



Кристаллизация и строение металлических материалов

**Лекция 3
Поток 1А**

Лектор доц. Дощечкина И .В.

(lect_3_1A_ ТКМ і М _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.**

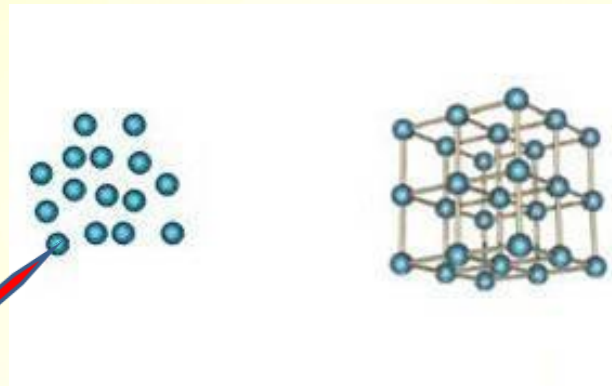


3.1. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Металлы могут существовать в твердом, жидком и газообразном состоянии.

Жидкий металл

находится в аморфном состоянии – атомы расположены беспорядочно – хаотично.

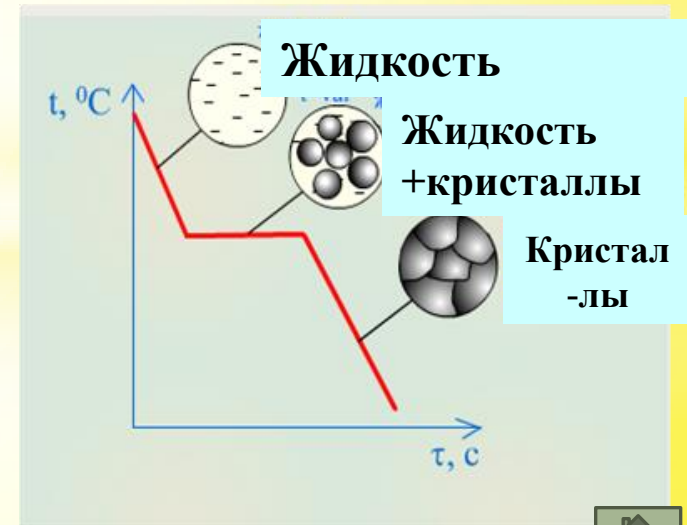


Твердый металл

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.

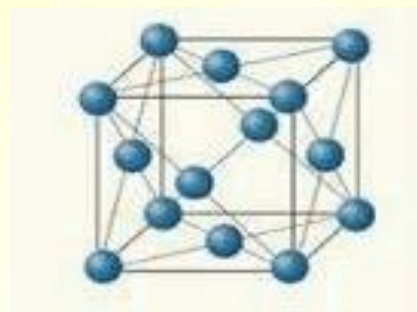
Различают **первичную и вторичную кристаллизацию.**

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

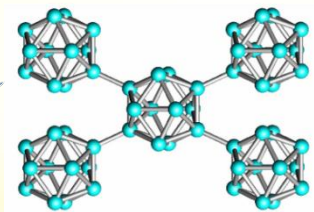
При кристаллизации **формируется кристаллическая решетка** – это закономерное, упорядоченное расположение атомов в пространстве.

Металлы – это кристаллические тела.

Медь

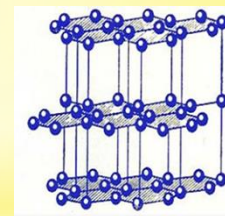
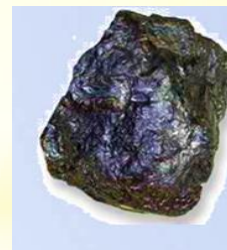


Бор

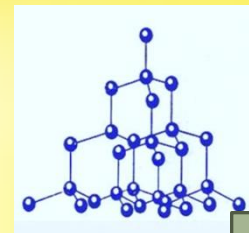


Вторичная

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



Графит



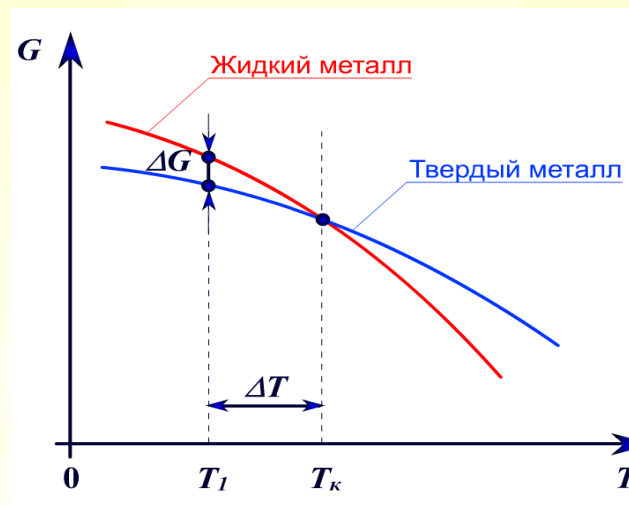
Алмаз



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 $G_{жс} < G_{ТВ}$ – стабилен жидкий металл.



