а затем проводят закалку (не требуется повторный нагрев под закалку) .
- При особо высоких требованиях к деталям, применяют двойную закалку: **1-я закалка – нормализация с t 880...900oC** для исправления структуры сердцевины, **2-я закалка с t 760...780oC**, структура – мартенсит мелкоигльчатый..
- Завершающая операция ТО **низкий отпуск, с t 1 50...180oC**

Л.4

Азотирование

- **Азотирование** – ХТО, при которой поверхностные слои насыщаются азотом.
- При азотировании увеличиваются твердость, износостойкость, повышается коррозионная стойкость
- При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак NH_3 с определенной скоростью. При нагреве аммиак диссоциирует по реакции: $2NH_3 \rightarrow 2N + 3H_2$. Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует вглубь изделия.
- Глубина и поверхностная твердость азотированного слоя зависят от температуры, продолжительности процесса и от состава азотируемой стали.

В зависимости от условий работы деталей различают азотирование:

- для повышения поверхностной твердости и износостойкости. Процесс проводят при температуре $500...560^{\circ}C$ в течение $24...90$ часов. Содержание азота в слое составляет $10...12\%$, толщина слоя (h) – $0,3...0,6$ мм, твердость около 1000 HV. Охлаждение проводят вместе с печью в потоке аммиака.
- антикоррозионное азотирование - для легированных и для углеродистых сталей. Температура азотирования – $650...700^{\circ}C$, в течении – 10 часов. Слой толщиной $0,01...0,03$ мм, – твердый раствор на основе нитрида железа Fe_3N с гексагональной решеткой.
- Азотирование проводят нах изделиях с ТО –закалкой с высоким отпуском

- **Цианирование** – химико-термическая обработка, при которой поверхность насыщается одновременно углеродом и азотом.
- Осуществляется в ваннах с расплавленными цианистыми солями, например $NaCN$ с добавками солей $NaCl$, $BaCl$ и др. При окислении цианистого натрия образуется атомарный азот и окись углерода: $2NaCNO + O_2 \rightarrow Na_2CO_3 + CO + N_{ат}$
- Глубина слоя и концентрация в нем углерода и азота зависят от температуры процесса и его продолжительности.
- Цианированный слой обладает высокой твердостью 58...62 HRC и хорошо сопротивляется износу. Повышаются усталостная прочность и коррозионная стойкость.
- Продолжительности процесса 0,5...2 часа.
- Высокотемпературное цианирование – проводится при t 800...950оС, с преимущественным насыщением стали углеродом до 0,6...1,2 %, (жидкостная цементация). Содержание азота в слое 0,2...0,6 %, толщина слоя 0,15...2 мм. После цианирования изделия подвергаются закалке и низкому отпуску.
- Низкотемпературное цианирование – проводится при t 540...600оС, с преимущественным насыщением стали азотом. Проводится для инструментов из быстрорежущих, высокохромистых сталей.
- Является окончательной обработкой.
- Основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей

- **Нитроцементация** – газовое цианирование, осуществляется в газовых смесях из цементующего газа и диссоциированного аммиака.
- Состав газа, температура процесса определяют соотношение углерода и азота в цианированном слое. Глубина слоя зависит от температуры, времени выдержки.
- Высокотемпературная нитроцементация проводится при t 830...950 $^{\circ}$ C, для деталей из углеродистых и малолегированных сталей при повышенном содержании аммиака.
- Завершающая ТО - закалка с низким отпуском. Твердость - 56...62 HRC..
- Низкотемпературной нитроцементации подвергают после ТО -закалки и отпуска инструмент из быстрорежущей стали.
- Температура процесса 530...570 $^{\circ}$ C, в течение 1,5...3 часов.
- Толщина слоя 0,02...0,004 мм с твердостью 900...1200 HV.
- Нитроцементация - безопасный процесс, имеет низкую стоимость.

Диффузионная металлизация

- Диффузионная металлизация – ХТО, при которой поверхность стальных изделий насыщается различными элементами: алюминием, хромом, кремнием, бором и др.
- При насыщении хромом процесс называют хромированием, алюминием – алитированием, кремнием – силицированием, бором – борированием.
- Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, газообразных и жидких средах.
- При твердой диффузионной металлизации металлизатором является ферросплав с добавлением хлористого аммония (NH_4Cl).
- Реакция ферросплава с HCl или Cl_2 приводит к соединениям хлора с металлом ($AlCl_3$, $CrCl_2$, $SiCl_4$), которые при контакте диссоциируют на свободные атомы.

