



# Кристаллизация и строение металлических материалов

**Лекция 4**  
**Поток 2РПР/М**

**Лектор доц. Дощечкина И .В.**

(lect\_4\_2РПР/М\_ИМТМ\_DIV. ppt )

(Использованы материалы доц С.И Бондаренко, электронного учебника МАДИ и электронного ресурса [www.google.com.ua / search](http://www.google.com.ua/search) )

# **ПЛАН ЛЕКЦИИ**

- 3.1. Кристаллизация металлов и сплавов.**
- 3.2. Атомно-кристаллическое строение металлов.**
- 3.3. Дефекты атомно- кристаллического строения.**
- 3.4. Микроструктура реального металла.**
- 3.5. Основные факторы, влияющие на механические свойства металлов и сплавов.**

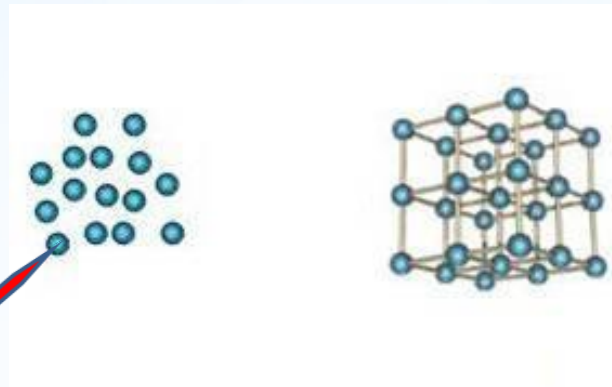


# 3.1. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Металлы могут существовать в твердом, жидком и газообразном состоянии.

## Жидкий металл

находится в аморфном состоянии – атомы расположены беспорядочно – хаотично.

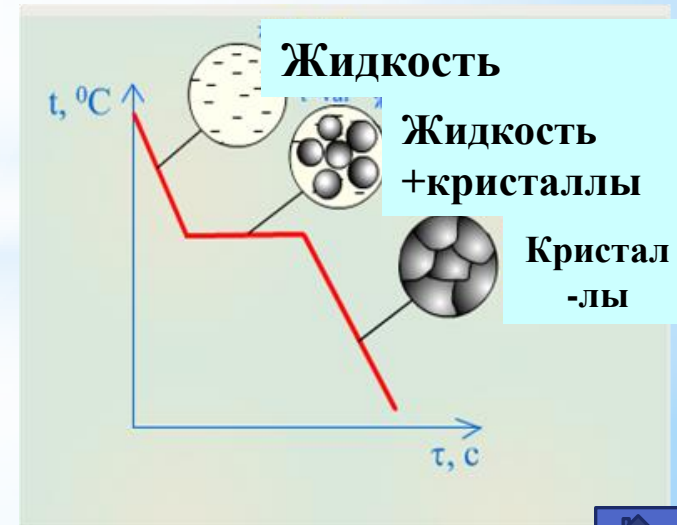


## Твердый металл

имеет упорядоченное размещение атомов в пространстве.

Металлические материалы в твердом состоянии получают путем кристаллизации жидкого металла при охлаждении до определенной температуры.

Кристаллизация – это процесс образования и роста кристаллов.



# ВИДЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ.

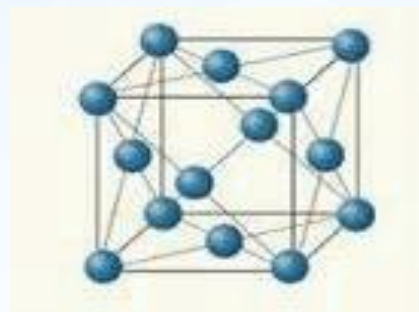
Различают **первичную и вторичную кристаллизацию.**

**Первичная кристаллизация** – это зарождение и рост кристаллов **в жидком состоянии.** Она присуща всем кристаллическим телам, как металлам, так и неметаллам

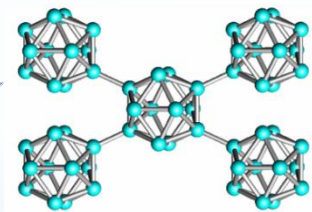
При кристаллизации **формируется кристаллическая решетка** – это закономерное, упорядоченное расположение атомов в пространстве.

**Металлы – это кристаллические тела.**

Медь

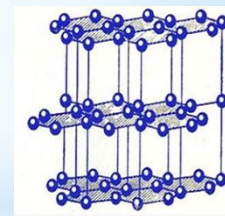
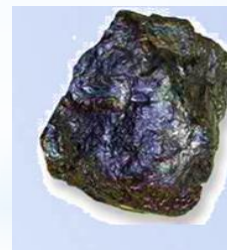


Бор

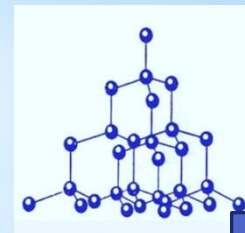


Вторичная

**кристаллизация** – это образование **кристаллов нового типа в твердом состоянии** под влиянием температуры или давления.