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



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

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 ΔT**

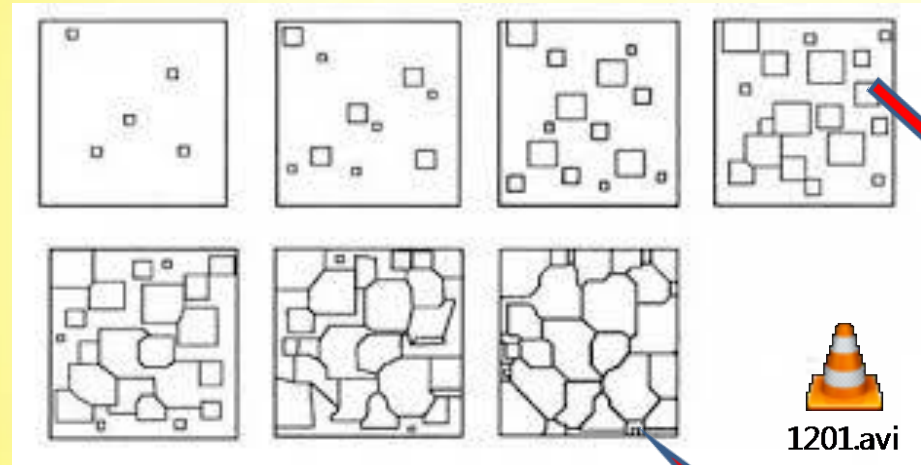
$$\Delta T = T_0 - T_1$$

Степень переохлаждения возрастает с повышением скорости охлаждения

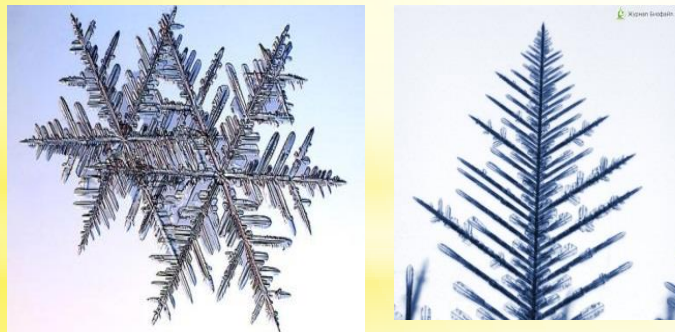
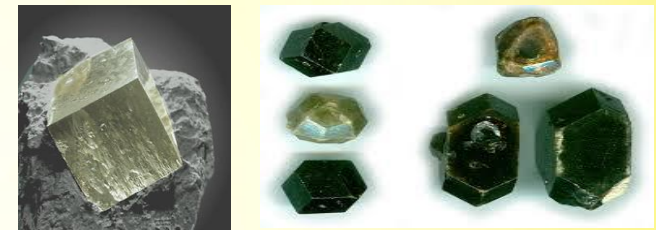


КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

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.

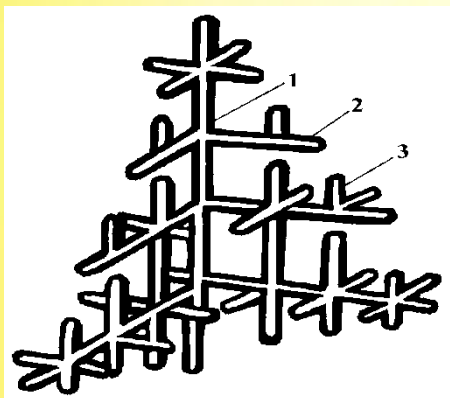
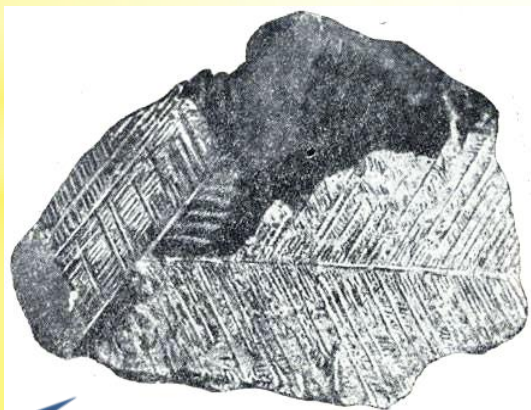
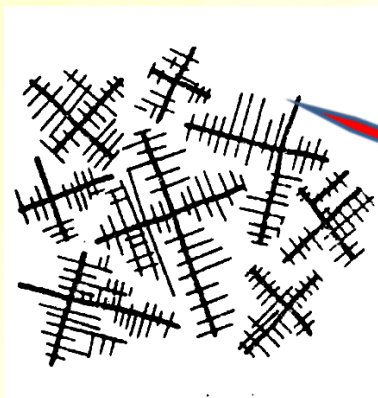


Схема роста дендрита.



