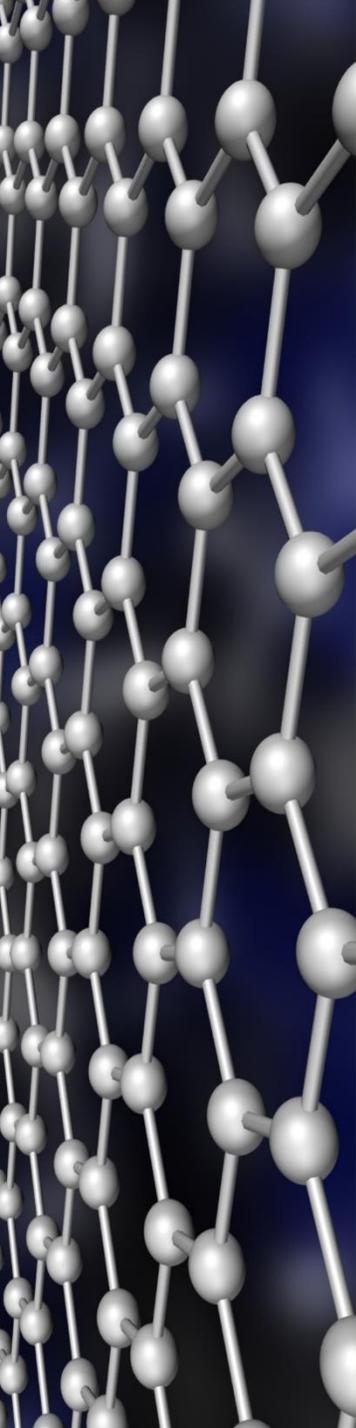


МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

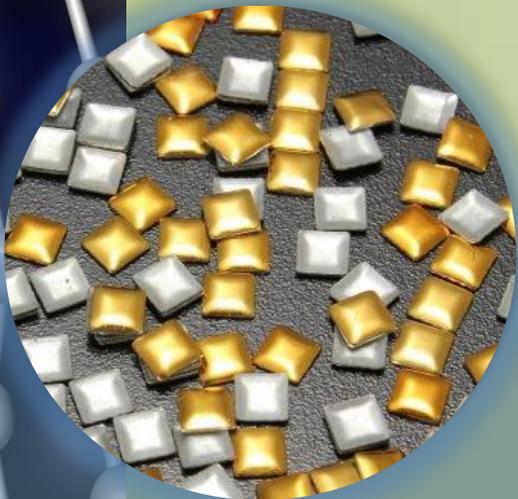
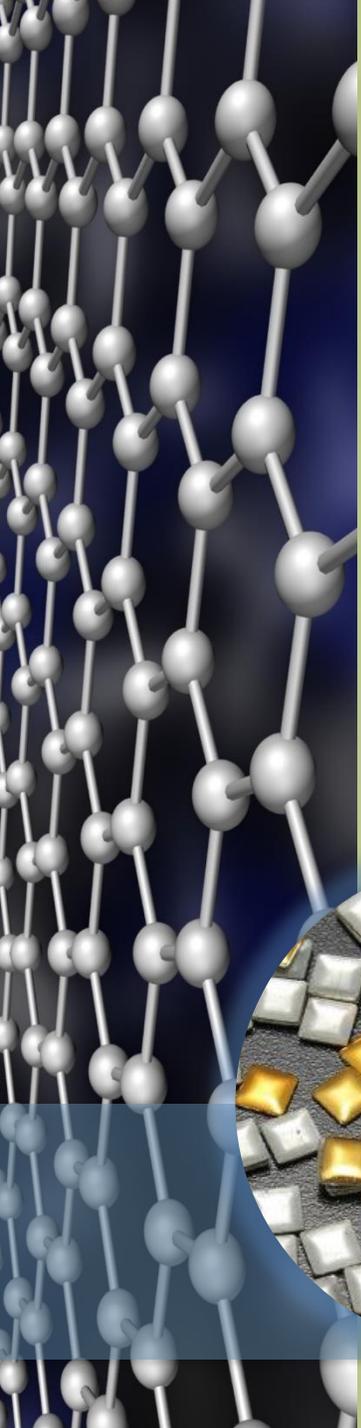
Лекция 2. Строение и свойства металлов

КЛИМЕНОВ Василий Александрович,
профессор ИШНПТ ТПУ



Содержание курса

- › Металлы. Сплавы. Свойства
- › Кристаллическое строение. Типы кристаллических решёток и дефекты кристаллического строения
- › Кристаллизация. Гомогенная и гетерогенная кристаллизация. Механизмы процессов
- › Строение слитка. Монокристаллы. Аморфные сплавы
- › Основы теории двойных сплавов. Диаграммы состояния
- › Железоуглеродистые сплавы. Диаграмма железо–углерод. Описание. Особенности
- › Зависимость структуры металлов от скорости охлаждения. Закон Холла-Петча



Металлы. Сплавы. Свойства

Металлы

- › **Металлы** (от лат. *metallum* - шахта, рудник) - группа элементов в виде простых веществ, обладающих *металлическими свойствами*:
 - высокие тепло- и электропроводность
 - положительный температурный коэффициент сопротивления
 - высокая пластичность
 - ковкость
 - металлический блеск
- › В твердом состоянии имеет кристаллическое строение на атомарном уровне, а потому и высокие прочностные показатели

Сплавы

- › **Сплав** - макроскопически однородный металлический материал, состоящий из смеси двух или более химических элементов с преобладанием металлических компонентов.
- › Состоят из основы (одного или нескольких металлов), малых добавок специально вводимых в сплав легирующих и модифицирующих элементов, а также из неудалённых примесей (природных, технологических и случайных).
- › Не являются механической смесью компонентов, при сплавлении образуют системы в составе сплава:
 - твёрдые растворы
 - химические соединения
 - смеси фаз (эвтектики)
 - продукты превращений
 - просто химические элементы C, Si, Pb и др.
- › Способы получения
 - сплавление
 - спекание (порошковая металлургия)
 - кристаллизация из паров
 - плазменное напыление