Графит



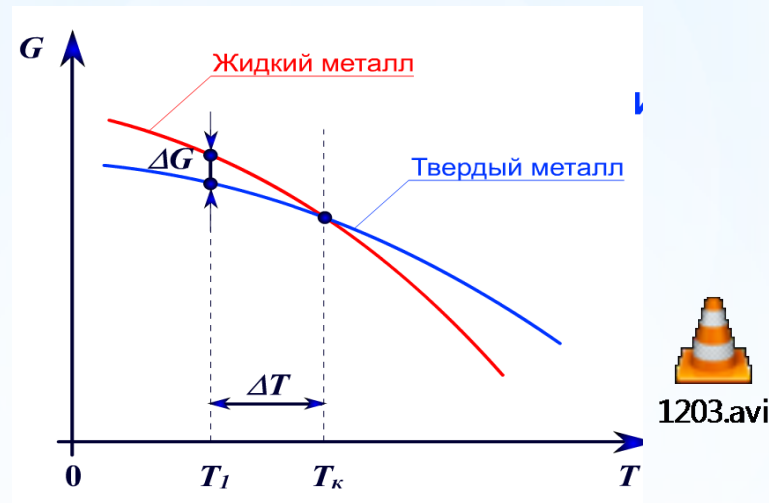
Алмаз



# ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ПЕРВИЧНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Условием любого превращения является **уменьшение свободной энергии  $G$** , которая характеризует стабильность системы.

$T_0$  – равновесная или теоретическая температура кристаллизации. Выше  $T_0$   $G_{ж} < G_{ТВ}$  – стабилен жидкий металл.



Ниже  $T_0$   $G_{ТВ} < G_{ж}$  стабильным будет твердый металл и происходит кристаллизация.

Необходимое условие начала кристаллизации  $\Delta G = G_{ж} - G_{ТВ} < 0$ .

Для этого надо переохладить металл ниже  $T_0$  до температуры  $T_1$ .

$T_1$  — действительная температура кристаллизации.

Разность между равновесной  $T_0$  и действительной  $T_1$  температурами кристаллизации называется степенью переохлаждения  $\Delta T$

$$\Delta T = T_0 - T_1$$

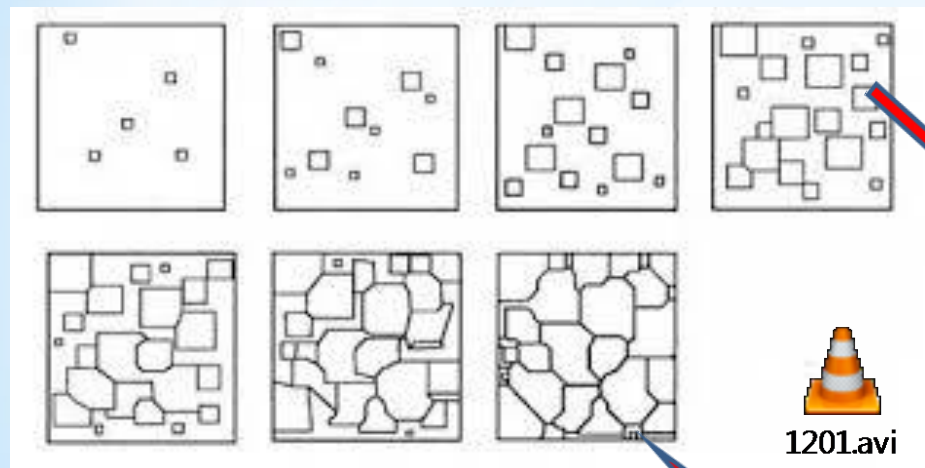
Степень переохлаждения возрастает с повышением скорости охлаждения





# КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

При кристаллизации **одновременно** реализуются **два** процесса – **образование зародышей кристалла** и **их рост**.



Форма зародышей зависит от типа кристаллической решетки



По мере развития процесса кристаллы разрастаются, сталкиваются, теряют свою правильную форму.

По завершению кристаллизации образуются **зёрна** ( кристаллиты).

**Зерна** - это кристаллы произвольной формы. Часто они имеют вид полиэдров (многоугольников).

Металлы преимущественно кристаллизуются в виде **дендритов** - кристаллов древовидной формы.



# ОБРАЗОВАНИЕ ДЕНДРИТОВ

**Дендрит** – кристаллическое образование, довольно случайное по своей природе, и образуется вследствие неодинаковой скорости роста кристалла в разных направлениях.

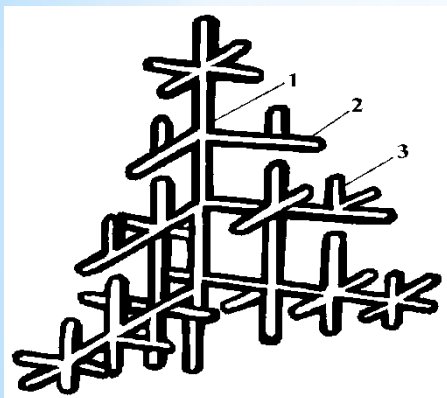
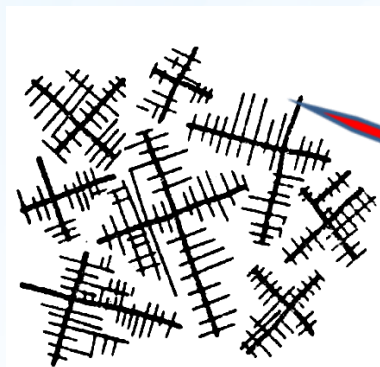


Схема роста дендрита.



Сначала от зародышей растут **первичные** (первого порядка - 1) **оси**, затем перпендикулярно к которым ответвляются **оси высших порядков – 2 и 3**. Последней кристаллизуется жидкость, заполняя межосное пространство.

Дендриты растут, сталкиваются, теряют свою форму и **структура становится зернистой**, (полиэдрической).



Дендриты серебра.