Дендриты серебра.

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.

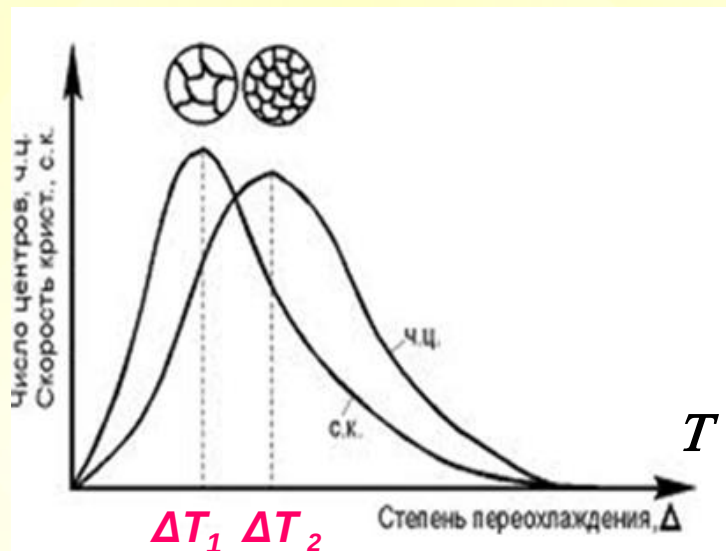
Дендриты растут, сталкиваются, теряют свою форму и **структура становится зернистой**, (полиэдрической).



ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

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

Количество зародышей, образующихся в единице объема за единицу времени.



Скорость роста кристаллов (с.к.) – увеличение их линейного размера за единицу времени.

Оба этих процесса зависят от степени переохлаждения ΔT жидкого металла.

В зависимости от ΔT при кристаллизации может формироваться зерно разного размера.

При ΔT_1 образуется крупное зерно, так как мало центров и большая скорость их роста. При ΔT_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.



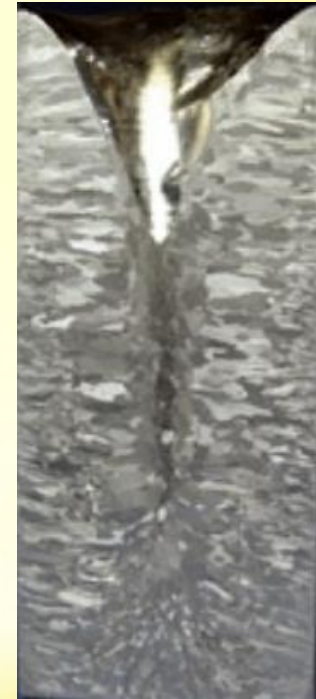
Небольшая
степень
переохлаждения.

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

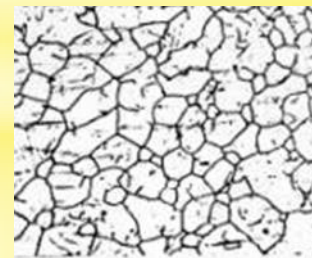
Модифицирование
расплава

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

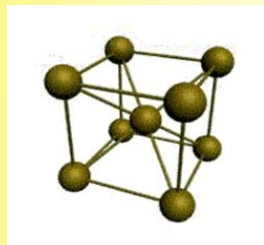
- 1. Что такое кристаллизация? Какое необходимое условие кристаллизации?**
- 2. Какие существуют виды кристаллизации? Какие процессы лежат в основе кристаллизации?**
- 3. Что такое степень переохлаждения? От чего она зависит?**
- 4. Что такое зерно и как оно образуется?**
- 5. Какие кристаллы называют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



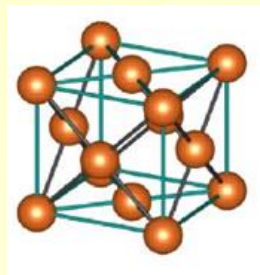
3.2. АТОМНО - КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Каждый металл (сплав) имеет свою **кристаллическую решётку**.

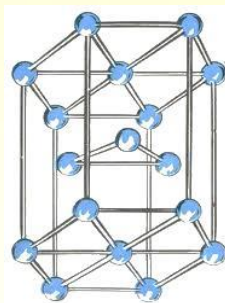
Наиболее распространенные **типы кристаллических решеток**:



1



2



3

1 – **Объемно-центрированная кубическая** решетка (ОЦК) – Fe α , Cr, Mo, W

2 – **Гранецентрированная кубическая** решетка (ГЦК) – Fe γ , Al, Ni, Cu

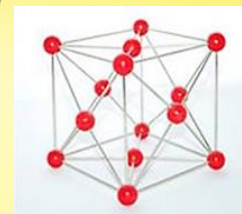
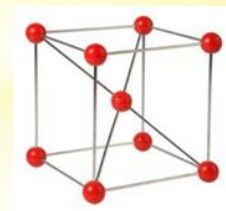
3 – **Гексагональная плотноупакованная** решетка (ГПУ) – Zn, Mg, Co, Ti

Кристаллические формы металла называются **полиморфными модификациями** и обозначаются буквами α , β , γ , начиная с низкотемпературной.