Классификация



Сталь и чугун – сплавы железа с углеродом

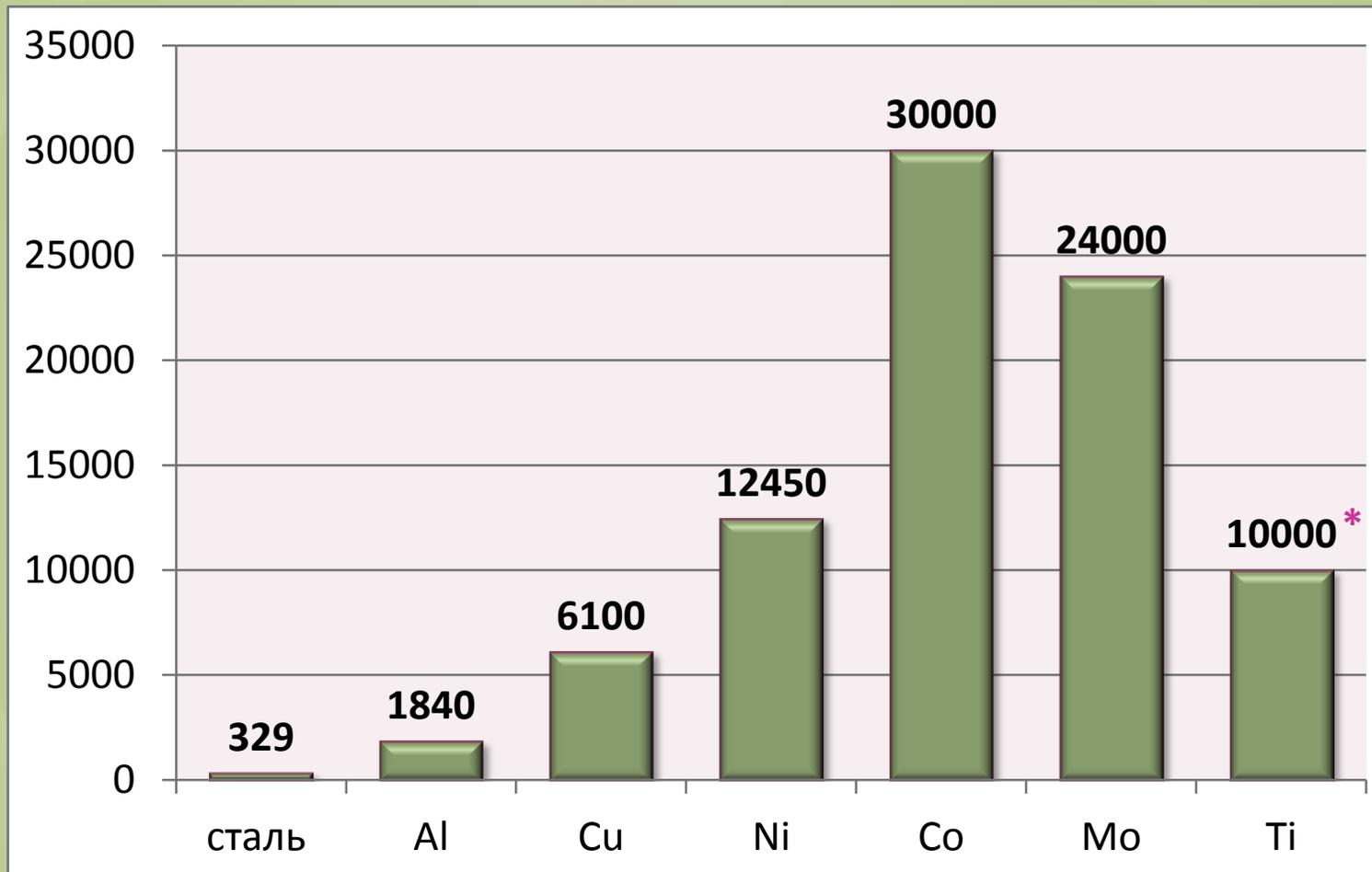


Свойства

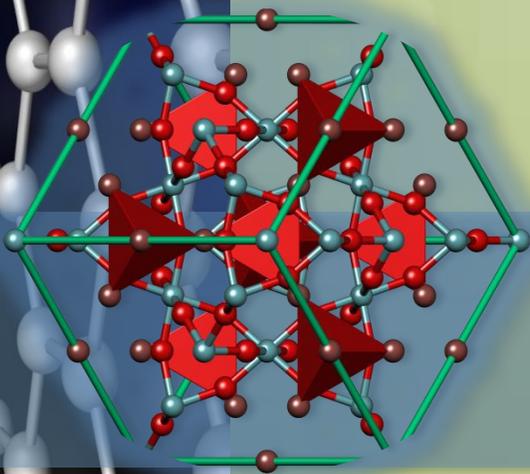
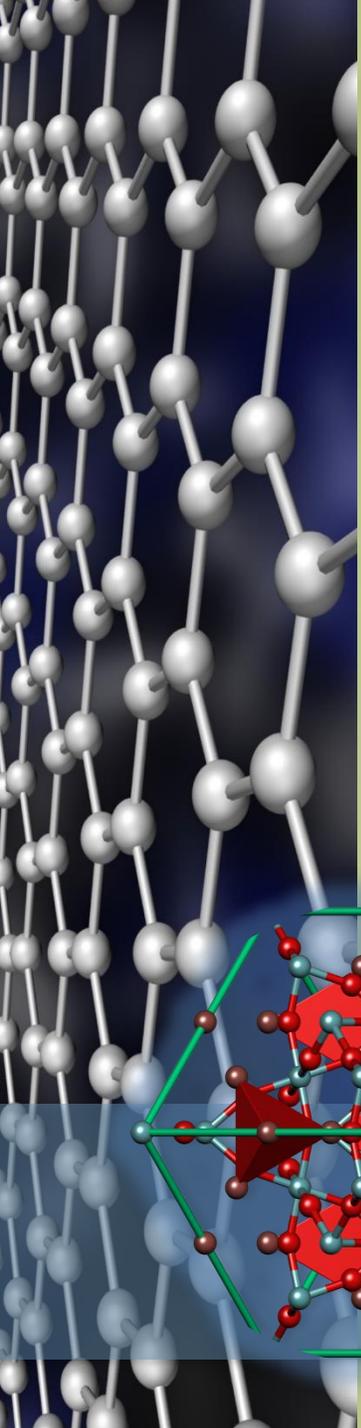
Металл	Плотн	Упругость (М. Юнга)	T плав	Теплопроводн	Коэф расш	Пластичн	Трещиност	Предел текуч	Предел прочн
	(Мг м ⁻³)	(ГПа)	(К)	(Вт м ⁻¹ К ⁻¹)	(МК ⁻¹)		(МПа м ^{1/2})	(МПа)	(МПа)
Железо	7.9	211	1809	78	12	0.3	80	50	200
Мягкая сталь	7.9	210	1765	60	12	0.21	140	220	430
Твердая сталь	7.8	210	1570	40	12	0.1–0.2	20–50	350–1600	650–2000
Низколегир ст	7.8	203	1750	40	12	0.1–0.2	50–170	290–1600	420–2000
Высоколегир ст	7.8	215	1680	12–30	10–18	0.1–0.5	50–170	170–1600	460–1700
Чугун	7.4	152	1403			0–0.18	6–20	50–400	10–800
Медь	8.9	130	1356	397	17	0.5–0.9	>100	75	220
Латунь	8.4	105	1190	121	20	0.5	30–100	200	350
Бронза	8.4	120	1120	85	19	0.5	30–100	200	350
Никель	8.9	214	1728	89	13	0.4	>100	60	300
Монель	8.9	185	1600	22	14	0.5	>100	340	680
Суперсплав	7.9	214	1550	11	12	0.2	>100	800	1300
Алюминий	2.7	71	933	240	24	0.1–0.5	45	25–125	75–135
Литой сплав	2.7	71	860	140	20	0.01–0.15	5–30	65–350	130–400
Титан	4.5	120	1940	22	9	0.25		170	240
Ti–6 Al–4 V	4.4	115	1920	6	8	0.1–0.2	50–80	800–900	900–1000
Цинк	7.1	105	693	120	31	0.4			120

Стоимость

Долл/т



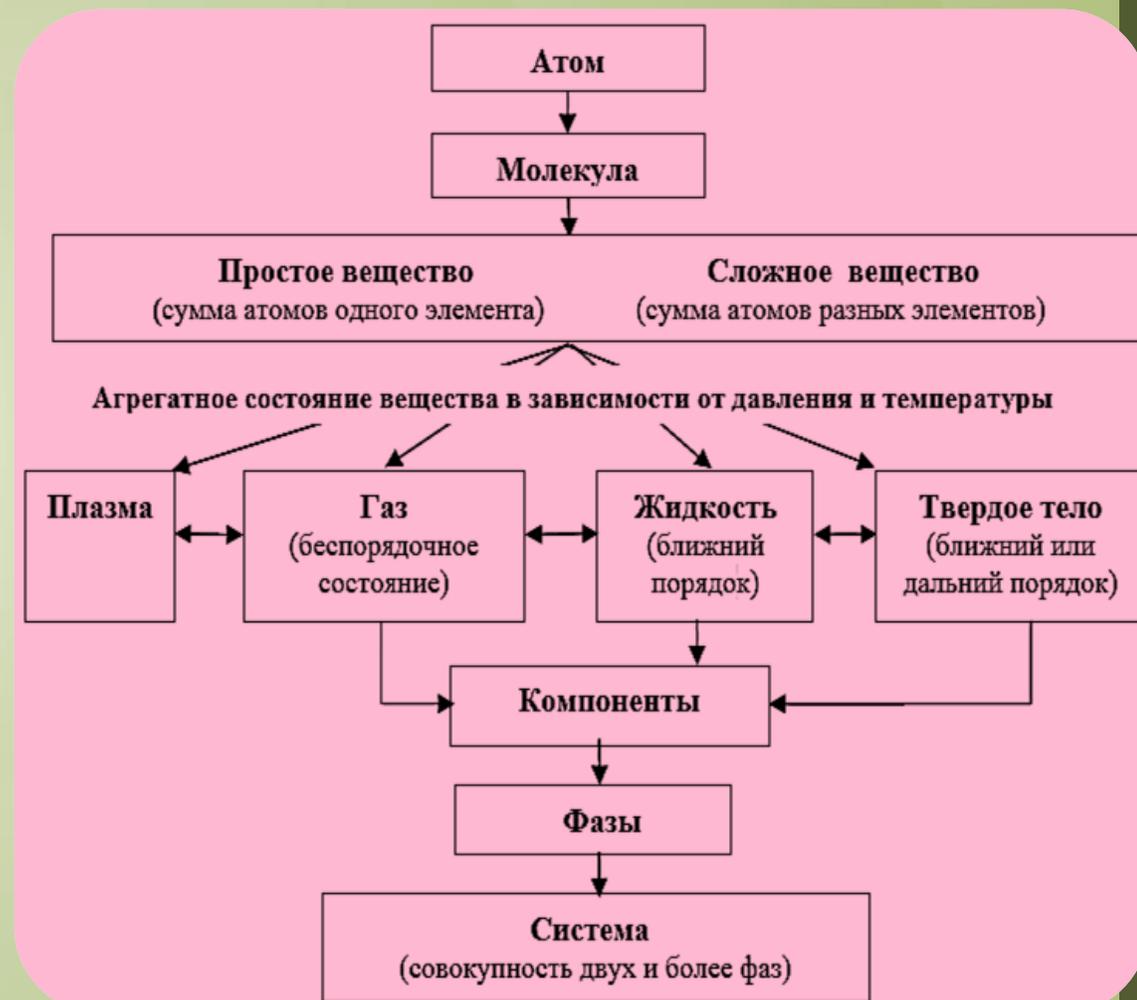
* Диапазон цен за титан в течение года колеблется от **6000** до **16000** долларов за тонну



Кристаллическое строение

Схема рождения материала

- › Любой материал – сложная физико-химическая система
- › **Система** – группа тел, выделяемых для наблюдения и изучения (металлы, сплавы)
- › **Компоненты** – число веществ, образующих систему (чистые вещества, химические соединения)
- › **Фаза** – однородная часть системы, отделенная от других частей поверхностью раздела
- › **Гомогенная** система состоит из 1 фазы
гетерогенная из нескольких

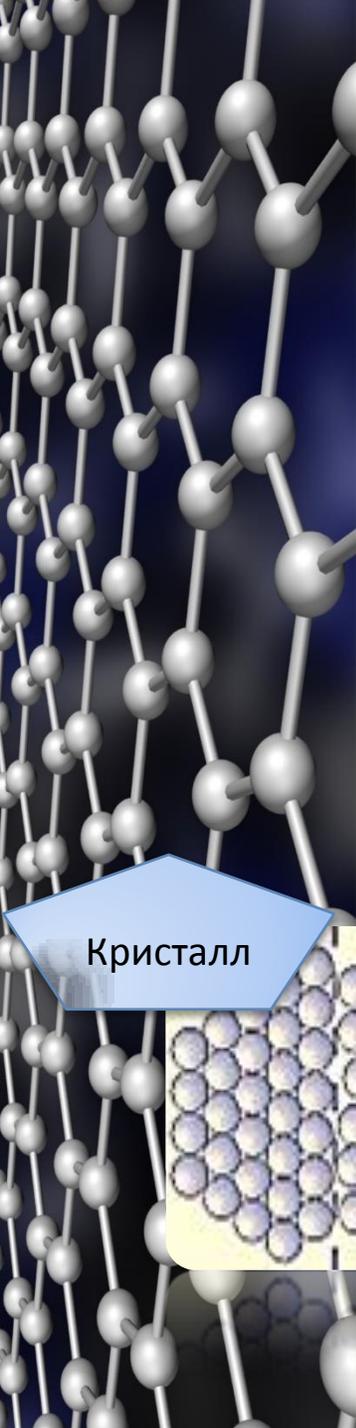


(совокупность двух и более фаз)
Система

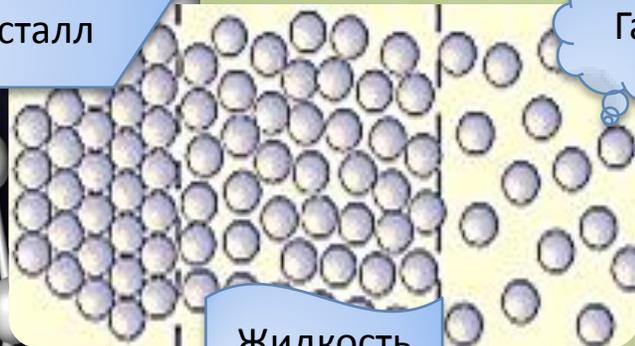
Состояния вещества

- › **Твердая фаза** (аморфные и кристаллические тела)
 - стабильность формы и размеров
 - упругость
- › **Аморфная фаза** (стекло, смола)
 - высокая вязкость
 - без определенной t плавления или кристаллизации
 - при нагревании размягчается до жидкого состояния с плавным снижением вязкости
- › **Жидкая фаза** (расплав)
 - не сохраняет форму
 - неизменный объем

- › **Расположение** атомов (молекул)
 - **ближний порядок** - в жидкостях, твердых аморфных телах
 - **дальний порядок** - в кристаллах
- › **Вязкость** отличает твердые аморфные тела и жидкости



Кристалл



Газ

Жидкость

- › **Идеальный кристалл** - модель кристалла совершенной структуры
 - упругие и оптические свойства
 - электро- и теплопроводность (электрон-ионное взаимодействие)
- › **Кристалл идеально несовершенный** - модель дефектной структуры
 - упрочнение материалов при обработке давлением
 - структурные изменения при термической обработке

Межатомное взаимодействие, типы связей

- › Движущие силы объединения атомов/молекул вещества (твердого, жидкого, газообразного) – силы **взаимного притяжения**. Зная характер взаимодействия между атомами, можно прогнозировать свойства материалов
- › Между атомами действуют **гравитационные, магнитные и электрические силы**. Роль магнитных взаимодействий мала ($\sim 10^{-6}$ эВ); гравитационными силами можно пренебречь ($\sim 10^{-32}$ эВ). Электростатическая энергия взаимодействия элементарных электрических зарядов, находящихся на расстоянии **0,2–0,3 нм**, составляет

$$U = e^2 / r = -(5 - 7) \text{ эВ}$$

Это значение соответствует порядку величины энергии связи атомов в кристаллах, обусловленной электрическим взаимодействием. Связь осуществляется валентными электронами атомов

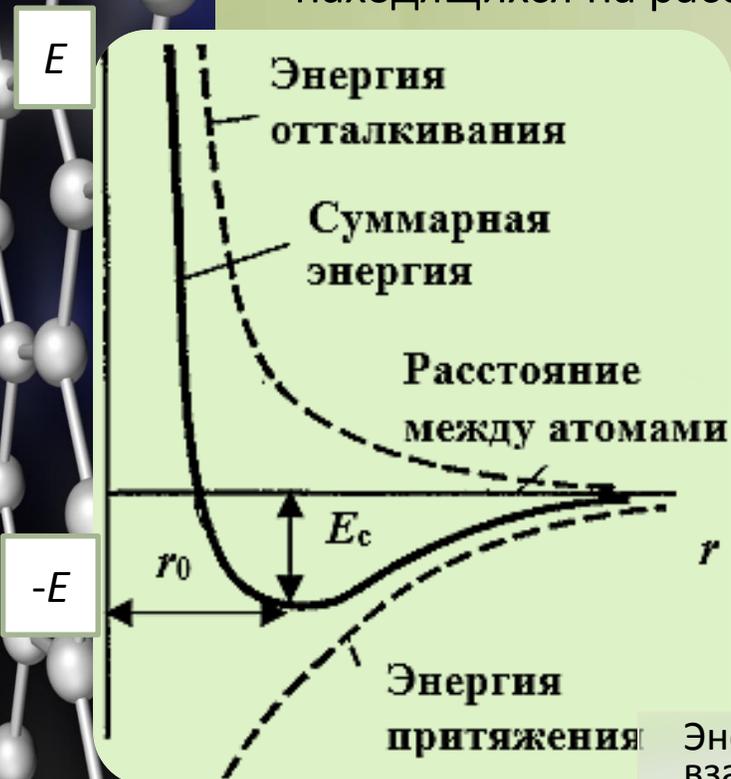
- › Тип химической связи определяется разностью **электроотрицательности** элементов

$$\Delta\chi = \chi_A - \chi_B \quad \text{где } \chi_A \text{ и } \chi_B \text{ – электроотрицательность атомов } A \text{ и } B$$