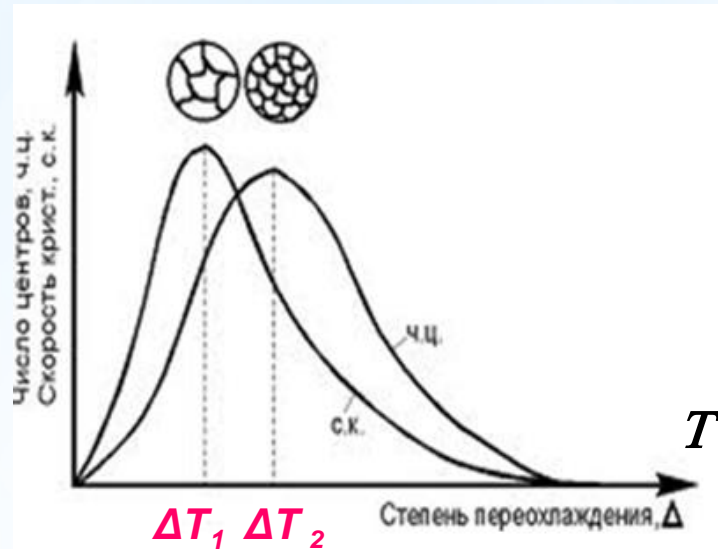
1206.AVI



# ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

**Скорость зарождения твердых частиц (чц) – центров (зародышей) кристаллизации.**

**Количество зародышей, образующихся в единице объема за единицу времени.**



**Скорость роста кристаллов (ск)- увеличение их линейного размера за единицу времени.**

**Оба этих процесса зависят от степени переохлаждения  $\Delta T$  жидкого металла.**

**В зависимости от  $\Delta T$  при кристаллизации может формироваться зерно разного размера.**

При  $\Delta T_1$  образуется крупное зерно, так как мало центров и большая скорость их роста. При  $\Delta T_2$  – мелкое зерно ( много центров и растут они медленно).

**ЧЕМ МЕЛЬЧЕ ЗЕРНО, ТЕМ ВЫШЕ КОМПЛЕКС МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА.**

При определенном переохлаждении ( \* ) кристаллы не образуются и металл затвердевает как аморфное тело -металлическое стекло.





# ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЛИТКА

Нормальное  
охлаждение.



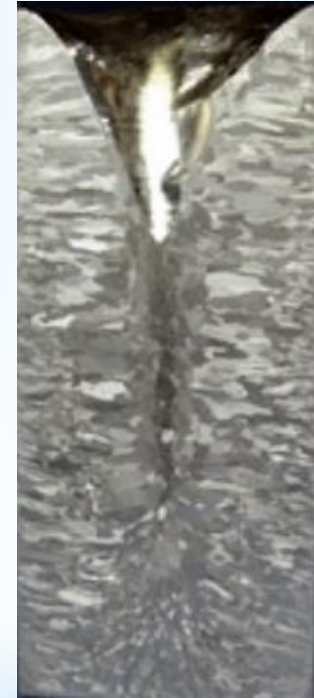
Небольшая  
степень  
переохлаждения.

Перегрев и быстрое  
охлаждение.



Большая  
степень  
переохлаждения.

Очень медленное  
охлаждение.



Малая  
степень  
переохлаждения.

При кристаллизации объём жидкого металла уменьшается и в слитке образуется **усадочная раковина**.



# СПОСОБЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

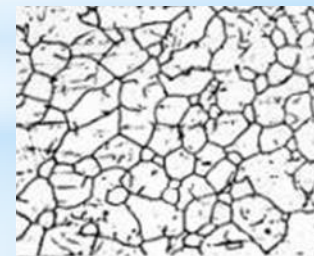


Увеличение скорости охлаждения

Модифицирование расплава

**Модифицирование** – введение в жидкий расплав веществ, которые образуют дополнительные центры кристаллизации.

Эти вещества называют **модификаторами** ( Mg, Ce, Ca ) и вводят их в расплав в количестве не превышающем сотые доли процента. Чаще в виде порошка.



До  
модифицирован  
ия

После  
модифицирова  
ния



# **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

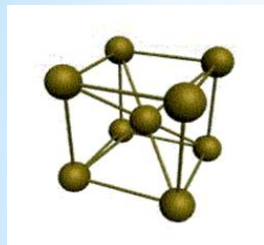
- 1. Что такое кристаллизация? Какое необходимое условие кристаллизации?**
- 2. Какие существуют виды кристаллизации? Какие процессы лежат в основе кристаллизации?**
- 3. Что такое степень переохлаждения? От чего она зависит?**
- 4. Что такое зерно и как оно образуется?**
- 5. Какие кристаллы называют дендритами?**
- 6. Какими параметрами характеризуют кристаллизацию?**
- 7. Какие факторы влияют на размер зерна закристаллизованного металла? Какими способами можно измельчить зерно при кристаллизации?**



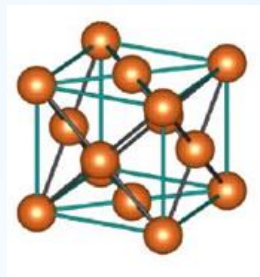
# 3.2. АТОМНО - КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Каждый металл ( сплав ) имеет свою кристаллическую решётку.

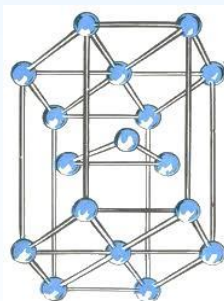
Наиболее распространенные типы кристаллических решеток:



1



2



3

1 – Объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК) - Fe $\alpha$ , Cr, Mo, W

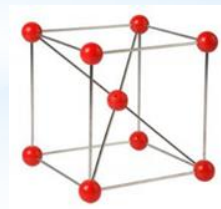
2 – Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК) – Fe $\gamma$ , Al, Ni, Cu

3 – Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ) – Zn, Mg, Co, Ti

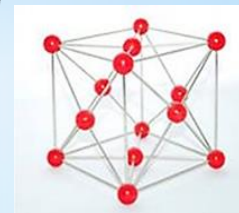
Кристаллические формы металла называются **полиморфными модификациями** и обозначаются буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , начиная с низкотемпературной.