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

α – железо (Fe α)

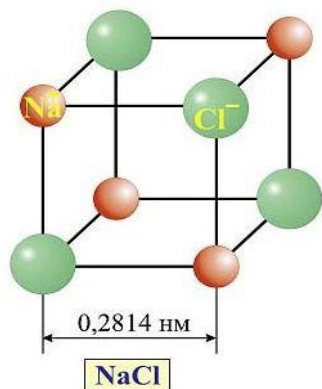
911°C



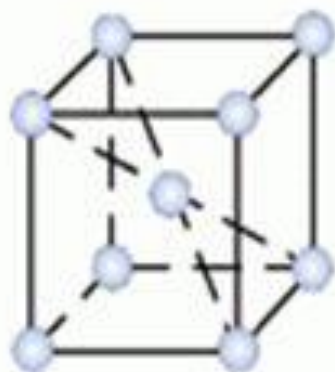
γ – железо (Fe γ)



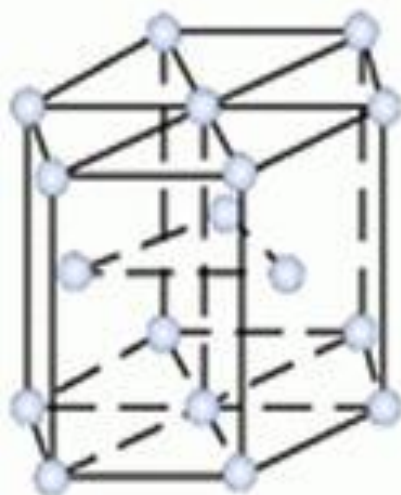
ТИПЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК



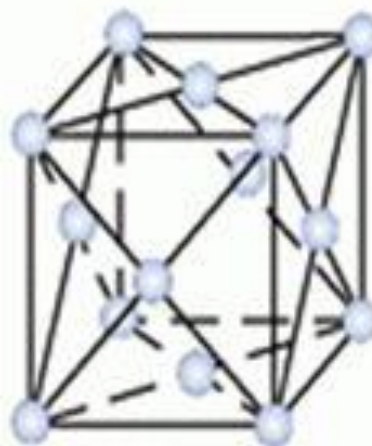
Кубическая



Объемно-центрированного куба (ОЦБ)



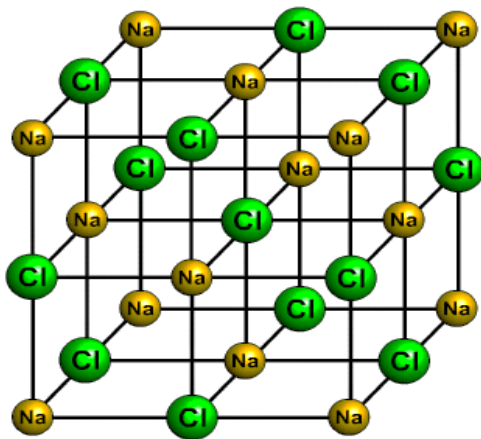
Гексагональная плотнупакованная (ГПУ)



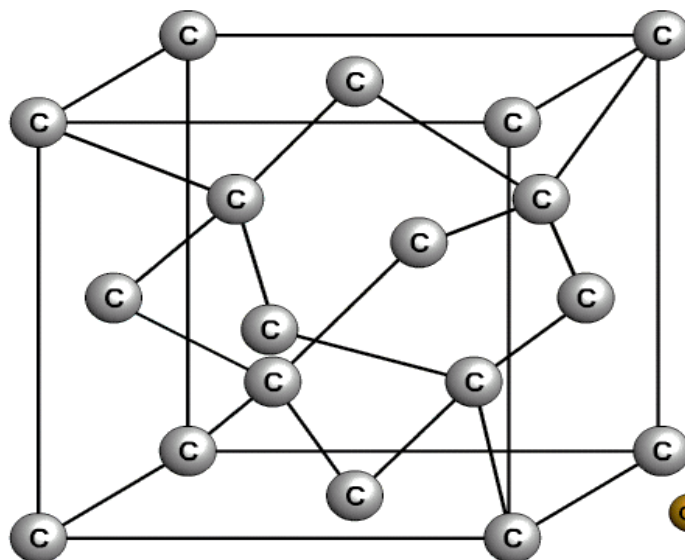
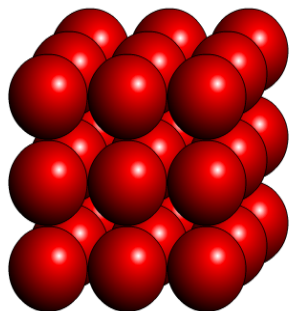
Гранецентрированного куба (ГЦК)



СЛОЖНЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ

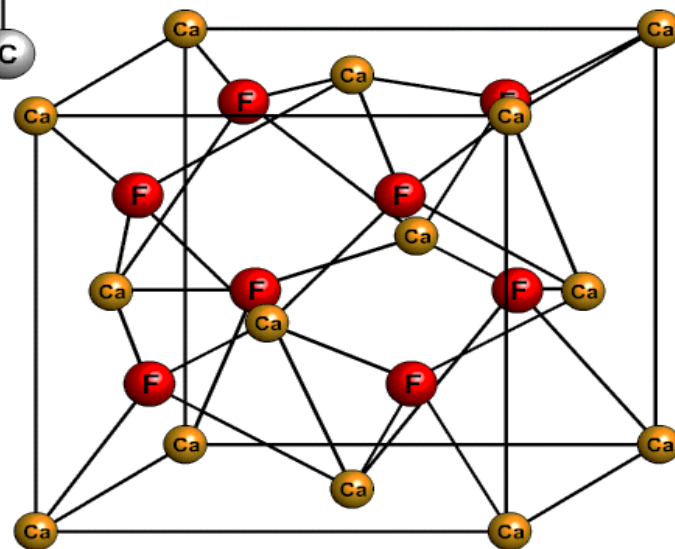
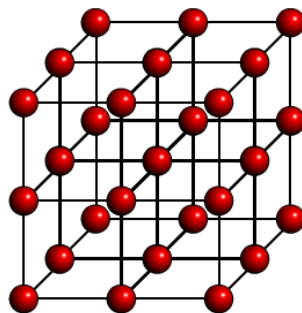


Галит (поваренная соль).
Атомы натрия в вершинах кубической ячейки и в центрах всех граней;
атомы хлора в центре ячейки и в
середирах всех ее ребер.



Алмаз.

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



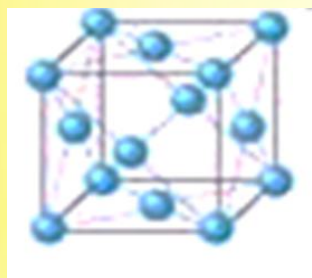
Флюорит.

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

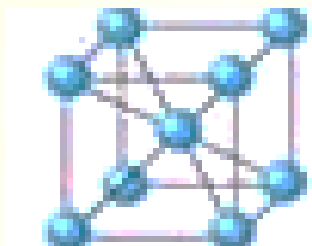
Кубическая
гранецентрированная



ГЦК

Cu, Al, Fe α

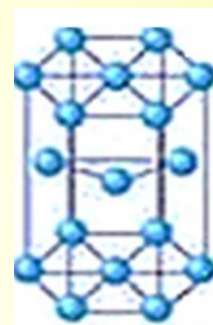
Кубическая
объёмноцентрированная



ОЦК

Li, Na, Fe γ

Гексагональная
плотноупакованная



ГПУ

Mg, Zn, Cr

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?**

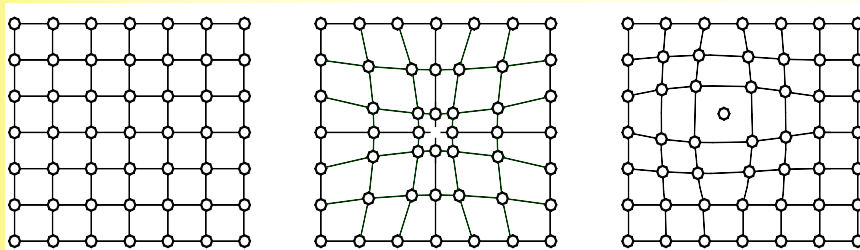


3.3. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

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

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

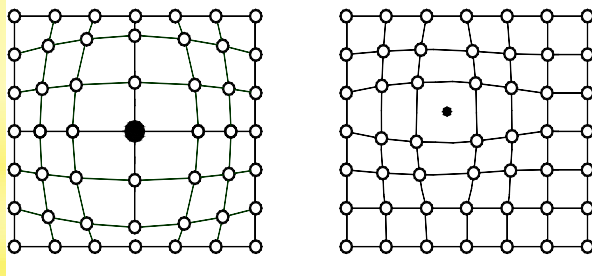
Точечные дефекты.



