



Кристаллизация и строение металлических материалов. Факторы, влияющие на механические свойства металлов и сплавов

Лекция 3

Поток 1А

Лектор доц. Дощечкина И .В.

(lect_3_11МС_ТКМiМ _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

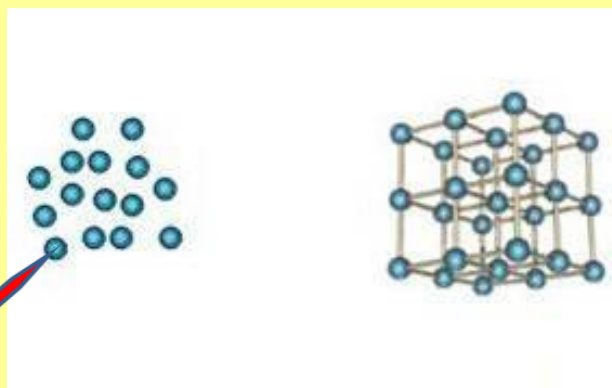
- × **1. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.**
- × **2. Атомно-кристаллическое строение металлов и сплавов.**
- × **3. ДЕФЕКТЫ АТОМНО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.**
- × **4. Дислокации и их влияние на свойства.**

Кристаллизация металлов и

Металлы могут существовать в твердом, жидком и газообразном состоянии.

Жидкий металл

находится в аморфном состоянии – атомы расположены беспорядочно – хаотично.

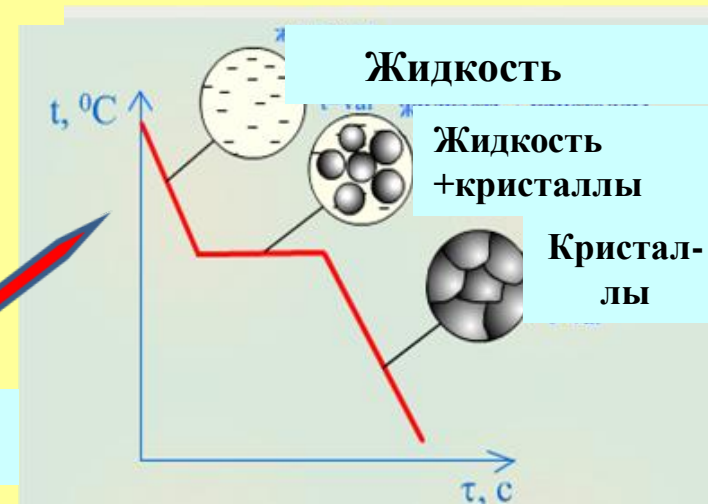


Твердый металл

имеет упорядоченное размещение атомов в пространстве.

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

Металлы – тела кристаллические.

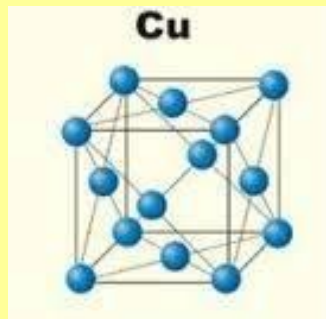


Виды кристаллизации.

Различают **первичную** и **вторичную** кристаллизацию.

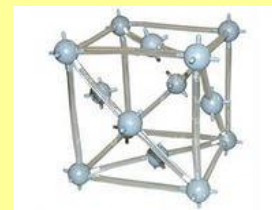
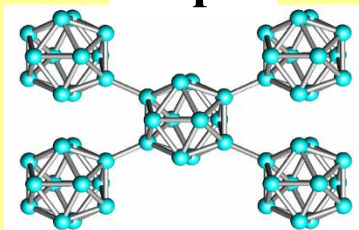
Первичная кристаллизация – это зарождение и рост кристаллов **в жидком состоянии**. Она присуща всем кристаллическим телам, как металлам, так и неметаллам

Mg



Вторичная кристаллизация – это образование **кристаллов нового типа** в уже закристаллизовавшемся материале, т.е. **в твердом состоянии**.

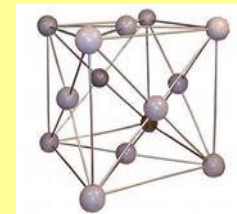
Бор



Железо



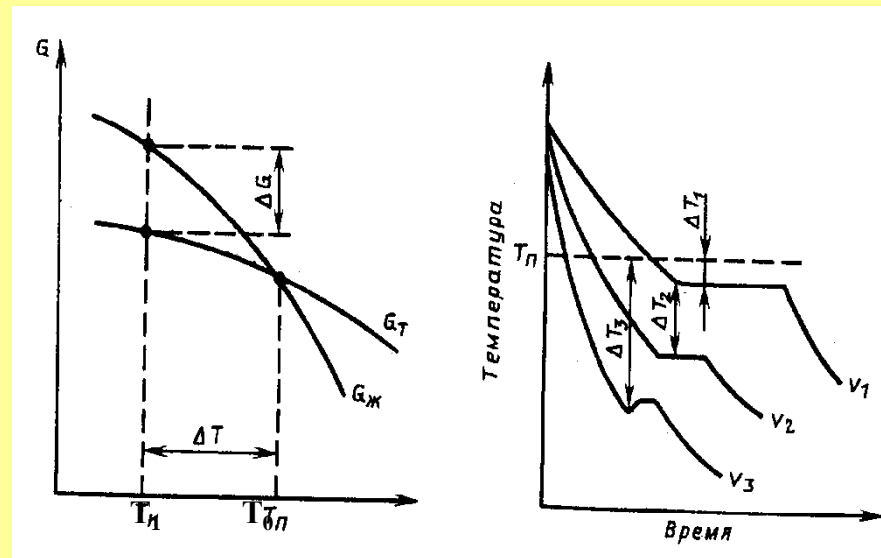
При кристаллизации **формируется кристаллическая решетка** – это закономерное, упорядоченное расположение атомов в пространстве.