Переход из одной модификации в другую под влиянием внешних условий ( температура, давление) называется **полиморфным превращением**. Полиморфизмом обладают Fe, Ti, Sn.

$\alpha$  – железо (Fe $\alpha$ )



911°C

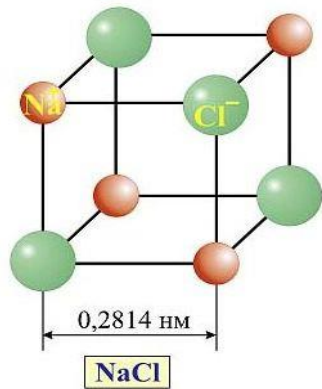


$\gamma$  – железо (Fe $\gamma$ )

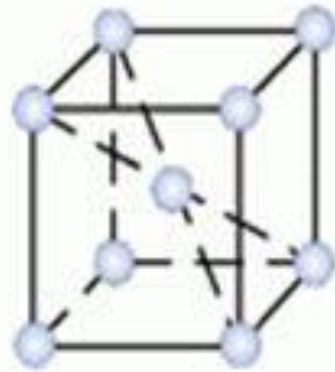




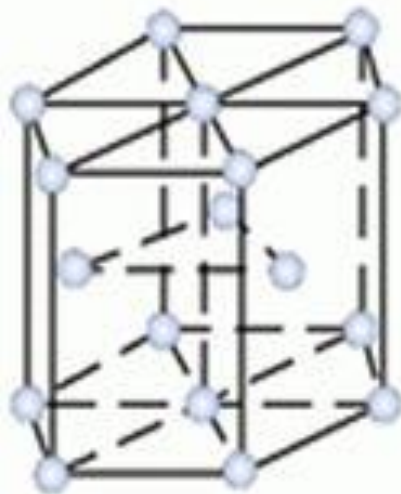
# ТИПЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК



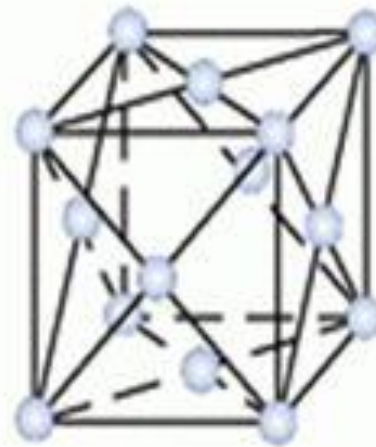
Кубическая



Объемно-центрированного куба (ОЦБ)



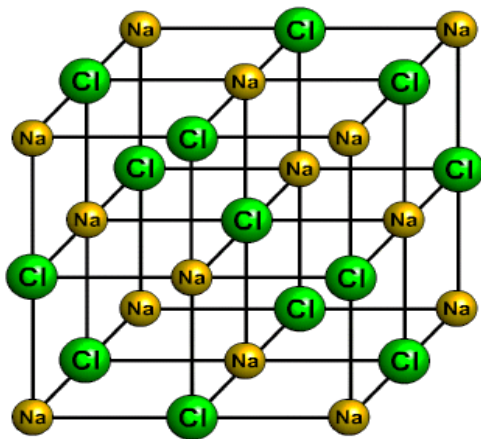
Гексагональная плотноупакованная (ГПУ)



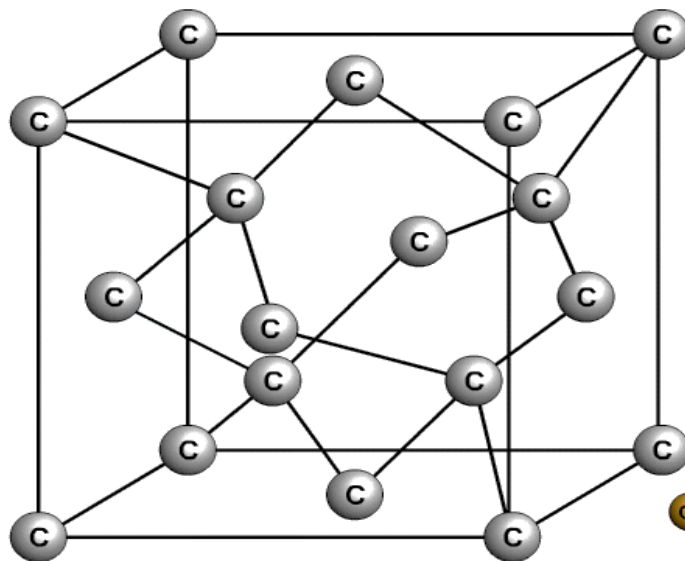
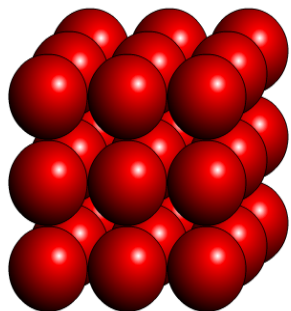
Гранецентрированного куба (ГЦК)