А

Б

В



Г

Д

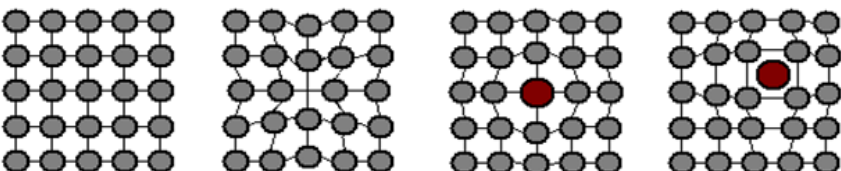
Б- вакансии – незаполненное атомом место в кристаллической решетке;

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

г- примесной атом в узле решетки – атом замещения;

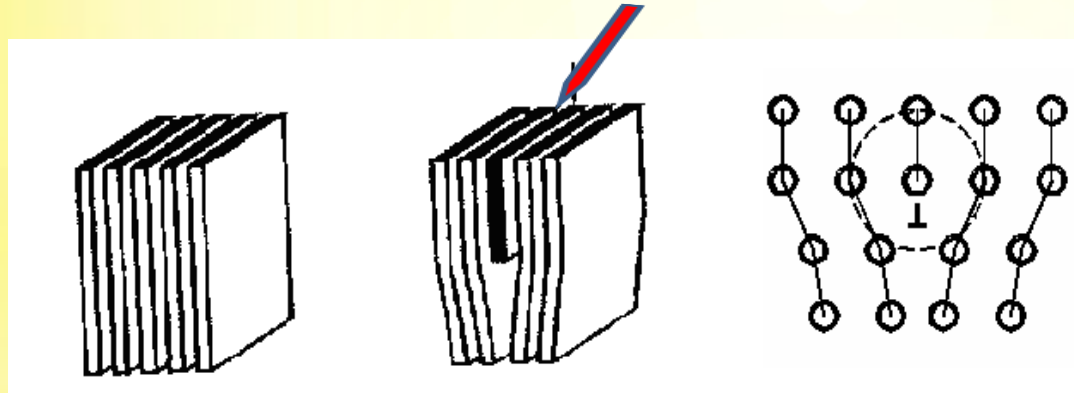
д – примесной атом в междоузлии – атом внедрения

Точечные дефекты практически не изменяют механических свойств, но существенно **влияют 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.



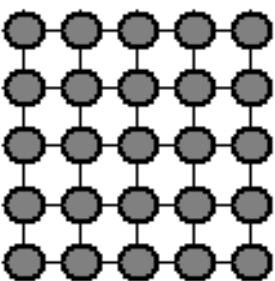
КРАЕВАЯ ДИСЛОКАЦИЯ

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

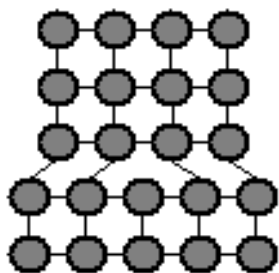
Количество дислокаций в кристалле характеризуется **плотностью дислокаций ρ** .

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

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



а



б

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.



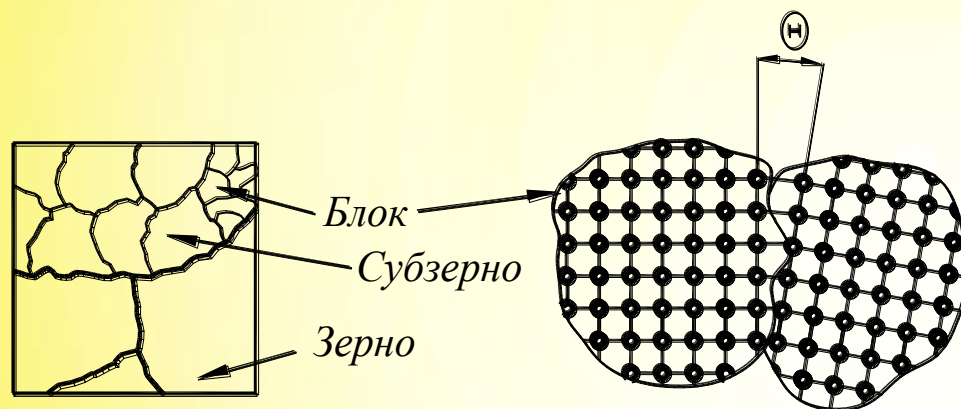
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 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**.