Условия 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, поэтому для начала кристаллизации металл надо переохладить до T_1 .

T_1 действительная температура кристаллизации.

Разность между равновесной T_0 и действительной T_1 температурой кристаллизации называется **степенью переохлаждения ΔT** .

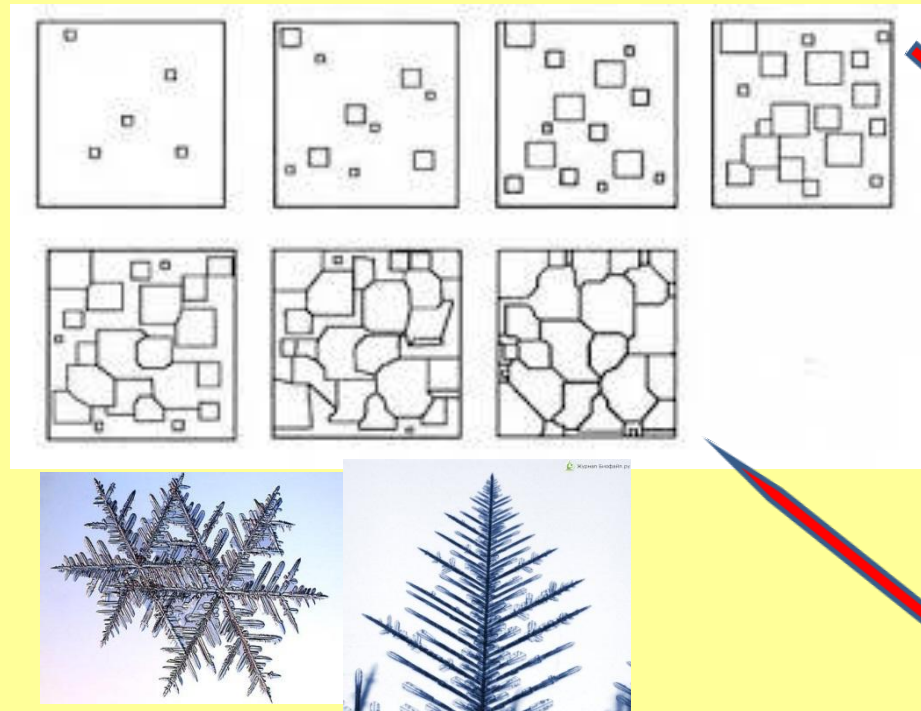
$$\Delta T = T_0 - T_1$$

Степень переохлаждения возрастает с повышением скорости охлаждения.

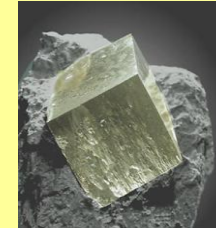
$$(V_1 < V_2 < V_3).$$

Процесс кристаллизации.

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



Форма зародышей зависит от типа кристаллической решетки



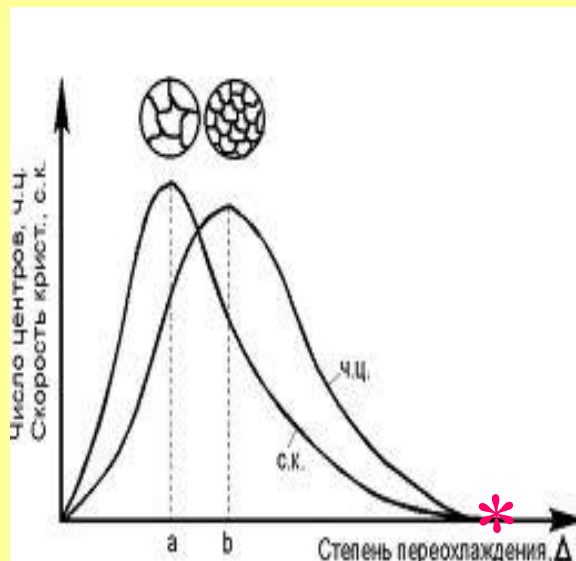
По мере развития процесса кристаллы разрастаются, сталкиваются, теряют свою правильную форму.

Металлы преимущественно кристаллизуются в виде **дендритов** - кристаллов древовидной формы, вследствие неодинаковой скорости их роста в разных направлениях.

По завершению кристаллизации образуются **зёрна** (кристаллиты). **Зерна** - это кристаллы произвольной формы. Часто они имеют вид полиэдров (многоугольников).

Параметры кристаллизации.

Скорость зарождения твердых частиц (чц) - центров кристаллизации. Это количество зародышей, образующихся в единице объема за единицу времени.