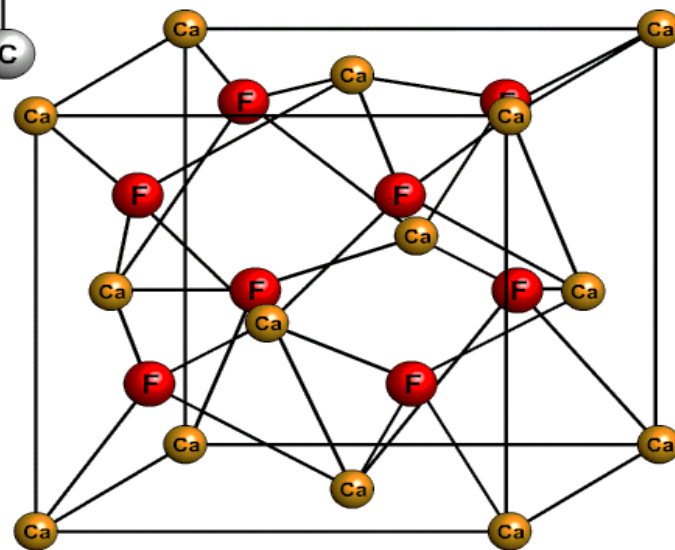
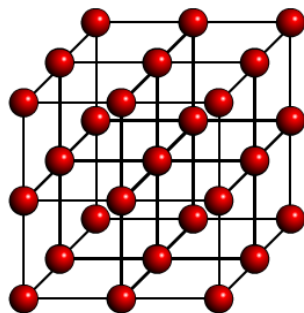
# СЛОЖНЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ



**Галит (поваренная соль).**  
Атомы натрия в вершинах кубической ячейки и в центрах всех граней; атомы хлора в центре ячейки и в серединах всех ее ребер.



**Алмаз.**  
Атомы углерода в вершинах кубической ячейки, в центрах ее граней и в центрах четырех из восьми октантов ( в шахматном порядке).



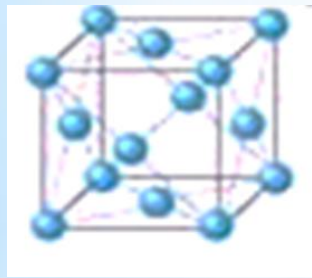
**Флюорит.**  
Атомы кальция в вершинах кубической ячейки в центрах всех ее граней; атомы фтора в центрах всех восьми октантов



# КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА



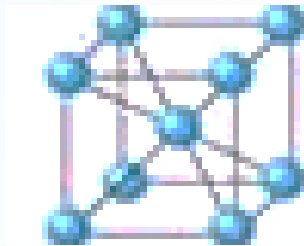
Кубическая  
гранецентрированная



*Cu, Al, Fe $\alpha$*

**ГЦК**

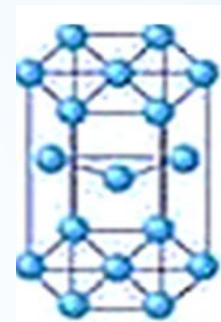
Кубическая  
объёмноцентрированная



*Li, Na, Fe $\gamma$*

**ОЦК**

Гексагональная  
плотноупакованная



*Mg, Zn, Cr*

**ГПУ**

Малая твёрдость



Высокая  
пластичность



Специфические  
свойства



Низкая  
пластичность



# **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ**

- 1. Какие кристаллические решетки наиболее распространены среди металлов?**
- 2. Что собой представляет полиморфное превращение?**
- 3. Какие металлы обладают полиморфизмом?**
- 4. Какие кристаллические решетки имеет железо и при каких условиях?**
- 5. При какой температуре происходит полиморфное превращение железа?**



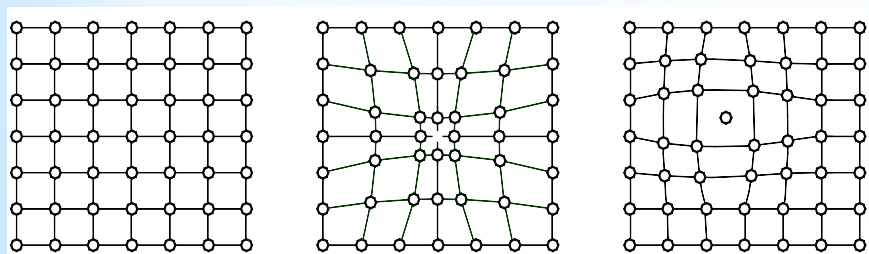


### 3.3. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

В идеальном кристалле (А) решетка не имеет дефектов кристаллического строения.

В реальном металле всегда есть дефекты: точечные, линейные, поверхностные.

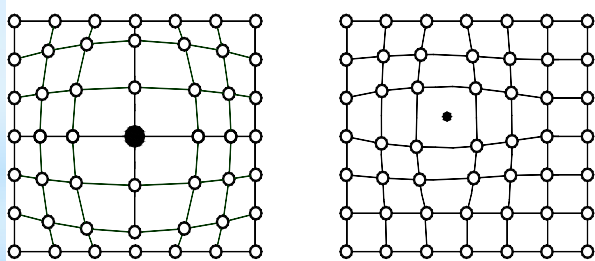
#### Точечные дефекты.