- › **Ионная связь** - при полном или частичном, **ковалентная** – при частичном обмене валентными электронами
- › **Металлическая связь** – ковалентная. При этом обобществляется множество электронов. Силы Ван-дер-Ваальса возникают без обмена зарядами

Ковалентная (гомеополярная)	Металлическая
Ионная (гетерополярная)	Молекулярная

Энергия межатомного взаимодействия



Кристаллическое строение

› **Огюст Бравэ:** кристаллические решетки построены из закономерно расположенных в пространстве точек (узлов), где расположены атомы (1848)



- › Точки периодически повторяются в определенных направлениях через равные промежутки – **трансляции** и образуют **пространственную решетку**
- › **Элементарная ячейка** – параллелепипед, построенный на **3** элементарных некопланарных трансляциях
- › **Параметры ячейки**
 - a, b, c – длины векторов, **периоды решетки** (для металлов **0,1–0,7** нм) расстояние между центрами ближайших атомов
 - α, β, γ – углы между векторами, лежащие против осей x, y, z
- › **Координационное число** – количество атомов на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома
- › **Базис (n)** – число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку
- › **Плотность упаковки (q)** – отношение занятого атомами объема к объему ячейки

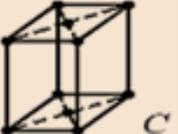
Кристаллическая структура

$$q = \frac{V_{ат}}{V_{яч}} = \frac{n \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{a^3},$$

где R – радиус атома; a – параметр решетки

- › **Кристаллическая решетка** - математическая абстракция
- › **Кристаллическая структура** - с каждой точкой решетки одинаковым образом связан базис:
решетка + базис = кристаллическая структура

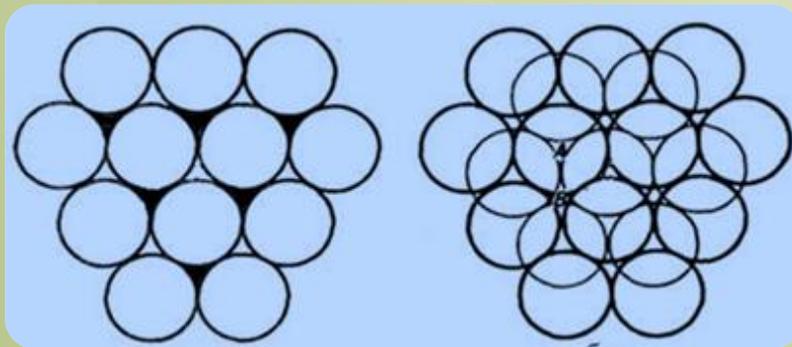
Типы решеток

Сингония	Примитивная	Базоцентрирированная	Объемно-центририрован.	Гранецентрирированная	Характеристика
Триклинная					$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Моноклинная					$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$
Ромбическая					$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Тригональная (ромбоэдрическая)					$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Тетрагональная					$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Гексагональная					$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Кубическая					$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

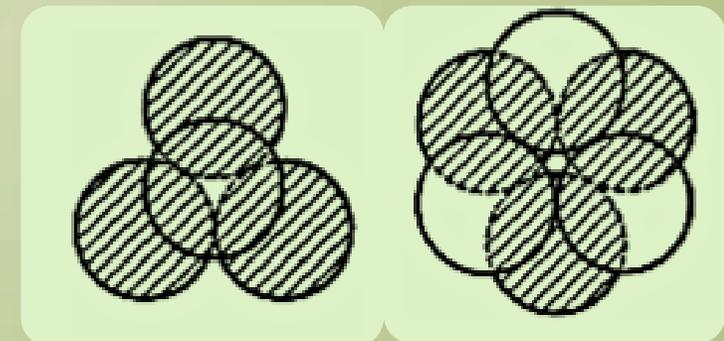
Решетки Бравэ (14).
Сингония – классификация кристаллографических групп симметрии, кристаллов и кристаллических решёток

Плотнейшие упаковки

- › Для устойчивости кристаллической структуры требуется условие минимума ее потенциальной энергии. Каждый атом должен взаимодействовать с возможно большим числом других атомов, т. е. **координационное число** должно быть максимальным.
- › Это условие обеспечивает **плотнейшая упаковка**, характерная для металлических и ионных структур, кристаллов инертных газов. Связи в ней не направлены, атомы/ионы считают **сферическими**. Шары касаются друг друга, заполняя большую часть пространства



Плотная упаковка шаров в одном и двух слоях



Тетра- и октаэдрические пустоты

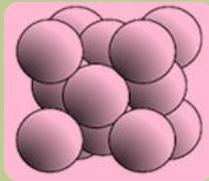
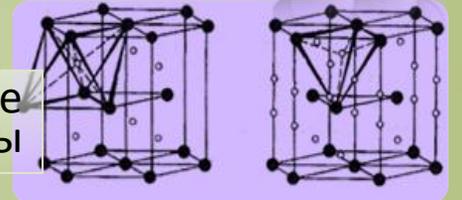
Плотнейшие упаковки

- › **Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ).** Атомы находятся в вершинах и центрах шестиугольников и 3 атома в средней плоскости призмы. ГПУ решетку имеют металлы: α -Ti, Zn, Zr, Mg, Cd, Be

- плотность упаковки **0,74**
- координационное число **12**
- базис **6**

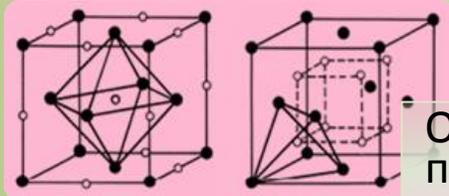


Окта- и тетраэдрические пустоты



- › **Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК).** Атомы находятся в вершинах куба и центрах каждой грани. ГЦК решетку имеют металлы: Fe $_{\gamma}$, Cu, Al, Ni, Au, Ag, Pb

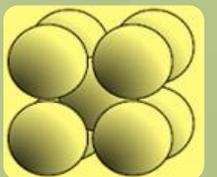
- плотность упаковки **0,74**
- координационное число **12**
- базис **4**



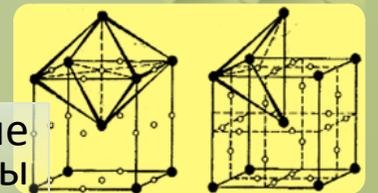
Окта- и тетраэдрические пустоты

- › **Объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК).** Атомы находятся в вершинах и центре куба на пересечении главных диагоналей. ОЦК решетку имеют металлы: Fe $_{\alpha}$, Cr, W, V, Mo, K, Na, Li

- плотность упаковки **0,68**
- координационное число **8**
- базис **2**



Окта- и тетраэдрические пустоты



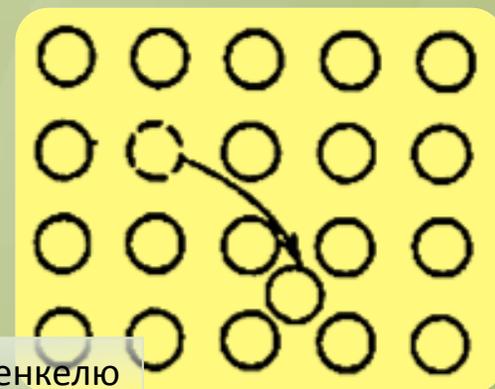
Полиморфизм

- › **Полиморфизм** (от греч. *polimorphos* – многообразный). Предложено М. Клапротом в **1798** г. При изменении температуры или давления некоторые вещества переходят в различные кристаллические модификации при одном и том же химическом составе
- › Металлы имеют 2-3 полиморфные модификации; химические соединения – значительно больше

Металл	Аллотропная форма	Интервал температур, °С	Кристаллическая решетка
Fe	α	< 911	ОЦК
	γ	911 – 1392	ГЦК
	δ	1392 – 1539	ОЦК
Ti	α	< 882	ГПУ
	β	882 – 1671	ОЦК
Sn	α	< 13	Решетка алмаза
	β	13 – 232	Тетрагональная
Co	α	< 460	ГПУ
	β	460 – 1480	ГЦК
U	α	< 668	Орторомбическая
	β	668 – 720	Тетрагональная
	γ	720 – 1132	ОЦК

Дефекты кристаллической структуры

- › **Структурные дефекты** - нарушения идеальной трансляционной симметрии кристалла. Оказывают существенное влияние на свойства твердых тел
- › **Вакансия** – отсутствие атома/иона в узле решетки
- › **Дефект по Шоттки** - вакансия, возникающая при уходе атома из узла на какую-либо границу внутри кристалла
- › **Механизмы образования точечных дефектов**
 - при выращивании кристалла в неравновесных условиях
 - при нагревании
 - при облучении радиацией
 - при пластической деформации или термической обработке

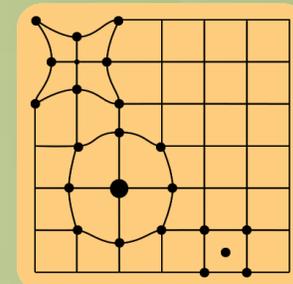


Образование дефекта по Френкелю

Дефекты кристаллической структуры

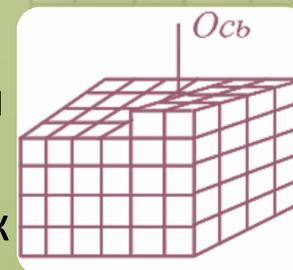
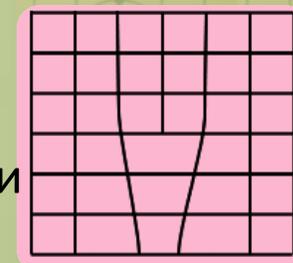
› Точечные (вакансии)

- › **Межузельные атомы** (дефекты Франкля) обусловлены переходом атома из узла решетки в междоузлие. В нем возникает искажение кристаллической решетки (до **20 %** от межатомного расстояния)



› Линейные (дислокации)

- › **Краевая дислокация** - локализованное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней «лишней» атомной **полуплоскости** или **экстраплоскости**, перпендикулярной плоскости чертежа
- › **Винтовая дислокация** параллельна направлению сдвига. Кристалл состоит из одной атомной плоскости, закрученной в виде винтовой поверхности
- › **Плотность дислокаций** ρ - количественная характеристика дислокационной структуры (суммарная длина дислокаций в **1 см³** материала)
- › Создание в структуре материала очень большого числа **дислокаций** ведет к его **упрочнению**