Скорость роста кристаллов (с.к.) — это увеличение их линейного размера за единицу времени. Оба этих процесса зависят от степени переохлаждения жидкого металла. При определенном переохлаждении (*****) кристаллы не образуются и металл **затвердевает как аморфное тело - металлическое стекло.**

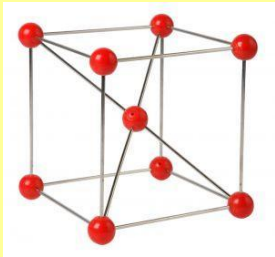
В зависимости от ΔT при кристаллизации может формироваться зерно разного размера.

ЧЕМ МЕЛЬЧЕ ЗЕРНО, ТЕМ ВЫШЕ КОМПЛЕКС МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ.

Атомно – кристаллическое строение металлов

Каждый металл (сплав) имеет определенную кристаллическую решётку.

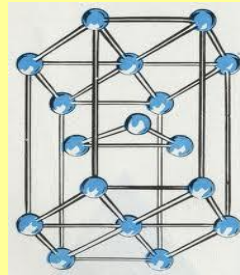
Наиболее распространенные типы кристаллических решеток:



1



2

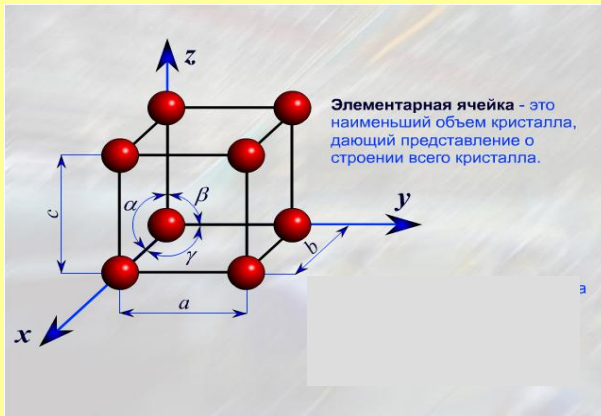


3

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

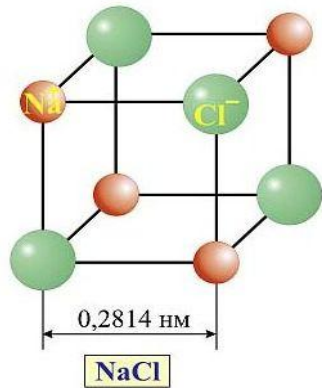
2 – Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК) – Fe γ , Al, Ni, Cu

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

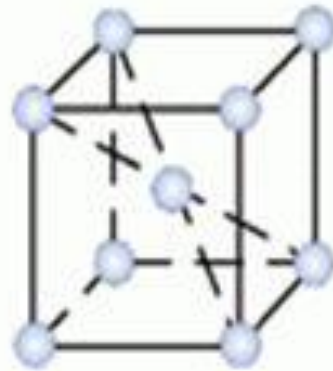


Кристаллические формы металла называются полиморфными модификациями и обозначаются буквами α , β , γ , начиная с низкотемпературной. Переход из одной модификации в другую под влиянием внешних условий (температура, давление) называется полиморфным превращением.

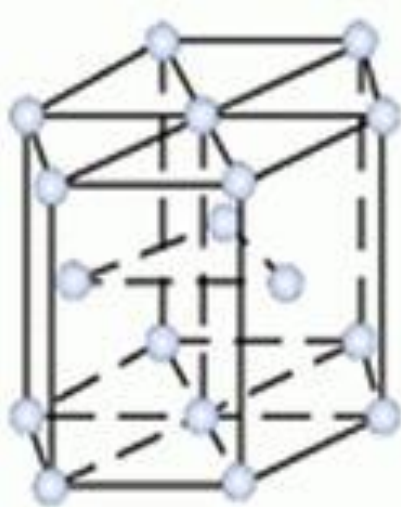
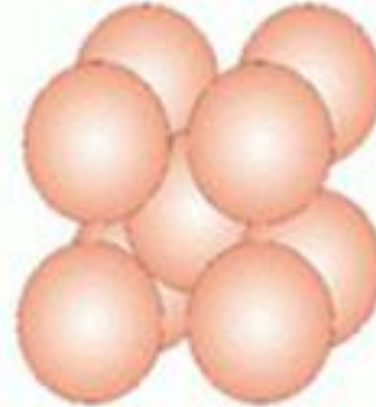
Типы кристаллических решеток



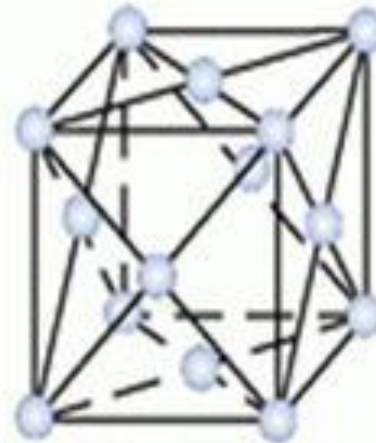
Кубическая



Объемно-центрированного куба (ОЦБ)



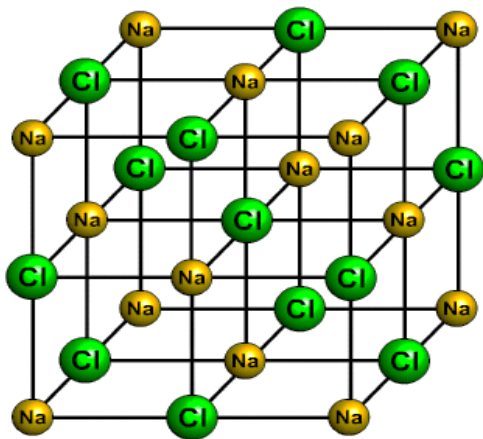
Гексагональная плотноупакованная (ГПУ)