- **Жидкая диффузионная металлизация** проводится погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).
- **Газовая диффузионная металлизация** проводится в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.
- Диффузия металлов протекает очень медленно, так как образуются растворы замещения, поэтому при одинаковых температурах диффузионные слои в десятки и сотни раз тоньше, чем при цементации.
- **Диффузионная металлизация** – процесс дорогостоящий, осуществляется при высоких температурах ($1000...1200^{\circ}\text{C}$) в течение длительного времени.
- Одним из основных свойств металлизированных поверхностей является жаростойкость, поэтому жаростойкие детали для рабочих температур $1000...1200^{\circ}\text{C}$ изготавливают из простых углеродистых сталей с последующим алитированием, хромированием или силицированием.
- Исключительно высокой твердостью (2000 HV) и высоким сопротивлением износу из-за образования боридов железа (FeB , FeB_2) характеризуются борированные слои, но эти слои очень хрупкие.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЧУГУНОВ. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЫДЕЛЕНИЙ ГРАФИТА НА СВОЙСТВА ЧУГУНА.

- Сплав железа с углеродом ($>2,14\%$ C) называют чугуном.
- Присутствие эвтектики в структуре чугуна обуславливает его использование в качестве литейного сплава.
- Углерод в чугуне может находиться в виде цементита или графита, или одновременно в двух фазах
- Цементит придает излому специфический светлый блеск.
- Поэтому чугун, в котором весь углерод находится в виде цементита, называют белым.
- Графит придает излому чугуна серый цвет, поэтому чугун называют серым.
- В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие чугуны: серый, высокопрочный и ковкий.
- 1. СЕРЫЙ И БЕЛЫЙ ЧУГУНЫ

Серый чугун (технический) представляет собой, по существу, сплав Fe—Si—C, содержащий в качестве постоянных примесей Mn, P и S.

В структуре серых чугунов большая часть или весь углерод находится в виде графита. Характерная особенность структуры серых чугунов, определяющая многие его свойства, заключается в том, что графит имеет в поле зрения микрошлифа форму пластинок.

В зависимости от содержания углерода, связанного в цементит, различают:

1. Белый чугун
2. Половинчатый чугун
3. Перлитный серый чугун
4. Ферритно-перлитный серый чугун
5. Ферритный серый чугун

- 1. **Белый чугун** в котором весь углерод находится в виде цементита Fe_3C . Структура такого чугуна — перлит, ледебурит и цементит.
- 2. **Половинчатый чугун**, большая часть углерода ($>0,8\%$) находится в виде Fe_3C . Структура такого чугуна — перлит, ледебурит и пластинчатый графит.
- 3. **Перлитный серый чугун** структура чугуна— перлит и пластинчатый графит. В этом чугуне $0,7—0,8\%$ С находится в виде Fe_3C , входящего в состав перлита.;
- 4. **Ферритно-перлитный серый чугун**. Структура чугуна - перлит, феррит и пластинчатый графит. В этом чугуне в зависимости от степени распада эвтектоидного цементита в связанном состоянии находится от $0,7$ до $0,1\%$ С
- 5. **Ферритный серый чугун**. Структура — феррит и пластинчатый графит. В этом случае весь углерод находится в виде графита.

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЧУГУН С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

- **Высокопрочными** называют чугуны с шаровидным графитом(ЧШГ), который образуется в литой структуре в процессе кристаллизации. **Шаровидный графит**, имеющий минимальную поверхность при данном объеме, значительно меньше ослабляет металлическую основу, чем пластинчатый графит, и не является активным концентратором напряжений.
- Для получения шаровидного графита чугун модифицируют, или путем обработки жидкого металла магнием (0,03—0,07 %) или введением 8—10 % магниевых лигатур с никелем или ферросилицием.
- Под действием магния графит в процессе кристаллизации принимает не пластинчатую, а шаровидную форму.
- **Чугуны ЧШГ** имеют более высокие механические свойства, аналогичными литой углеродистой стали, сохраняя хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость и т. д.
- Обычный состав чугуна: 3,2—3,6 % С

- Ковкий чугун получают длительным нагревом при высоких температурах (отжигом) отливок из белого чугуна.
- В результате отжига образуется графит хлопьевидной формы.
- Такой графит по сравнению с пластинчатым меньше снижает прочность и пластичность металлической основы структуры чугуна.
- Чугун имеет пониженное содержание углерода и кремния