Кривая Одингга-Бочвара

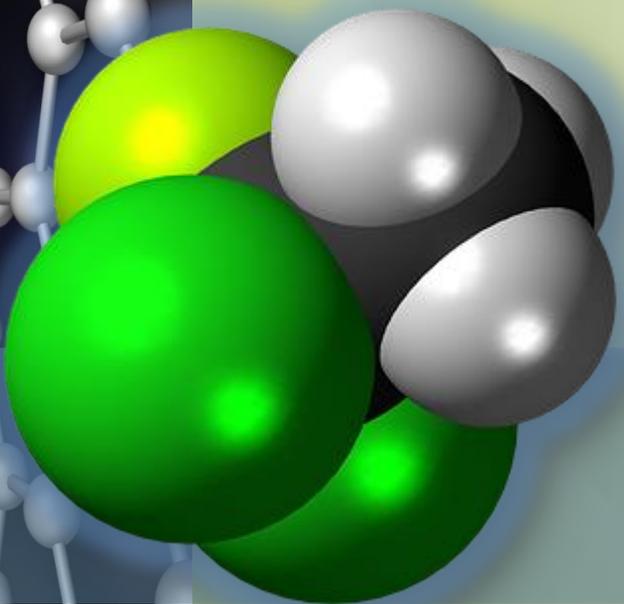
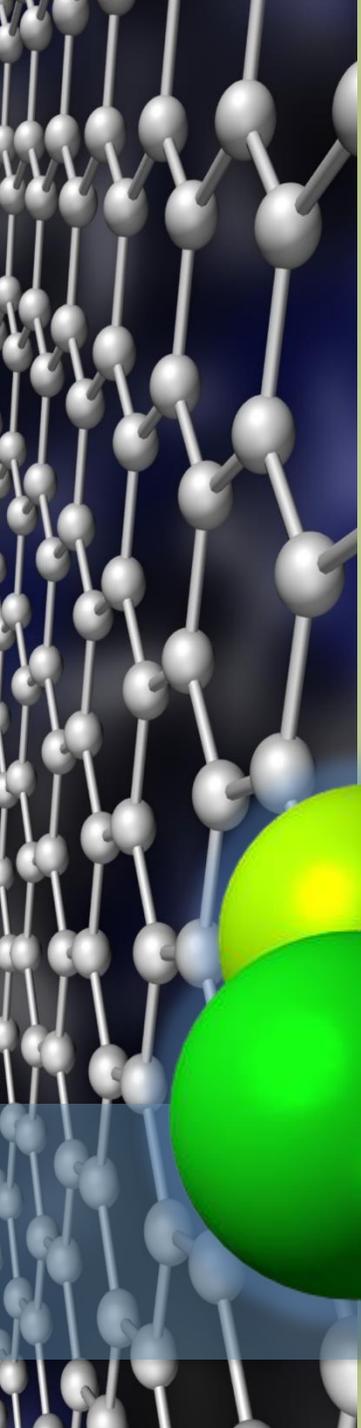
Пути упрочнения материала

- › Создание материала с **идеальной** кристаллической решеткой
- › **Дефектами**
 - пластическая деформация
 - термообработка
- › **Торможением дислокаций**
 - точечными дефектами решетки (упрочнение твердым раствором)
 - дисперсными частицами
 - границами зерен, фрагментов и блоков
- › Увеличением **количества дислокаций**

МПа



Влияние дефектов на прочность металла
3 – 10^2 – 10^3 см⁻²; 4 – 10^6 – 10^8 см⁻²; 5 – 10^{12} см⁻²

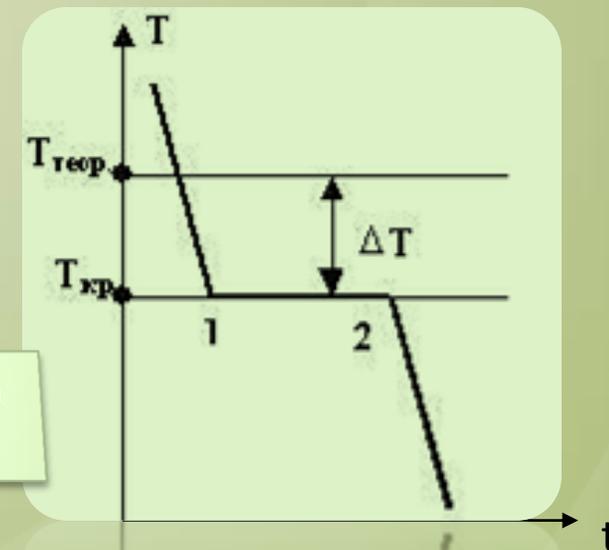


Кристаллизация

Кристаллизация

- › **Кристаллизация** - процесс перехода из жидкого состояния в твёрдое при определённых температуре и давлении. При кристаллизации выделяется теплота
- › **Плавление** - обратный процесс. Затрачивается теплота для перевода вещества из твёрдого состояния в жидкое без изменения температуры. Эта теплота называется **скрытой теплотой плавления**
- › **Кристаллизация металлов** - процесс образования кристаллической решётки в жидкой фазе и рост кристаллов из образовавшихся центров
- › Зарождение кристаллов
 - **гомогенное** (в объеме жидкой фазы)
 - **гетерогенное** (на поверхности твердых частиц, неметаллических включений, стенок изложниц)

› **Процессы** кристаллизации изучаются с помощью кривой кристаллизации



Гомогенная кристаллизация

- › Состояние системы характеризуется **внутренней** энергией, которая складывается из энергии движения атомов/ионов, электронов, энергии упругих искажений кристаллической решетки. Часть энергии, которая при изотермических условиях может быть превращена в работу, называется **свободной**:

$$F = U - T \cdot S$$

где F – свободная энергия, U – полная внутренняя энергия, T – температура; S – энтропия



Зависимость свободной энергии от температуры

- › Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое возможен, если оно обладает меньшим запасом свободной энергии

Гомогенная кристаллизация

- › Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое возможен, если оно обладает меньшим запасом свободной энергии
- › При **равновесной** темп. кристаллизации T_s свободные энергии жидкой и твердой фаз одинаковы. Обе фазы существуют одновременно, энергия не меняется:

$$\Delta F_s = F_{\text{ж}} - F_{\text{т}} = 0$$

- › Процесс кристаллизации термодинамически выгоден и сопровождается уменьшением свободной энергии, когда жидкая фаза охлаждена ниже T_s до **практической** температуры кристаллизации $T_{\text{кр}}$. Переход из жидкого состояния в твердое сопровождается выделением энергии:

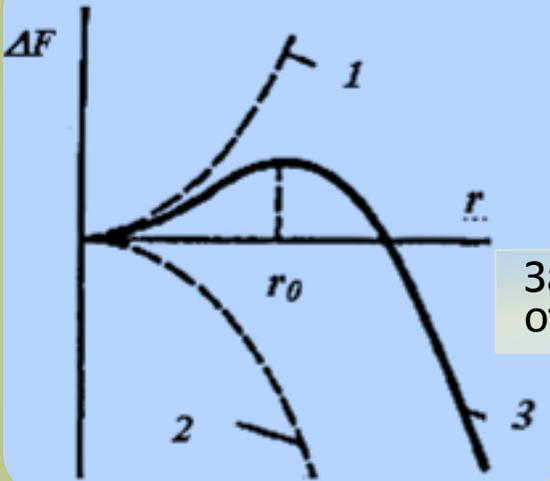
$$\Delta F_{\text{кр}} = F_{\text{ж}} - F_{\text{т}} > 0$$

- › Охлаждение расплава ниже равновесной температуры называют **переохлаждением** и характеризуют **степенью переохлаждения**:

$$\Delta T_1 = T_s - T_{\text{кр}}$$

Механизм кристаллизации

- › Теория зародышеобразования **Гиббса-Фольмера**. Изменение свободной энергии зародыша определяется суммой объемной и поверхностной энергий:



Зависимость свободной энергии от размера зародыша

$$\Delta F = -\frac{4\pi r^3 \Delta f}{3V_M} + 4\pi r^2 \sigma$$

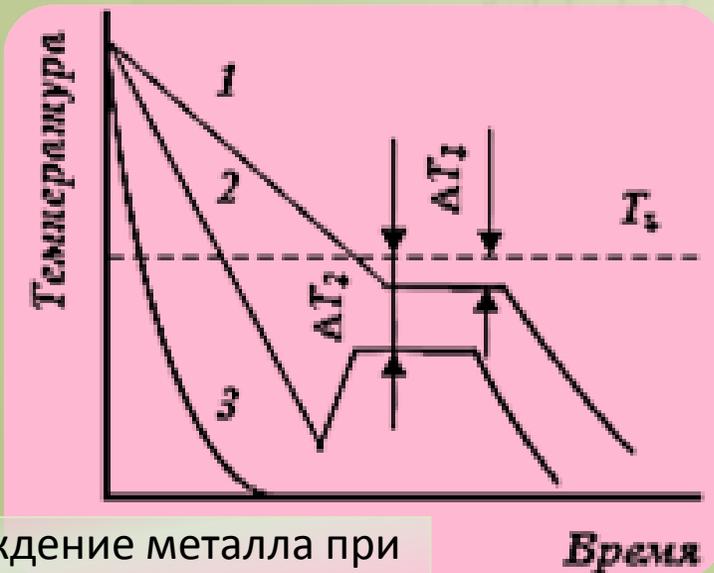
- › Увеличение размера зародыша приводит к росту свободной энергии, а при некотором значении r_0 – к ее уменьшению. Минимальный размер способного к росту зародыша – **критический**, зародыш – **устойчивый**

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial r} = 0$$

при $r = r_0$ функция проходит через максимум, то критический размер зародыша

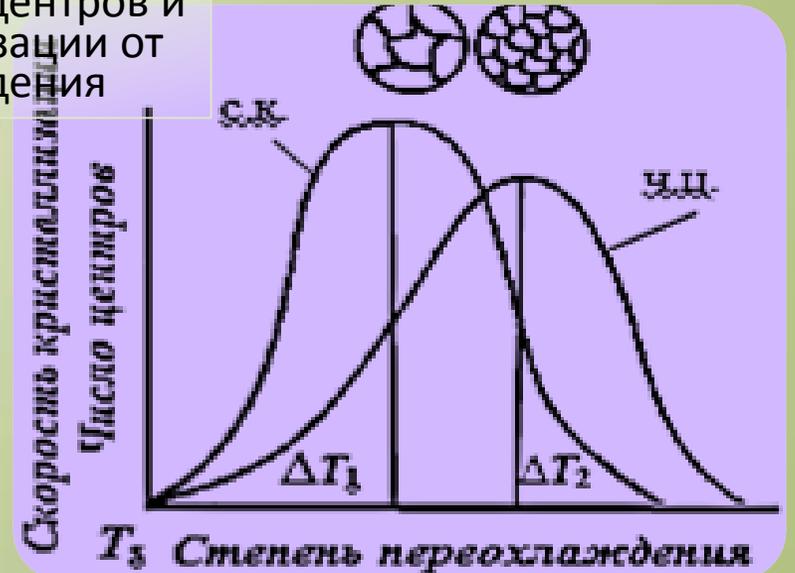
Механизм кристаллизации

- › Зародыши образуются независимо друг от друга, имеют правильную форму. При срастании с другими кристаллами форма нарушается, кристаллы называют **зернами**. Их рост продолжается в направлении оставшихся участков жидкого металла