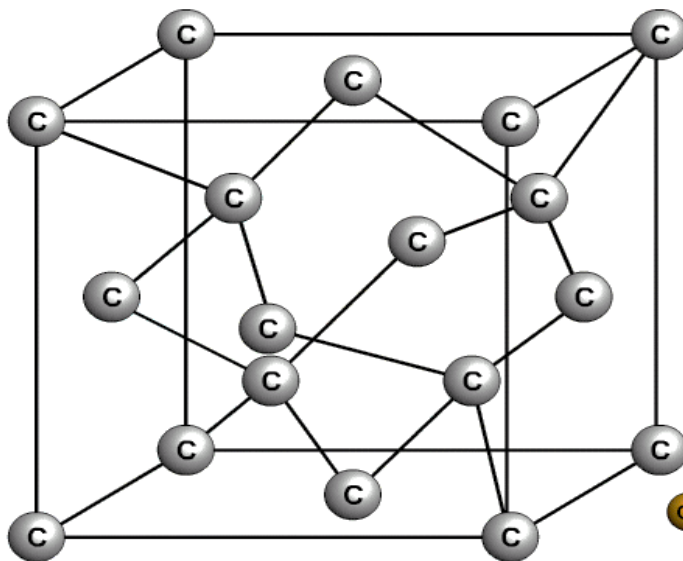
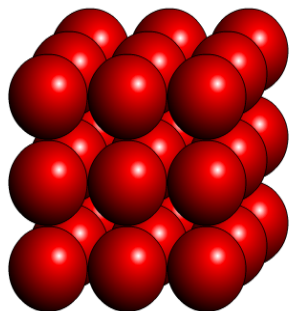
Гранецентрированного куба (ГЦК)



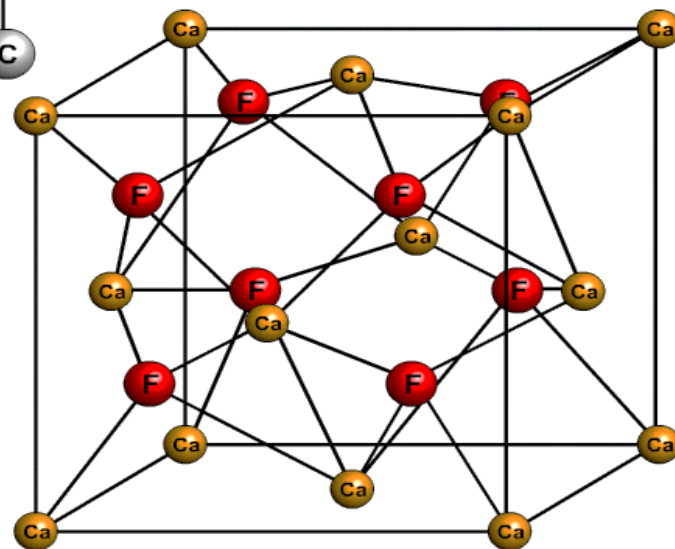
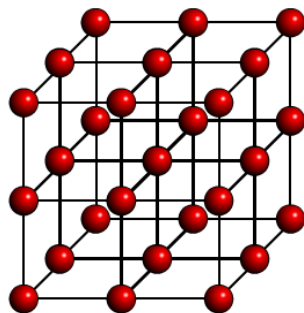
Сложные кристаллические решетки



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.



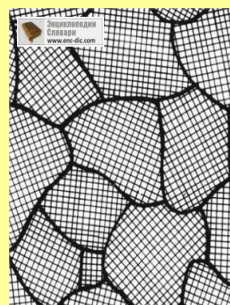
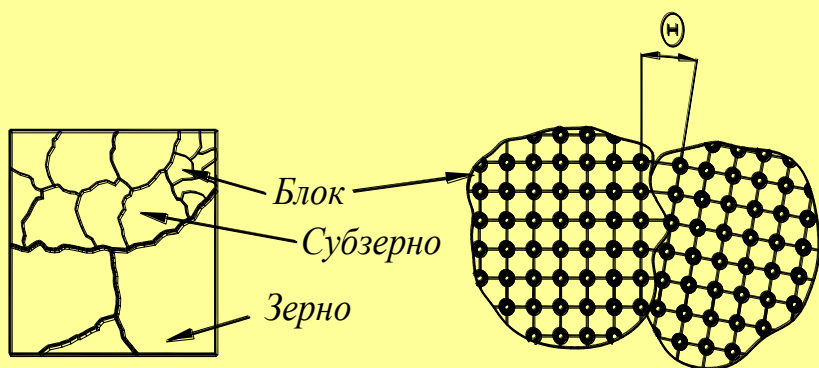
Алмаз.
Атомы углерода в вершинах кубической ячейки, в центрах ее граней и в центрах четырех из восьми октантов (в шахматном порядке).



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

Микроструктура реального металла.