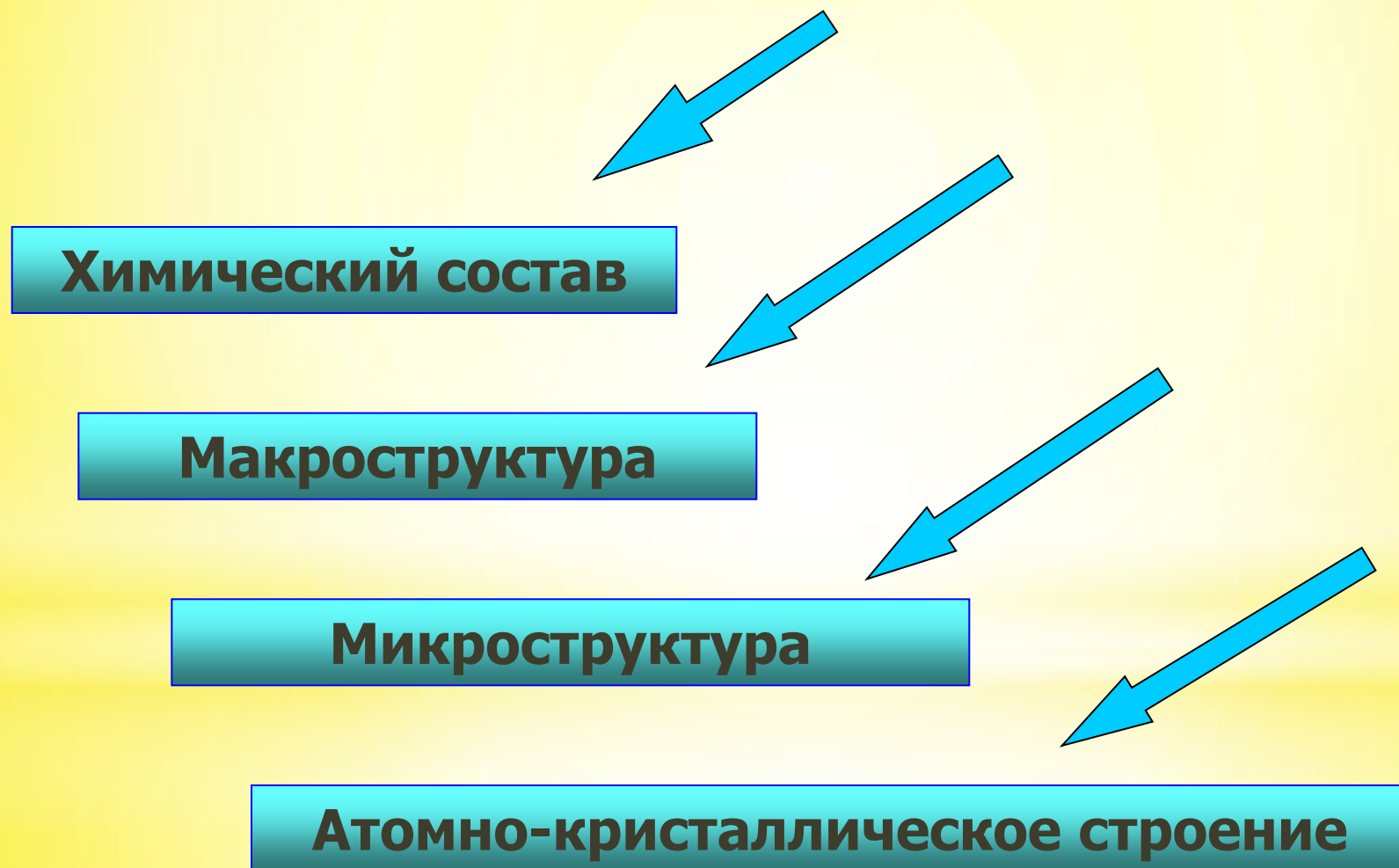


ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

- 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 Fe+0,01%С	147 245
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**.

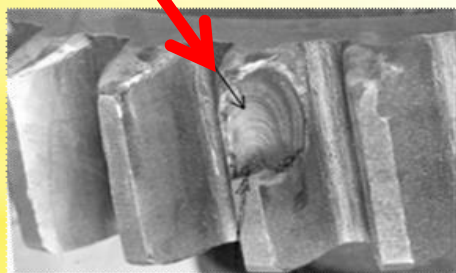
Усталостные изломы деталей автомобиля



Шатунный болт



Щека коленчатого вала



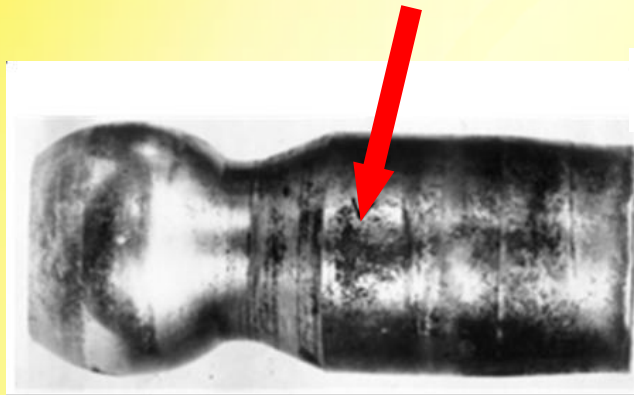
Зуб шестерни

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



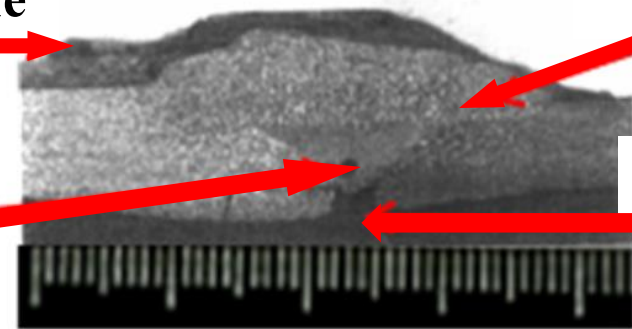
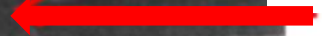
Наплыв