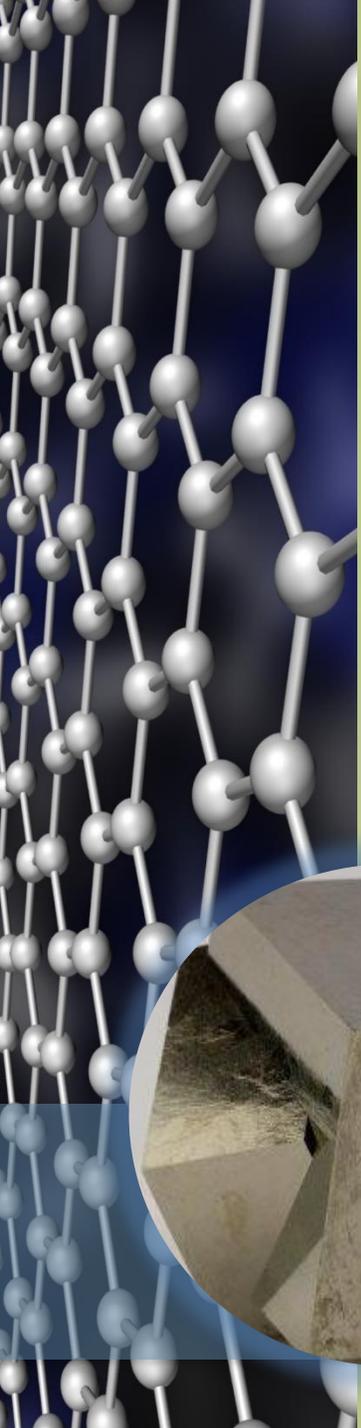
Охлаждение металла при кристаллизации

Зависимость числа центров и скорости кристаллизации от степени переохлаждения



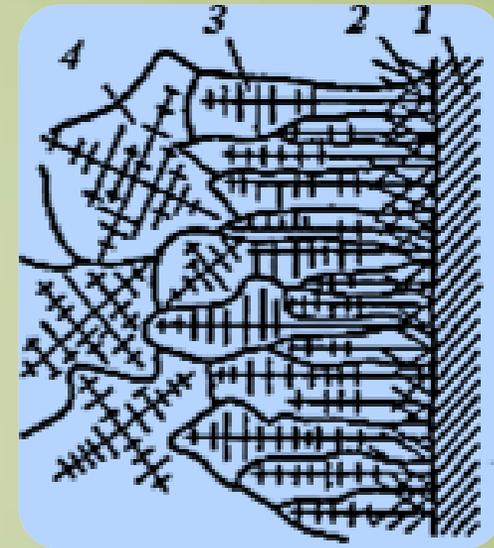
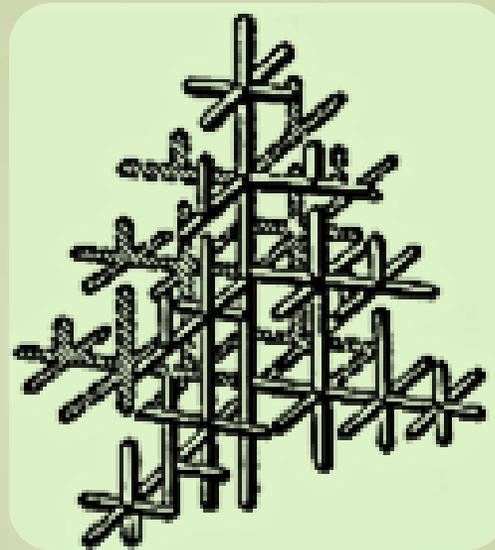
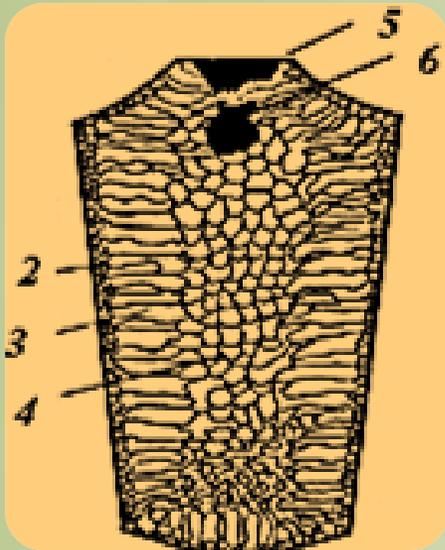
Гетерогенная кристаллизация

- › При контакте **неизоморфных примесей** с затвердевающим металлом, их поверхностный слой приспособливается к строению кристаллов металла – **активация примесей**. На активированной примеси осаждаются атомы затвердевающего металла
- › Растворенные в жидком металле **поверхностно-активные примеси** измельчают зерно и изменяют форму растущего кристалла, осаждаясь тонким слоем на его поверхности. Поверхностная энергия на границе раздела уменьшается
- › **Модифицирование** – введение в расплав различных веществ для повышения механических, технологических и эксплуатационных свойств отливок путем измельчения структуры
- › **Физические воздействия** на структуру металла
 - регулирование температуры расплава и его охлаждение при переливе
 - вибрация
 - ультразвук
 - электромагнитное перемешивание
 - ввод модификаторов и наложение колебаний с ультразвуковой частотой



Строение слитка. Монокристаллы Аморфные материалы

Строение металлического слитка



Стальной слиток

• Древоподобный кристалл

• Дендриты в наружных частях слитка

1 – стенки изложницы; 2 – корковая зона; 3 – зона столбчатых кристаллов; 4 – зона равноосных кристаллов; 5 – усадочная раковина; 6 – пористость

Температура стали перед разливкой **1600 °C**

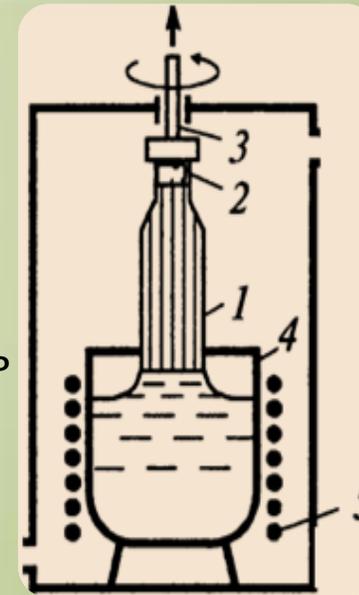
Выращивание монокристаллов

- › **Направленная кристаллизация:** при переохлаждении расплава зарождение и рост кристалла осуществляются на одной фазовой границе, теплота от фронта кристаллизации отводится в одном направлении, что позволяет кристаллизовать расплав в виде одного монокристалла
- › **Методы направленной кристаллизации**
 - нормальная направленная кристаллизация
 - вытягивание из расплава
 - зонная плавка

› Из расплава

- › **Метод Чохральского.** Исходный материал загружают в тигель и нагревают до расплавления в вакууме или в атмосфере инертного газа. Затравка из монокристалла закрепляется на конце штока. Шток опускается, затравка соприкасается с поверхностью расплава и оплавляется. Выращивают монокристаллы иттриево-алюминиевого граната, ниобата лития и др. Для предотвращения загрязнения расплава материалом тигля применяется **гарнисаж** – твердый защитный слой на внутренней поверхности тигля

Схема Чохральского



Монокристалл кремния

1 – монокристалл; 2 – затравка; 3 – механизм вытягивания; 4 – тигель с расплавом; 5 – нагреватель

Выращивание монокристаллов

- › **Метод зонной плавки.** Тигель - в кварцевую трубку с инертным газом. Прогонка зоны расплава по длине заготовки поликристалла. В зоне расплава собираются примеси, происходит очистка кристалла. Индукционный, радиационный или оптический нагрев. Полупроводники, тугоплавкие монокристаллы молибдена, вольфрама

› Из раствора

- › При выращивании из **растворов** химический состав кристалла отличается от химического состава жидкой фазы

› Из газовой фазы

- › Скорость роста кристаллов значительно ниже (сотые доли **мм/ч**), чем при вытягивании из расплава. Применяется для выращивания тонких эпитаксиальных пленок, небольших кристаллов полупроводников
- › **Способы**
 - сублимация
 - химические реакции в газовой фазе
 - химические транспортные реакции

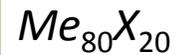


Выращенные лопатки турбин

Аморфные металлические сплавы

- › Это металлическое стекло, новый перспективный материал. Состоит из легкоплавких, редкоземельных и переходных металлов (Fe, Co, Mn, Cr, Ni) с добавкой **аморфизаторов** (B, C, Si, N, S)

Например, $\text{Ni}_{80}\text{S}_{20}$, $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{10}\text{P}_{15}\text{B}_5$



где *Me* – один или несколько металлов, *X* – элементы, добавляемые для образования и стабилизации аморфной структуры

- › В системе **металл–металл** эта зависимость не соблюдается
- › **Группы**
 - переходный металл (Fe, Ni, Co) – металлоид (B, Si, P, C). Наиболее важны в практическом применении
 - переходный металл–редкоземельный металл (Dy, Nd, Gd)
 - переходный металл–металл–редкоземельный металл (Sm, Ho)
 - бинарные и многокомпонентные сплавы из щелочноземельных и др. металлов
- › АМС не имеют дальнего порядка в расположении атомов и получаютс^я сверхбыстрым (10^5 – 10^{10} °C/с) охлаждением из газообразного, жидкого или ионизированного состояний

Классификация конструкционных материалов



МАТЕРИАЛЫ



Кристаллы
100% кристаллич. фазы



Пластмассы
до 80% кристаллич. фазы



Керамики
до 100% кристаллич. фазы



Стекло
0% кристаллич. фазы

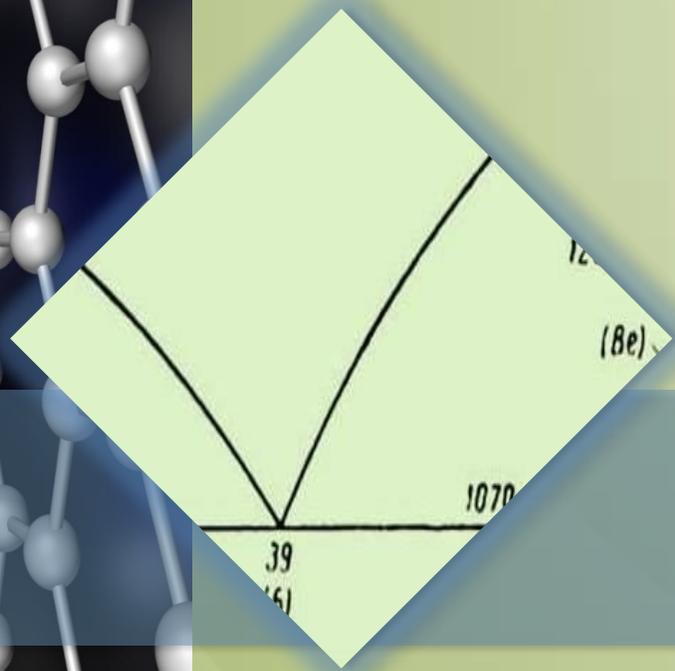
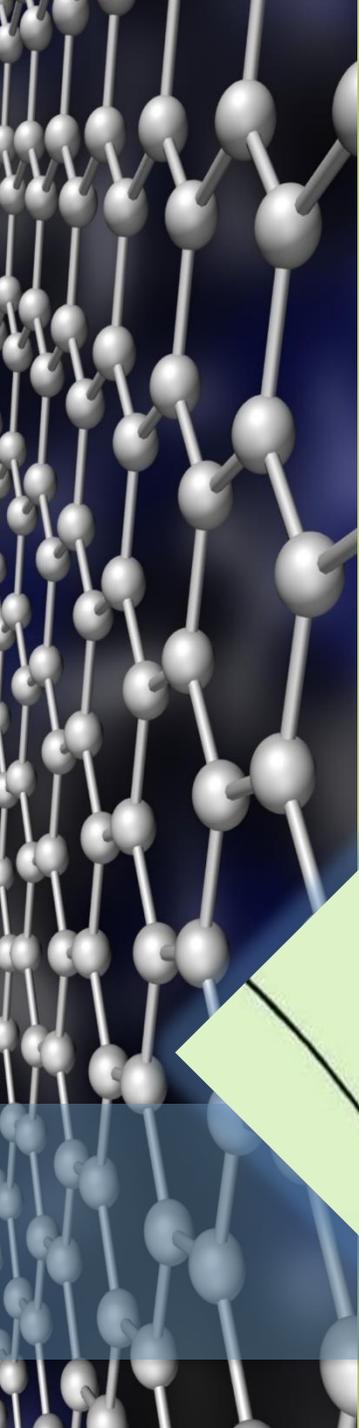


Кривые нагрева и охлаждения веществ

Кристаллического

Аморфного (стекло)