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



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

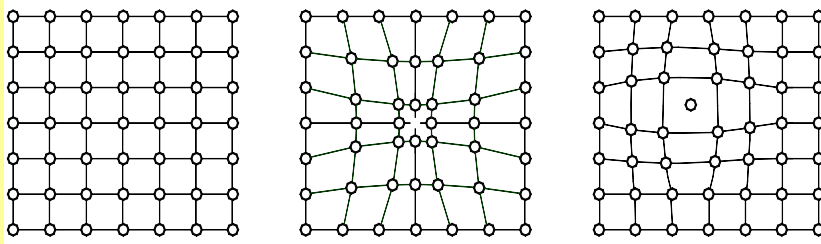
Размер зерна реального металла – 20-50 мкм, субзерен – 3 - 5 мкм, блоков – 0,02 - 0,03 мкм.

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

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

Дефекты кристаллического строения

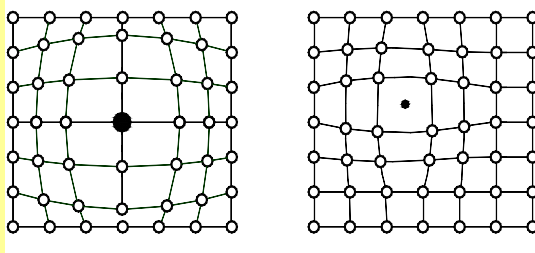
В идеальном кристалле решетка не имеет дефектов кристаллического строения. В реальном металле всегда есть **дефекты: точечные, линейные, поверхностные.**



А

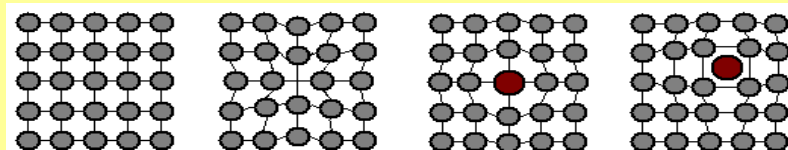
Б

В



Г

Д



К точечным дефектам относятся:
б- вакансии и – незаполненное атомом место в кристаллической решетке;

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

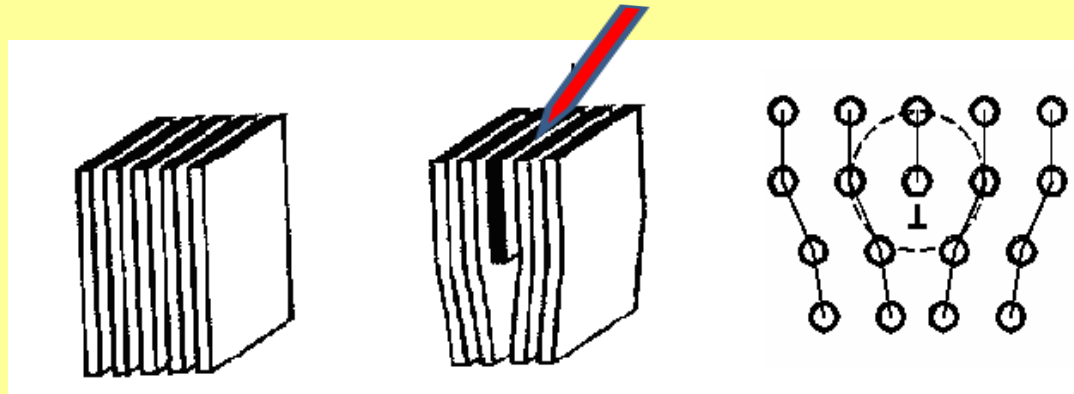
г- примесной атом в узле решетки – атом замещения;

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 металлов.

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.

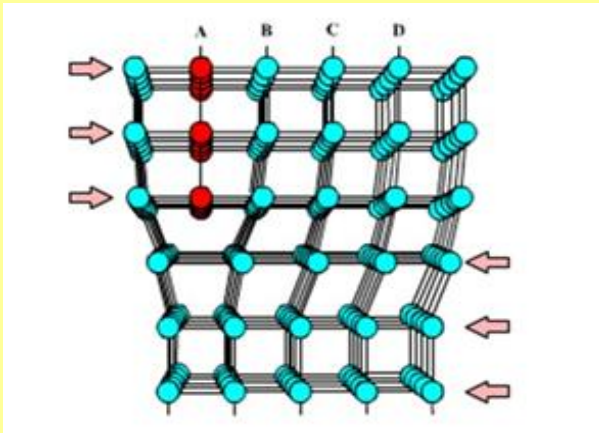
Дополнительная атомная плоскость в верхней части кристалла называется **экстраплоскостью**

Дислокации обозначаются значком \perp .

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

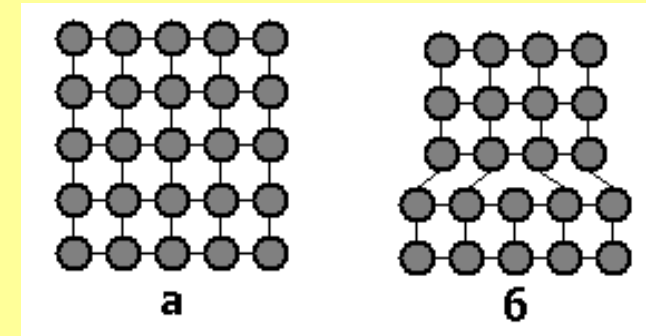
Краевая дислокация

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

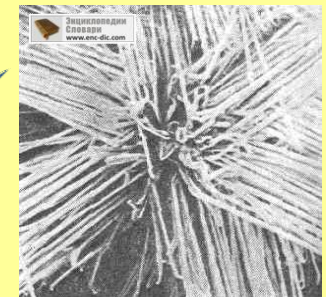


Количество дислокаций в кристалле характеризуется плотностью дислокаций ρ . Плотность дислокаций – это общая длина дислокационных линий в единице объёма материала.