А

Б

В



Г

Д

**Б- вакансии** – незаполненное атомом место в кристаллической решетке;

**В – межузельный атом**, который переместился из узла решетки в междоузлие;

**г- примесной атом в узле** решетки – атом замещения;

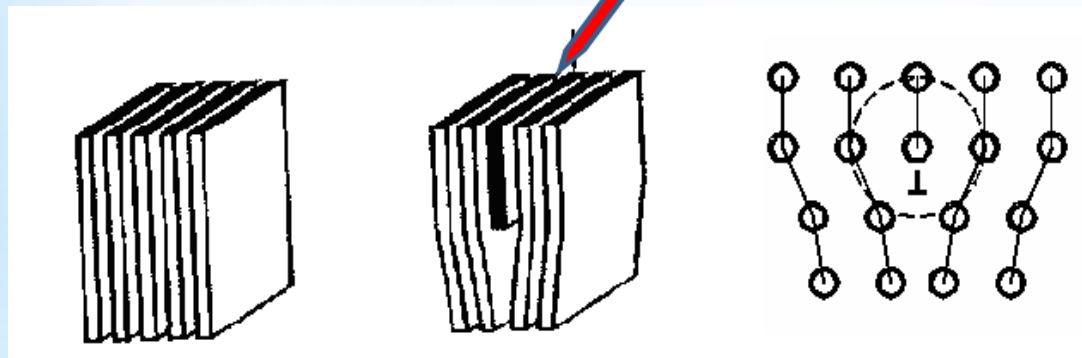
**д – примесной атом в междоузлии** – атом внедрения

**Точечные дефекты** практически не изменяют механических свойств, но существенно **вливают на физические характеристики** металла.



# ЛИНЕЙНЫЕ ДЕФЕКТЫ АТОМНО - КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

**Дислокации** – нарушения правильности кристаллического строения материала, обусловленные наличием лишней атомной плоскости в части кристалла или смещением одной плоскости относительно другой.



Идеальный Кристалл.

Кристалл с лишней плоскостью.

**Дислокация.**

Дополнительная атомная плоскость в верхней части кристалла называется **экстраплоскостью**

Дислокации обозначаются значком  $\perp$ .

**Дислокации возникают** при кристаллизации, во время пластической деформации или термической обработки металла.



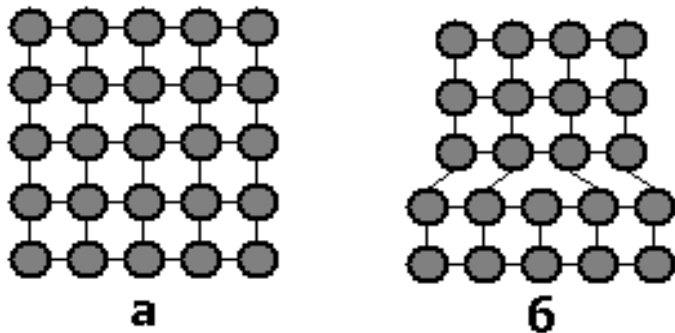
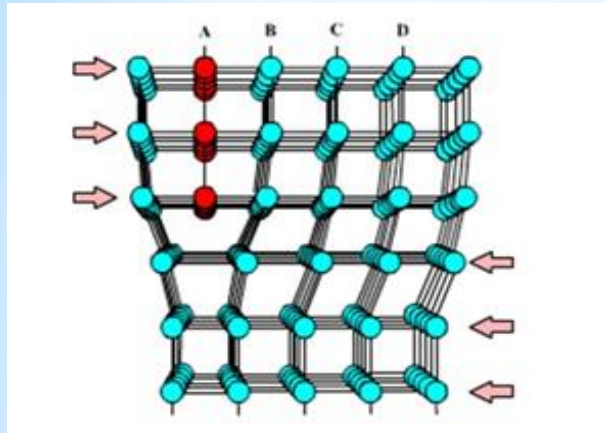
# КРАЕВАЯ ДИСЛОКАЦИЯ

**Образование дислокации** связано с появлением в одной части кристалла лишней плоскости, которая образовалась вследствие сдвига.

**Количество дислокаций** в кристалле характеризуется **плотностью дислокаций  $\rho$** .

**Плотность дислокаций** – это общая длина дислокационных линий в единице объёма материала.

$$\rho = \Sigma l/V, \text{ см/см}^3 \text{ или } \text{см}^{-2}$$



Монокристаллы, практически не имеющие дислокаций, – **это нитевидные кристаллы или усы** (диаметр их не превышает 2 мкм при большой длине - от 10 мкм до 10мм).



# НАЛИЧИЕ ДИСЛОКАЦИЙ В РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ



→ В монокристалле  $\rho = 10^3 - 10^4 \text{ см}^{-2}$ .



→ В поликристаллическом металле  $\rho = 10^6 - 10^9 \text{ см}^{-2}$



→ В деформированном или термически упрочненном металле  $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$

**Наличие дислокаций, их плотность существенно влияют на показатели механических свойств металлов и сплавов.**





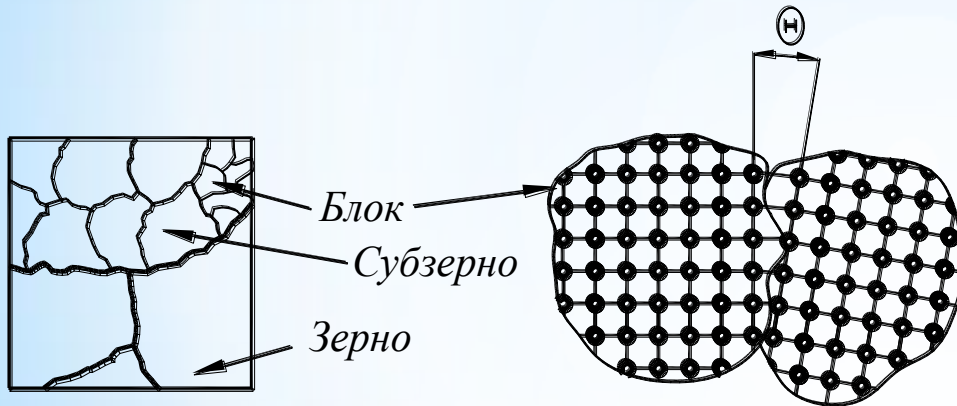
# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие дефекты существуют в реальном металле? Дайте им определение.
2. На какие свойства влияют точечные дефекты в чистых металлах?
3. Что собой представляет дислокация?
4. Каким показателем характеризуют количество дислокаций?
5. Чему равна плотность дислокаций в поликристаллических металлах?
6. На какие свойства влияют дислокации?