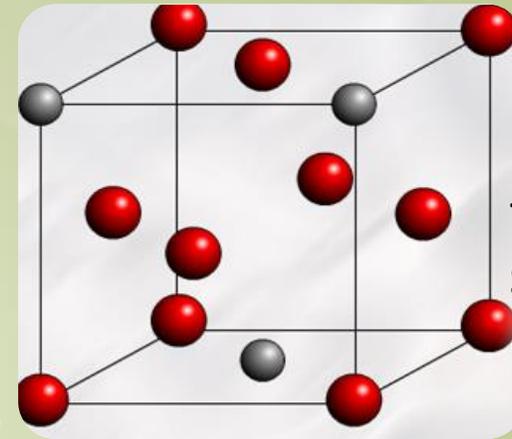
Основы теории двойных сплавов. Диаграммы состояния

Строение сплавов

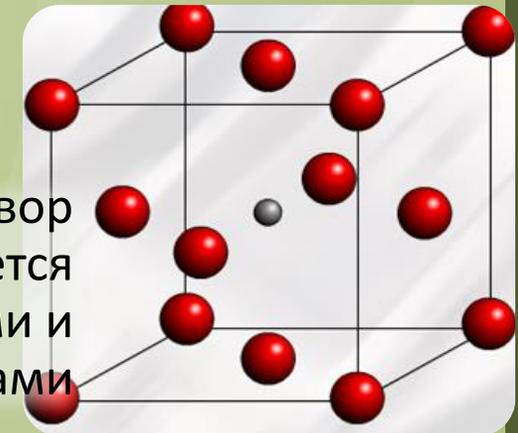
- › Чистые металлы после кристаллизации состоят из зерен (кристаллитов) одного типа, т.е. зерен одинакового **химического состава**. Совокупность зерен одного типа называется **фазой**. Все чистые металлы однофазные
- › Кристаллизация сплавов определяется
 - взаимной растворимостью компонентов
 - условиями охлаждения
 - последующей термообработкой
- › **Однофазный** сплав (гомогенный) - состоит из зерен одного типа
- › **Многофазный** (гетерогенный) - состоит из зерен разного типа
- › **Фазовый состав** определяется разновидностью образующихся кристаллов

Строение сплавов

- › **Твёрдые растворы** – компоненты в твёрдом состоянии частично или полностью растворены друг в друге, т.е. в решётке одного компонента присутствуют атомы другого
- › Растворение атомов одного из компонентов в кристаллической решётке другого может идти по типу **внедрения** (атомы растворённого элемента располагаются между атомами растворителя) и по типу **замещения** (атомы растворённого элемента замещают атомы растворителя)
- › **Химические соединения** – компоненты находятся в строгом соотношении друг с другом по закону нормальной валентности. Сплав представляется в виде формул NiTi (интерметаллиды), WC (карбиды)

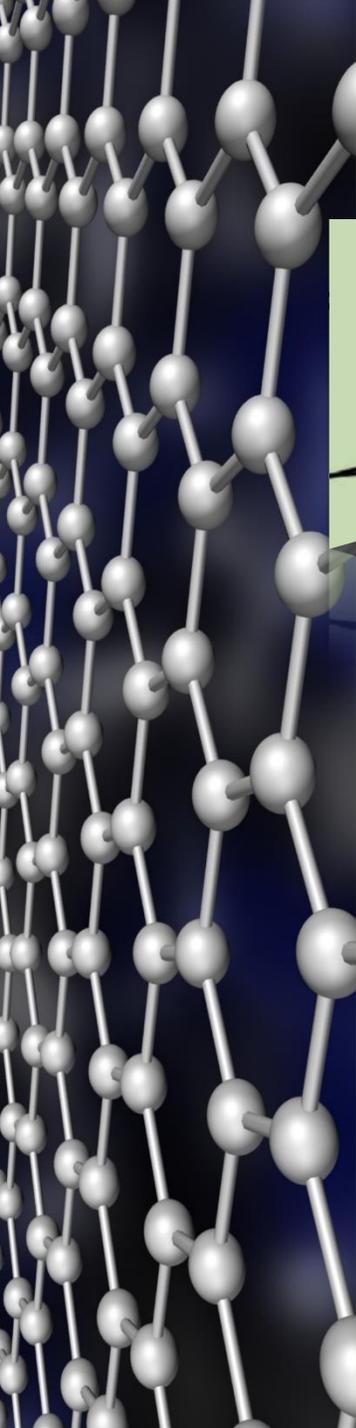
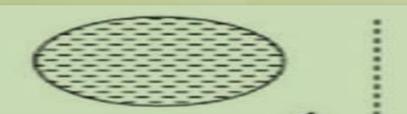
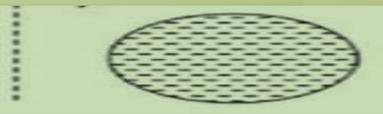


Твердый раствор **замещения** образуется между металлами



Твердый раствор **внедрения** образуется между металлами и неметаллами

Диаграммы состояния

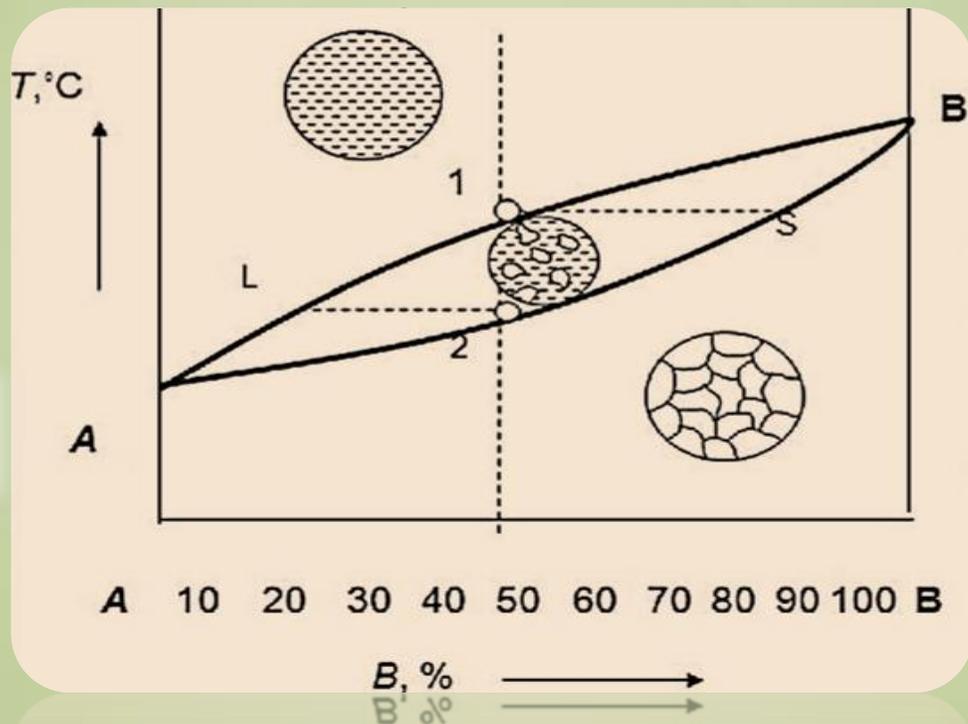
- 
- 
- › **Диаграмма состояния** - графическое изображение состояния сплавов в зависимости от **температуры** и **концентрации** компонентов в условиях равновесия. По диаграмме состояния определяют
 - структуру сплава
 - режим литья
 - термическую обработку
 - обработку давлением
 - › Экспериментальное построение диаграмм состояния возможно благодаря фазовым превращениям сплава, сопровождающимся изменением свойств (электрическое сопротивление, удельный объем) или тепловым эффектом
 - › Диаграммы строятся по **кривым охлаждения сплава** с последующим наблюдением **микроструктуры** при различных концентрациях компонентов
- 

Типы диаграмм

- 
- › С **полной нерастворимостью** компонентов в твердом состоянии (с образованием механических смесей компонентов) (**диаграмма I типа**) (**Al–Si, Pb–Sb**)
 - › **Диаграмма состояния сплавов с полной растворимостью** компонентов в твердом состоянии (**диаграмма II типа**) (**Cu–Ni, W–Nb, V–Mo**)
 - › С **ограниченной растворимостью** компонентов в твердом состоянии (**диаграмма III типа**) (**Fe–C, Al–Cu**)
 - › **Диаграмма состояния сплавов с устойчивым химическим соединением** компонентов (**диаграмма IV типа**)
 - › С **полиморфным превращением** компонентов
- 

Построение диаграмм состояния

Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в твердом и жидком растворах



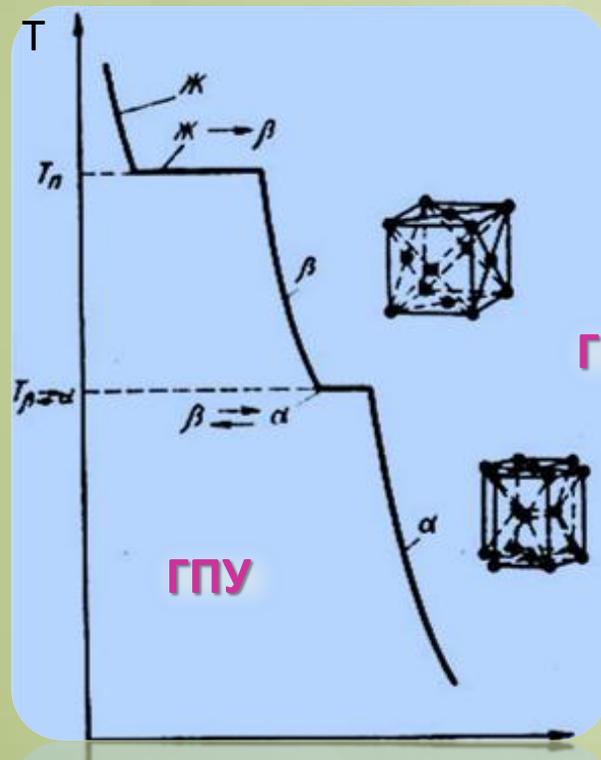
AL1B - ликвидус
A2SB - солидус

Все сплавы данной системы кристаллизуются с образованием непрерывного ряда твердых растворов

- > **Линии диаграммы** – семейство критических точек, в которых происходят превращения в железоуглеродистых сплавах
- > **Ликвидус и солидус** – линии температуры **начала** и **конца** кристаллизации

Полиморфное превращение

Полиморфное превращение (аллотропия) – способность металла в твердом состоянии иметь различные кристаллические решетки



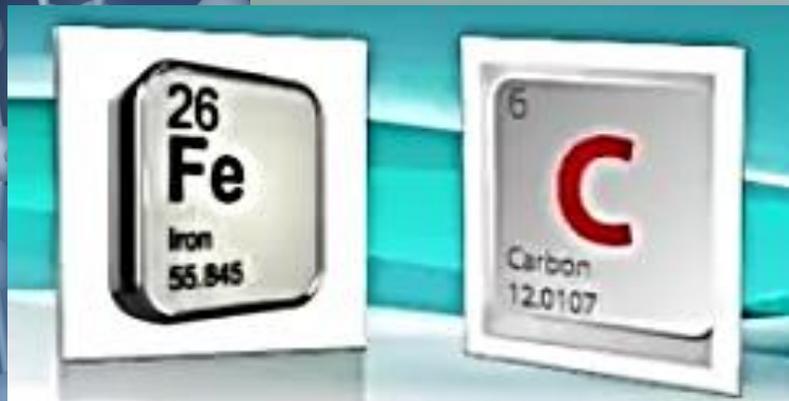
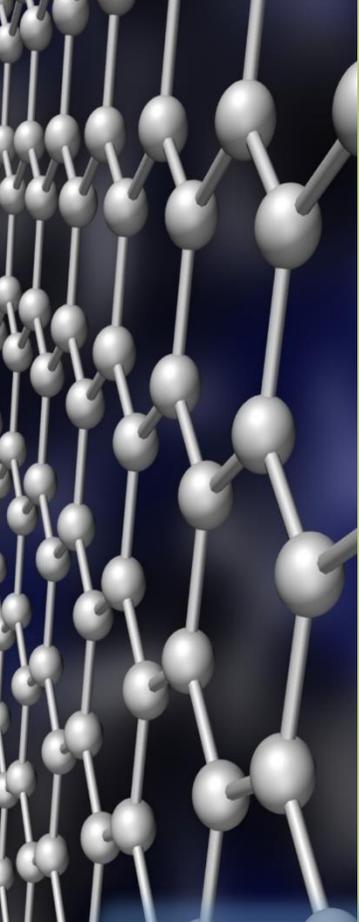
› В зависимости от температуры, металлы существуют в разных кристаллических формах – **полиморфных модификациях**