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



Современные методы позволяют вырастить 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 реальном металле



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



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

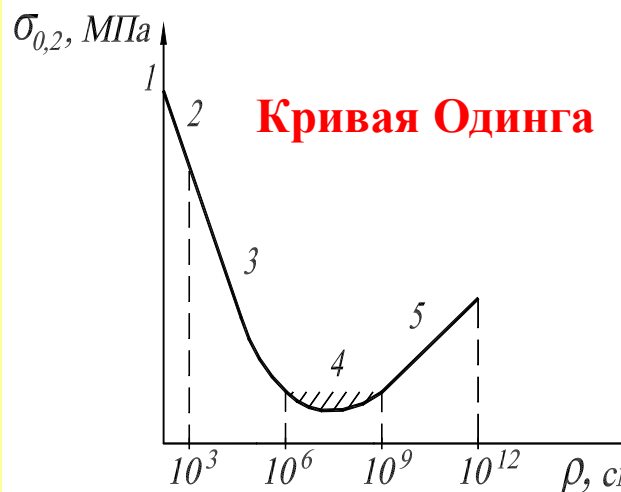


В деформированном или термически упрочненном металле $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$

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

Влияние дислокаций на прочность.

Теоретическая прочность железа – 30000 МПа, а в реальном железе прочность изменяется от 50 до 200 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, а потом начинает повышаться.

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

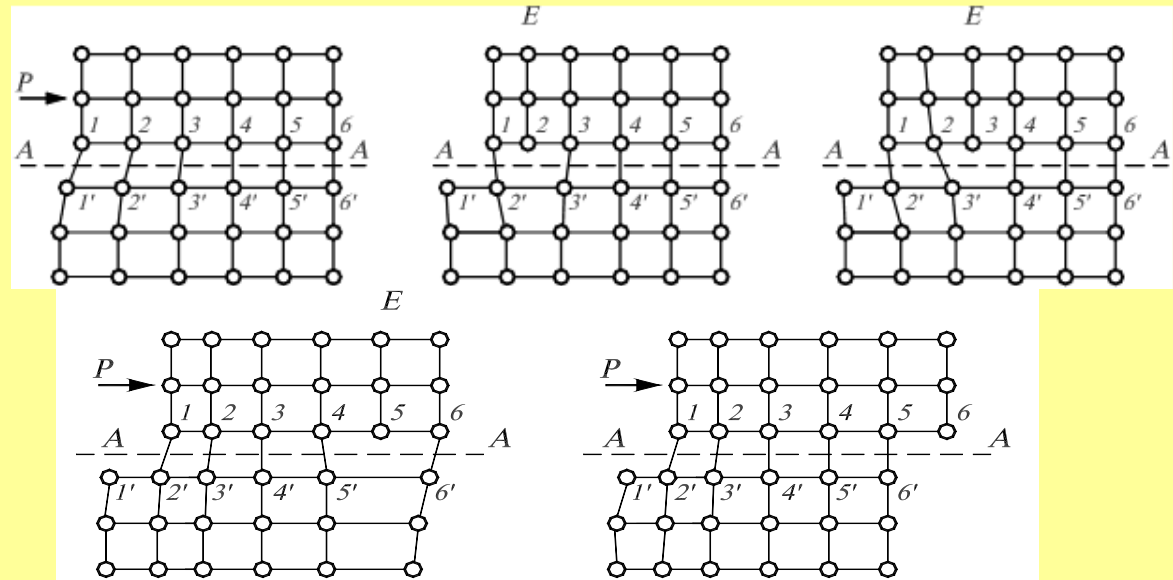
- применением практически бездислокационных нитевидных материалов (область 1-2);
- использованием материалов с высокой плотностью дислокаций после ХПД, термообработки (область 5).

Влияние количества дислокаций в разных материалах на их прочность.



Механизм пластической деформации

Экстроплоскость
A-A не связана с
нижней частью
кристалла и
является
довольно
подвижной



Плоскость, вдоль которой
перемещаются дислокации — **плоскость**
скольжения.

В реальном металле **пластическая деформация** — это
следствие движения дислокаций. Дислокации
значительно облегчают сдвиг плоскостей.

**Для повышения пластичности необходимо
облегчить движение дислокаций.**

**Для увеличения прочности надо
тормозить препятствиями движение
дислокаций.**

**Если взаимное торможение дислокаций очень сильное,
металл охрупчивается.**

**Для получения высоких значений прочности при
сохранении требуемой пластичности необходимо иметь
полупроницаемые препятствия на пути движения
дислокаций. Такими барьерами являются
среднеугловые границы, примесные атомы, дисперсные
частицы.**

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ



ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

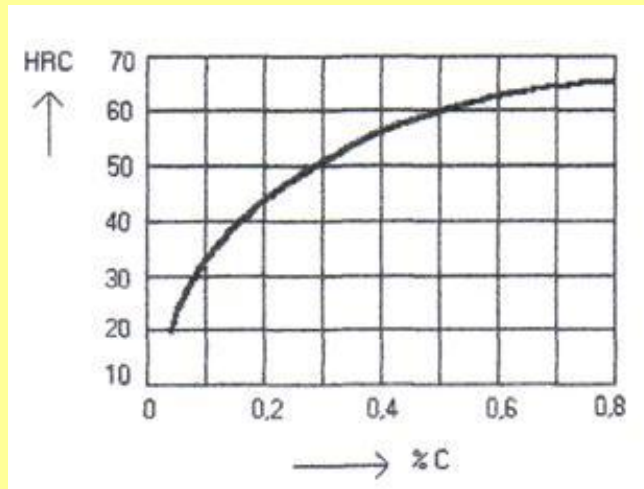
Химсостав – важнейший фактор, влияющий на свойства металлов.