## 3.4. МИКРОСТРУКТУРА РЕАЛЬНОГО МЕТАЛЛА

Реальный металл имеет сложную микроструктуру (строение, изучаемое при помощи микроскопа).



Каждое **зерно** состоит из **субзер** (фрагментов), образующих субструктуру. **Субзерна** состоят из **блоков мозаики**, которые содержат 30-40 кристаллических решеток.

**Размер зерна** реального металла – 20-50 мкм, **субзерен** – 3 - 5 мкм, **блоков** – 0,02 - 0,03 мкм.

Зерна разориентированы между собой на углы 12 - 15°, субзерна – 3 - 12°, блоки - < 3°.

Границы между зернами называют **большеугловыми**, между субзернами – **среднеугловыми**, между блоками – **малоугловыми**.



# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какое строение имеет зерно поликристаллического металла?
2. Чему равен размер зерна реального металла?
3. Какие существуют границы в зависимости от угла разориентации зерен?



## 3.5. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.





# ВЛИЯНИЕ ХИМСОСТАВА НА СВОЙСТВА

**Химический состав – важнейший фактор, влияющий на свойства металлов.**

№	Материал	$\sigma_{0,2}$ , МПа
1	Чистое железо	25
2	Техническое железо: Fe+0,005%С	147
	Fe+0,01%С	245
3	Алюминий технический	30
4	Al+1,5 % Mn	30

**Основным конструкционным материалом** являются металлические **сплавы**, так они **прочнее** чистых металлов. Наибольшее применение находят **стали**.



# ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА

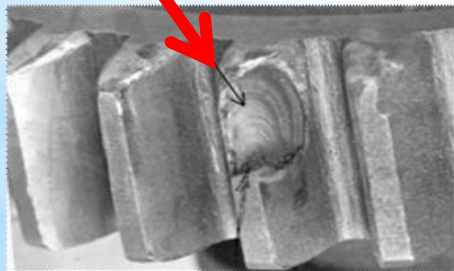
**Присутствие** в металле **макроскопических дефектов** (пор, газовых пузырей, волосовин, неметаллических включений) **снижает механические свойства**, и прежде всего, сопротивление хрупкому разрушению – **надёжность изделия**.

## Усталостные изломы деталей автомобиля



Шатунный болт

Щека коленчатого вала



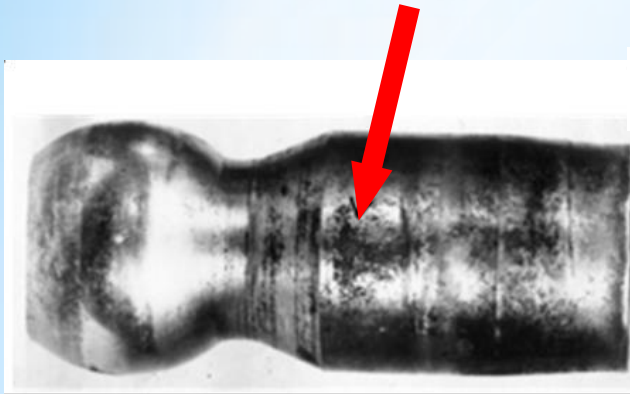
Зуб шестерни

Зачастую причиной разрушения является **усталость металла**, возникающая при эксплуатации изделия **в условиях циклических нагрузок**.