› Полиморфное превращение ведет

- к **перестройке однотипных атомов** с образованием кристаллической решетки другого типа
- к образованию **новых зерен** других размеров и формы с выделением теплоты
- к образованию **зародышей** и их последующему росту



Кривая охлаждения металла с ГПУ и ГЦК решетками



Железоуглеродистые сплавы Диаграмма железо-углерод

Железоуглеродистые сплавы

› **Железо** – металл серебристо-белого цвета

- температура плавления **1539 °C**
- плотность **7,87 г/см³**
- атомная масса **55,85**

› **Полиморфные модификации**

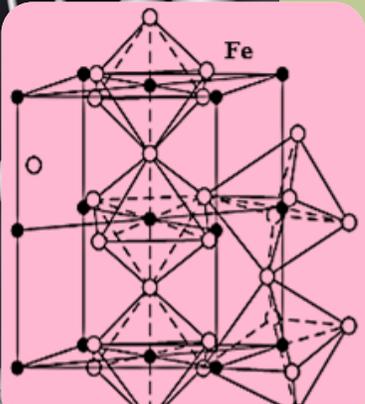
- **α -железо (Fe_α)** с ОЦК решеткой ниже **911 °C** и выше **1392 °C**. Период решетки **0,286 нм**
- **γ -железо (Fe_γ)** с ГЦК решеткой, интервал **911–1392 °C**. Период решетки **0,365 нм**

› **δ -железо (Fe_δ)** - высокотемпературная модификация α -железа. Железо со многими элементами образует твердые растворы

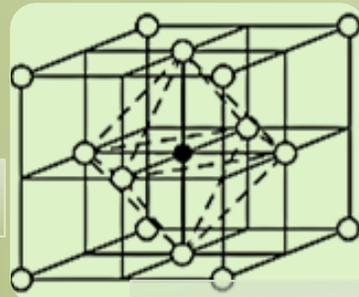
- с металлами – **замещения**
- с углеродом, азотом и водородом – **внедрения**

› **Углерод** – неметалл

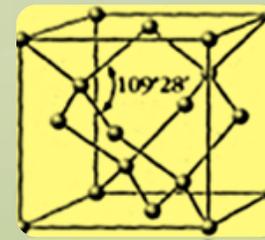
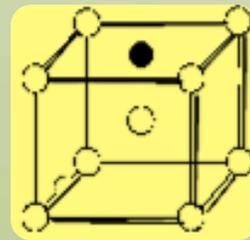
- атомная масса **12,011**
- атомный радиус **0,077 нм**
- ионный радиус C^{4+} **0,015 нм**
- несколько кристаллических модификаций



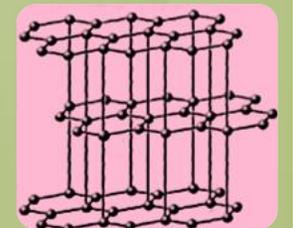
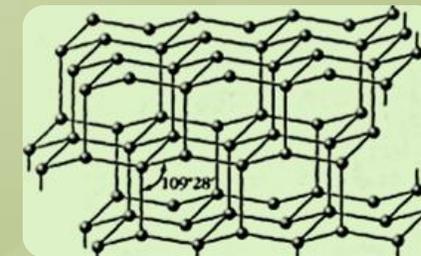
Цементит



Аустенит ● Феррит



Кубический алмаз ● Гексагональный алмаз



Графит

Диаграмма железо-цементит

- › В жидком состоянии **железо** растворяет **углерод** в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы
- › **Феррит** (лат. *ferrum* – железо) – твердый **раствор внедрения** углерода и других примесей (например, Mn, Si) в α -железе
- › **Аустенит** (англ. ученый **Р. Аустен**) – твердый раствор углерода в γ -железе).
Высокотемпературная фаза. Прочнее феррита (200 НВ, $\delta = 40\text{--}50\%$), парамагнитен
- › При минимальной температуре **727 °C**:
 - растворимость углерода **0,8 %**
 - макс. растворимость **2,14 %** при **1147 °C**
- › **Цементит** – химическое соединение **железа с углеродом** (карбид железа Fe_3C), содержит **6,69 %** углерода. Решетка состоит из октаэдров, оси которых наклонены друг к другу
- › **Диаграмма состояния сплавов** – диаграмма с химическим соединением. Рассматривается как отдельные диаграммы Fe– Fe_3C и Fe_3C –C

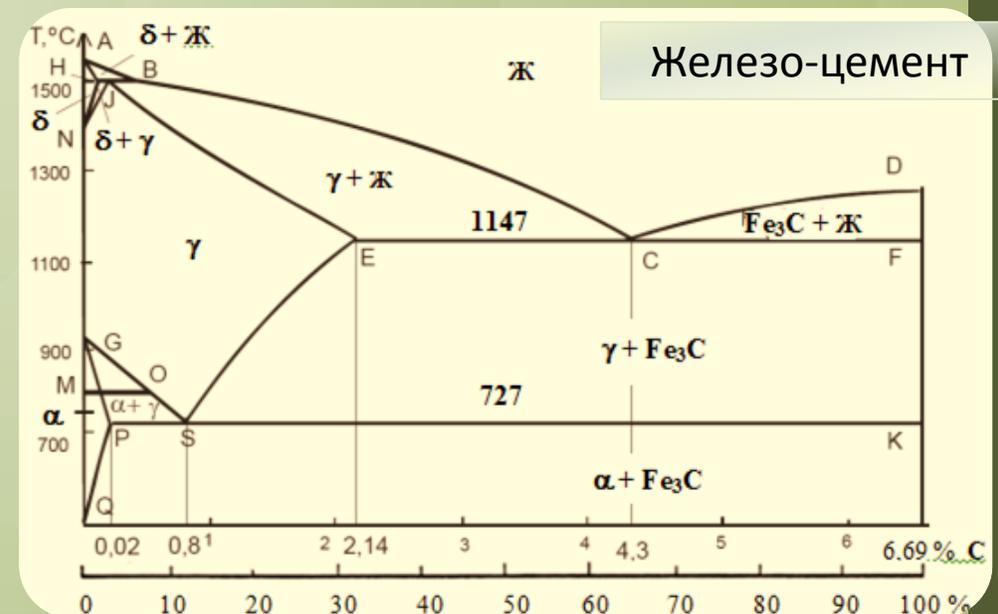
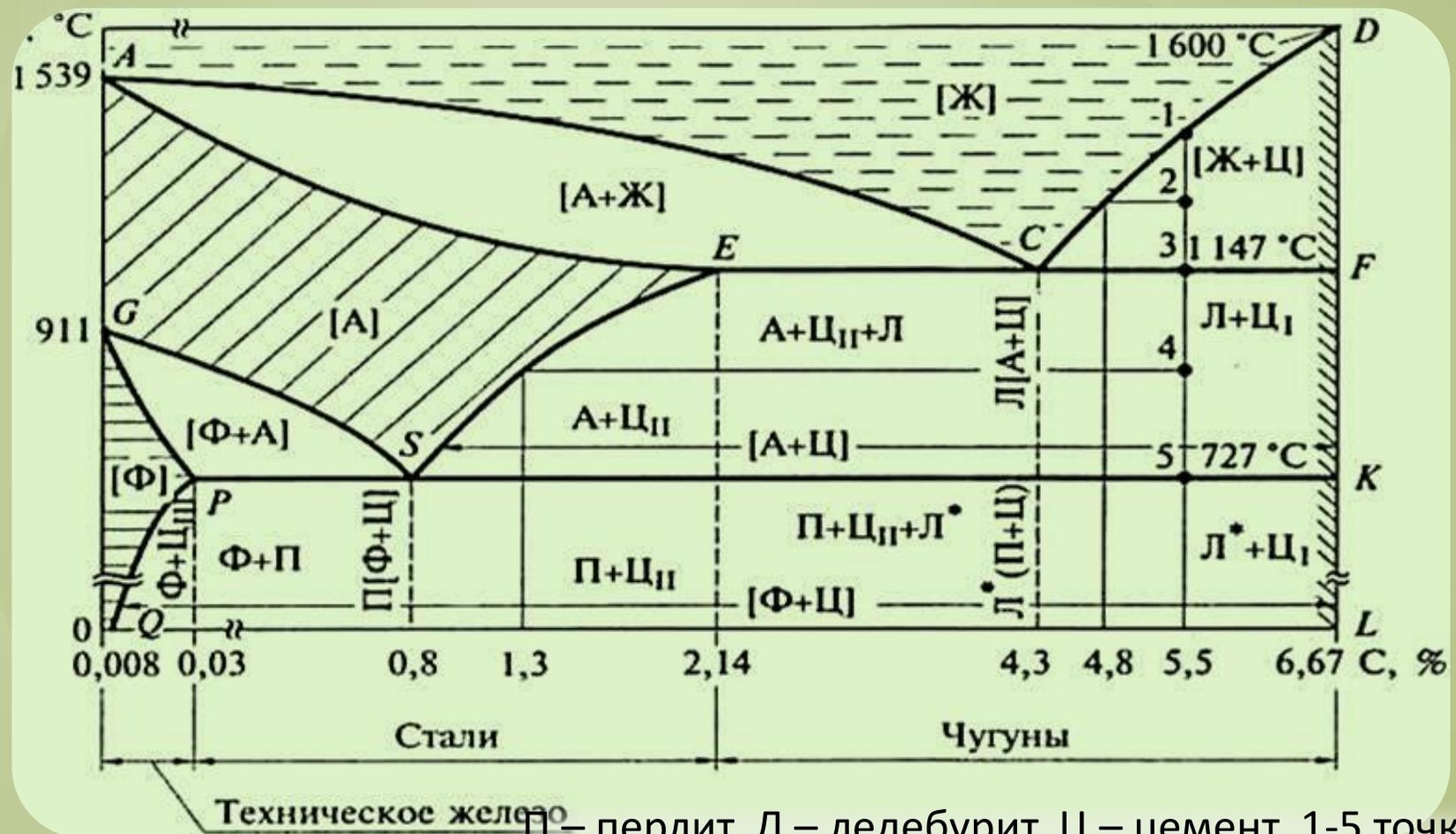
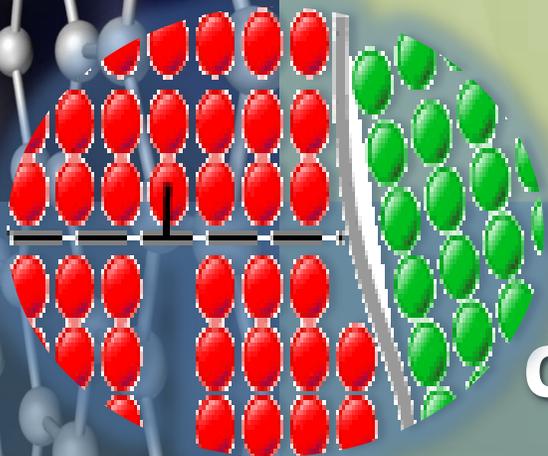
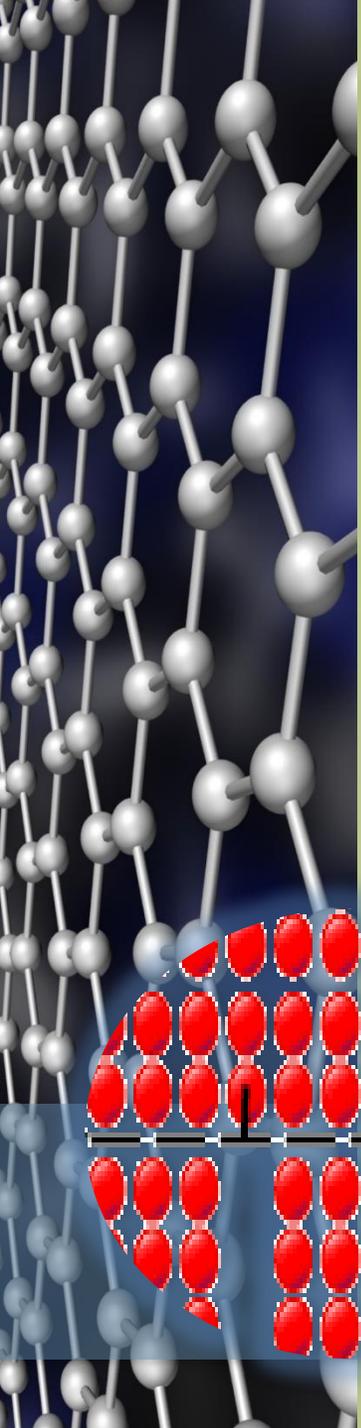