№	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

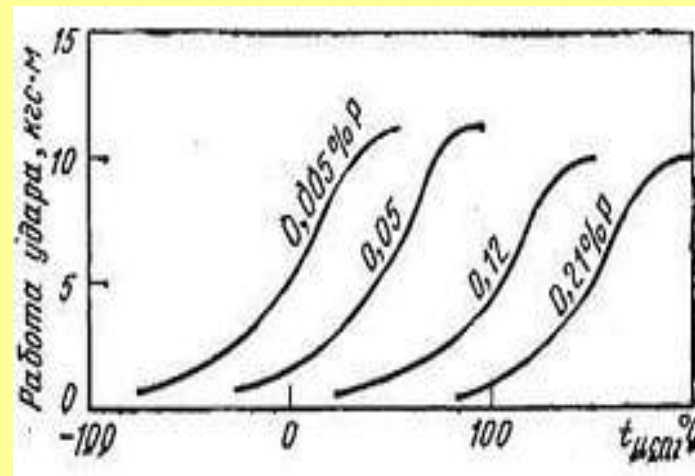
Основным конструкционным материалом являются металлические **сплавы**, так они **прочнее** чистых металлов. Наибольшее применение находят **стали**.

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА НА СВОЙСТВА

Увеличение концентрации углерода в стали приводит к **повышению твердости и хрупкости.**



С повышением содержания углерода **уменьшается ударная вязкость и снижается сопротивление хрупкому разрушению**

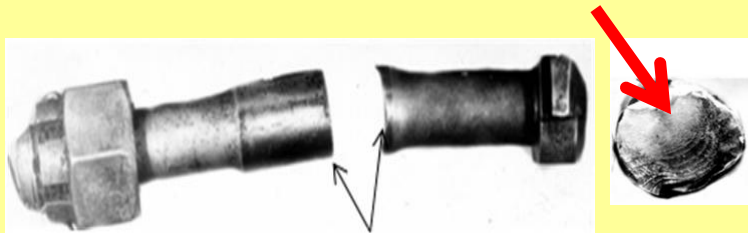


Углерод оказывает определяющее влияние на механические свойства стали.

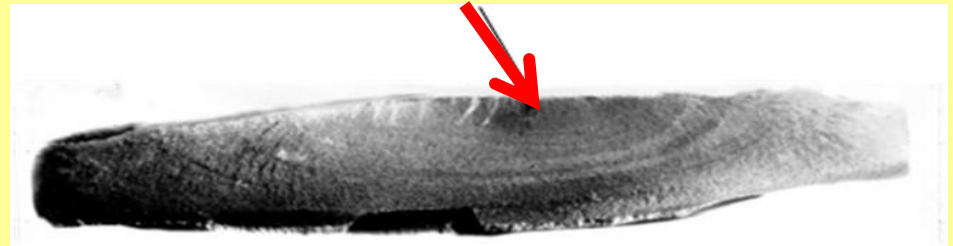
ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА

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

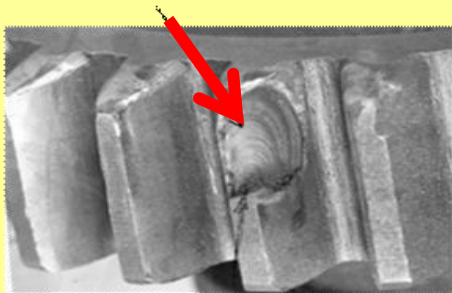
Усталостные изломы деталей автомобиля



Шатунный болт



Щека коленчатого вала

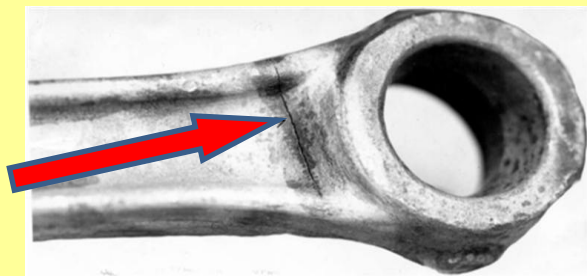


Зуб шестерни

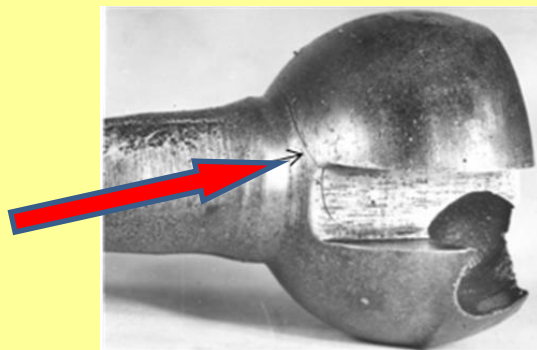
Причиной усталостного разрушения является усталость металла, возникающая при эксплуатации изделия в условиях циклических нагрузок.