**Из всех видов разрушения наиболее опасно хрупкое, наступающее внезапно и его невозможно остановить!!!**



# ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА



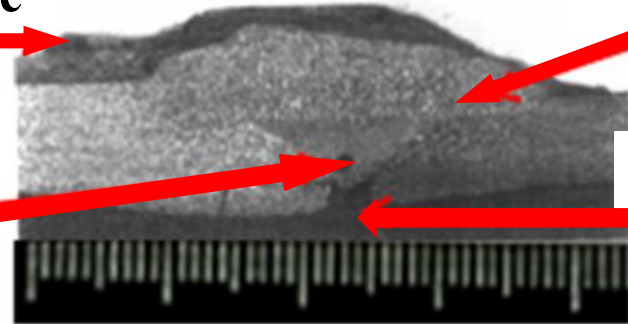
Абразивный износ шарового пальца

Припекание

Наплыв

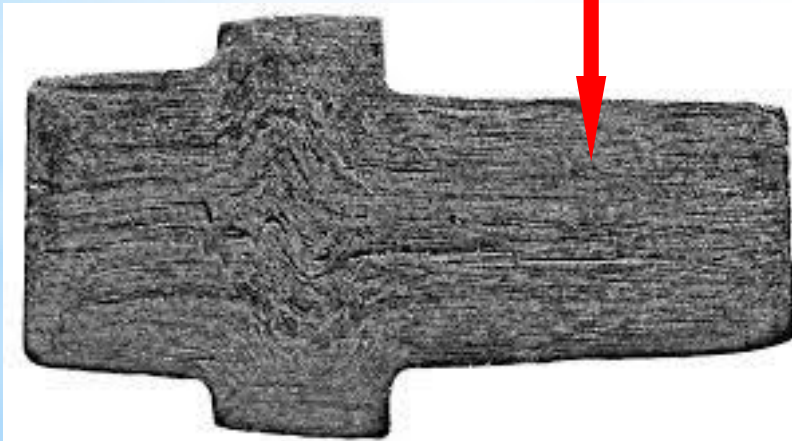
Пора

Непровар



Дефекты сварного шва

р



Расположение волокна

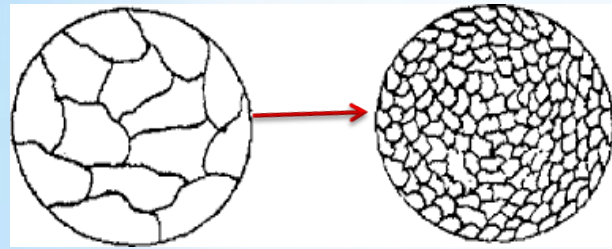
**Вдоль волокна** пластичность и ударная вязкость **в 3 раза выше**, чем поперёк волокна при сохранении прочности. Волокна должны **повторять контур детали** и не пересекаться.

Внешнее усилие перпендикулярно волокну.



# ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

**Размер зерна, его субструктурное строение очень сильно ВЛИЯЮТ на механические свойства.**



РАЗМЕР ЗЕРНА

20МКМ

1МКМ

**С измельчением зерна**

**увеличивается поверхность границ зерен, т.е. количество препятствий на пути движения трещины.**

**Для её распространения нужны большие усилия (работа).**

**$KC \uparrow$   $KCp \uparrow$   $G_{1c} \uparrow$   $(K_{1c}) \uparrow$   $t_{xp} \downarrow$**

**$t_{xp}$  изменяется от  $+90^\circ C$  до  $-100^\circ C$ .**

**Чем более сложную субструктуру имеет металл, тем выше показатели прочности и пластичности.**

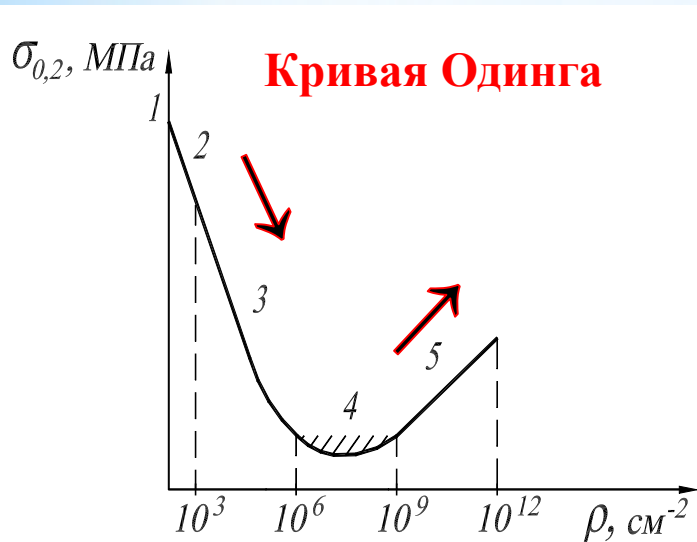


**Развитая субструктура, x5000.**



# ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

Теоретическая прочность железа ~ 30000 МПа, в реальном железе она изменяется от 50 до 250 МПа в зависимости от количества примесей



С увеличением плотности дислокаций прочность сначала снижается, достигает минимальных значений при  $\rho = 10^6 - 10^9$  см<sup>-2</sup>, что соответствует реальному поликристаллическому материалу. Потом начинает повышаться.

**Упрочнение металла можно достичь** как уменьшением, так и повышением плотности дислокаций:

- применением практически бездислокационных усов и нитевидных материалов (области 1-2);
- использованием материалов с высокой плотностью дислокаций после ХПД, термообработки (область 5).





# ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ДИСЛОКАЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ



# **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

- 1. Какие основные факторы влияют на механические свойства металлов и сплавов?**
- 2. Почему основным конструкционным материалом являются металлические сплава, а не чистые металлы?**
- 3. Как влияет размер зерна на механические свойства ?**
- 4. Как влияет плотность дислокаций на показатели прочности?**
- 5. Какими путями можно упрочнить металл, влияя на плотность дислокаций?**



# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какое строение имеет зерно поликристаллического металла?
2. Чему равен размер зерна реального металла?
3. Какие существуют границы в зависимости от угла разориентации зерен?



# **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ**

**1. Как влияет субструктура на механические свойства?**

**2. Как влияют различные дефекты макроструктуры на механические свойства металлов и сплавов?**

**Приведите примеры.**

**3. Какие дефекты относятся к поверхностным и как они влияют на свойства?**



# Литература

- 1.Гладкий И.П.Технология конструкционных материалов и материаловедение : учебное пособие / И.П. Гладкий, В.И. Мощенок, В.П.Тарабанова, Н.А.Лалазарова, Д.Б Глушкова - Харьков: ХНАДУ. 2011.- 460 с. ( стр. 18-26).
- 2.Сологуб М А. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М,А Сологуб, І.О Рожнецький, О.І.Некоз. - К.: Вища школа. 2002. -374 с. (стр.52 – 55).
- \*3.Дьяченко С.С. Материаловедение : учебник / С.С. Дьяченко, И.В Дощечкина, А.А.Мовлян, Э.И. Плешаков.- Харьков: Издательство ХНАДУ, 2010.- 464 с. (стр.49 –73).







## Кафедра технології металлов и материаловедения

Доц. Дощечкина Ирина Васильевна

**E-mail: [div\\_khadi@ukr.net](mailto:div_khadi@ukr.net)**

**Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ**