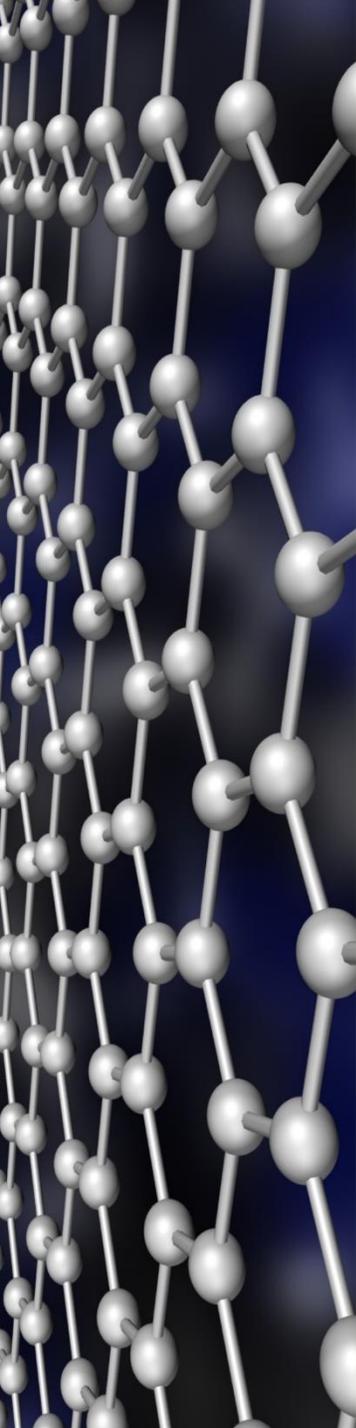
Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов



П – перлит, Л – ледебурит, Ц – цемент, 1-5 точки структурных превращений при охлаждении сплава с 5.5% углерода



Зависимость структуры металлов от скорости охлаждения. Закон Холла-Петча



Соотношение (закон) Холла-Петча

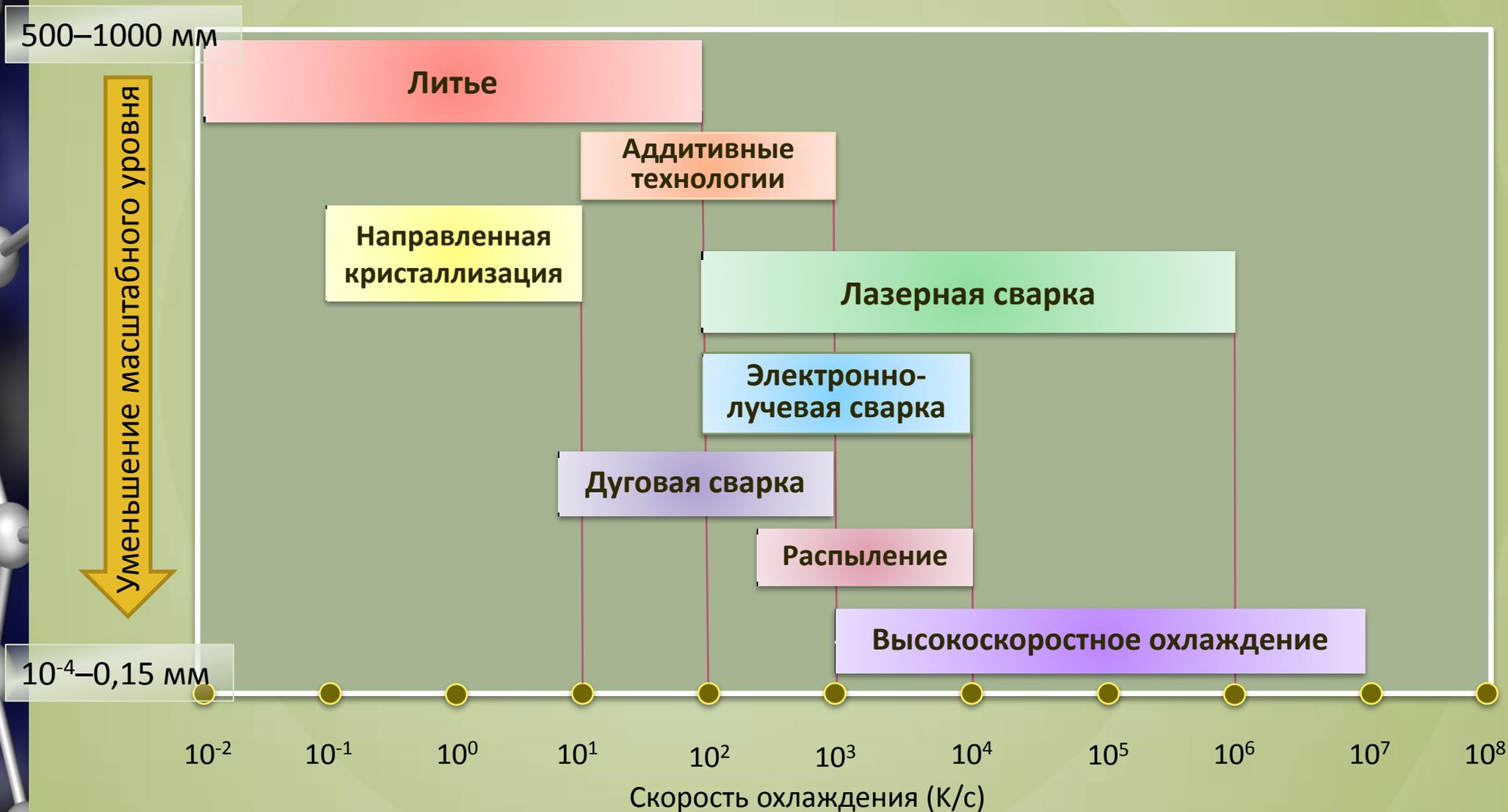
- › **Соотношение Холла-Петча** (англ. *Hall-Petch relationship* или *Hall-Petch strengthening, grain-boundary strengthening*) - соотношение между пределом текучести и размером зерна d для поликристаллического материала:

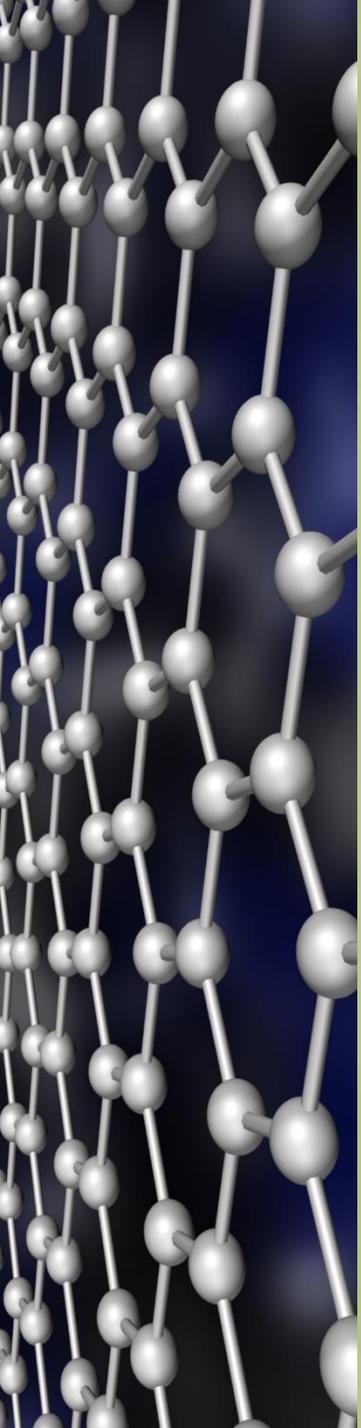
$$\sigma_T = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$

где σ_0 - напряжение трения, необходимое для скольжения дислокаций в монокристалле, K - коэффициент Холла-Петча, индивидуальный для каждого материала

- › Соотношение даёт количественное описание роста предела текучести поликристаллического материала с уменьшением размера зерна. В основе - дислокационные механизмы пластической деформации: границы зёрен тормозят движение дислокаций
- › Соотношение применимо и для некоторых слоистых материалов. Для наноматериалов с размером зерна порядка нескольких десятков нм этот закон нарушается, и проявляется **обратный эффект Холла-Петча** (англ. *inverse Hall-Petch effect*), механизмы которого в настоящее время недостаточно изучены

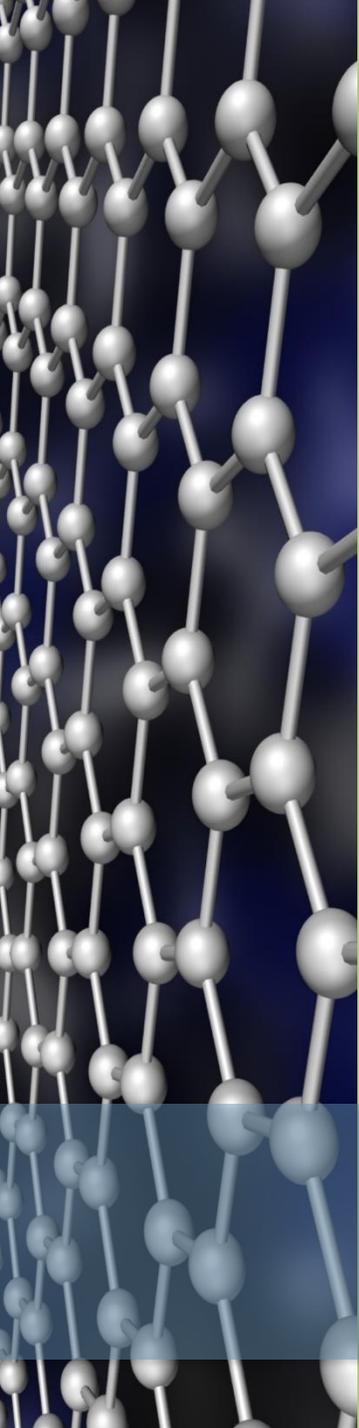
Характеристики охлаждения для основных процессов





Ключевые вопросы

- › Дать определение металлов и сплавов. Структурно-чувствительные и не структурно-чувствительные свойства металлов
- › Состояние вещества. Кристаллическое строение. Дефекты кристаллического строения. Механизмы упрочнения.
- › Кристаллизация – типы и механизмы кристаллизации.
- › Особенности строения слитков. Монокристаллы и аморфные материалы.
- › Строение сплавов. Особенности построения двойных диаграмм.
- › Диаграмма железо –углерод.
- › Влияние характеристик охлаждения основных процессов на структуру и свойства. Закон Холла-Петча.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!