Пора

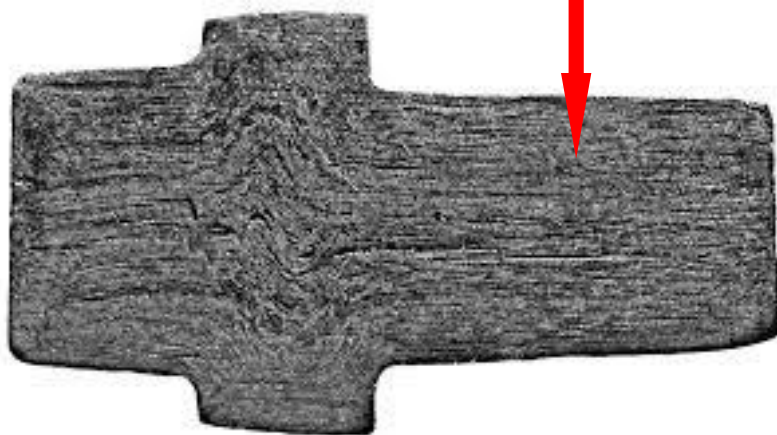


Непровар



Дефекты сварного шва

р



Расположение волокна

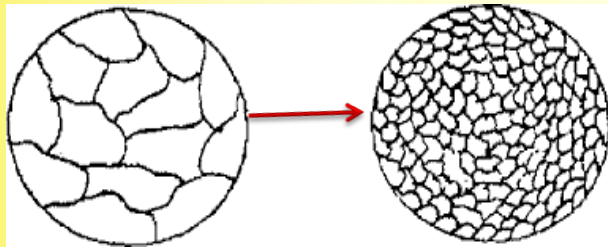
Вдоль волокна пластичность и ударная вязкость **в 3 раза выше**, чем поперёк волокна при сохранении прочности. Волокна должны **повторять контур детали** и не пересекаться.

Внешнее усилие перпендикулярно волокну.



ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

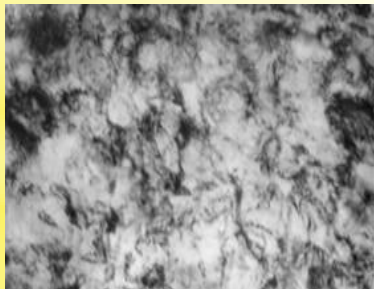
Размер зерна, его субструктурное строение очень сильно ВЛИЯЮТ на механические свойства.



РАЗМЕР ЗЕРНА

20МКМ

1МКМ



Развитая субструктура,
х5000.

С измельчением зерна

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

Для её распространения нужны большие усилия (работа).

$KC \uparrow$ $KCp \uparrow$ $G_1c \uparrow$ $(K_1c) \uparrow$ $t_{xp} \downarrow$

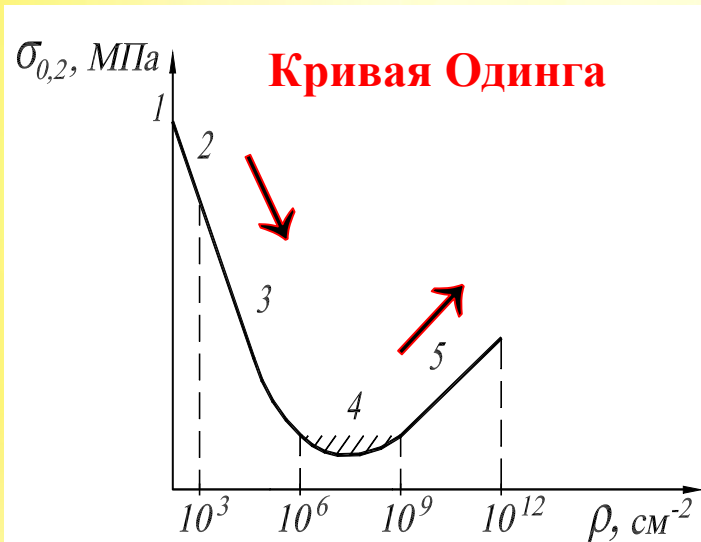
t_{xp} изменяется от $+90^\circ C$ до $-100^\circ C$.

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



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⁻², 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 сплавы, 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 металів и матеріалознавства

Доц. Дощечкина Ирина Васильевна

E-mail: div_khadi@ukr.net

Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ