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

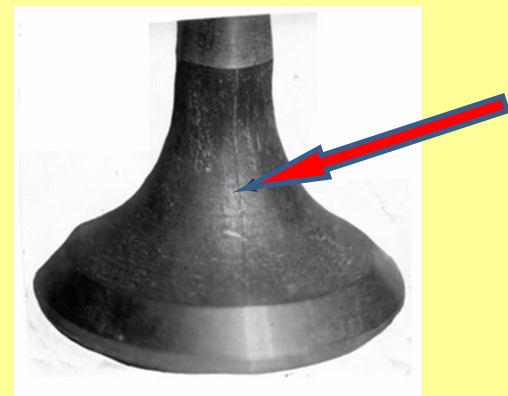
ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА



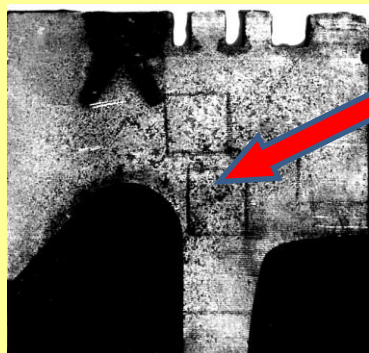
Раскрытие газового пузыря при штамповке шатуна



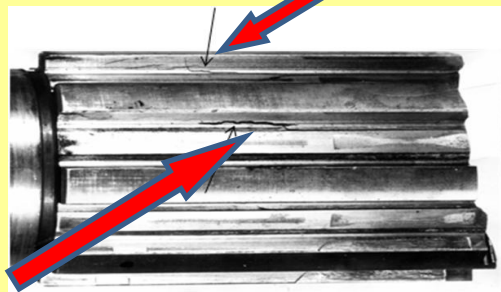
Закалочная трещина в шаровом пальце



Волосовина на тарелке впускного клапана



Пористость в поршне

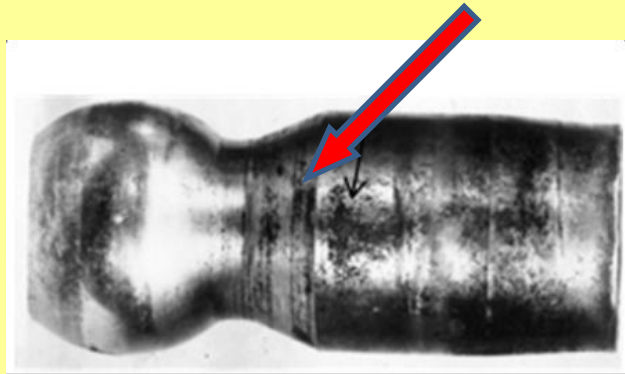


Шлифовочные трещины на поверхности шестерни



Волосовина на витке пружины

ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА



Абразивный износ шарового пальца

Припекание



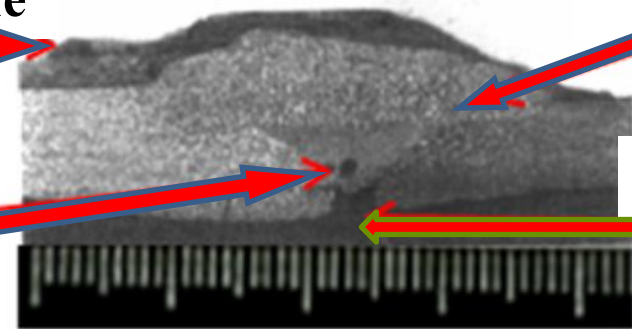
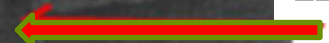
Пора



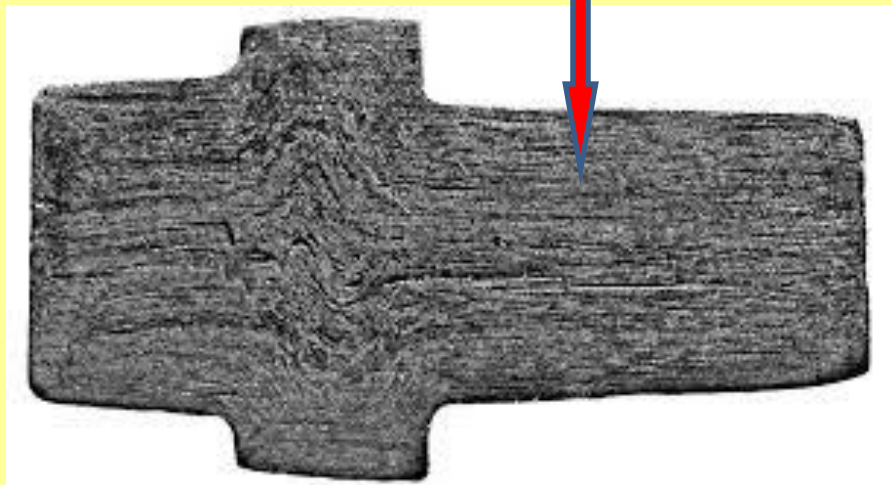
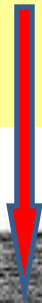
Наплыв



Непровар



Дефекты сварного шва



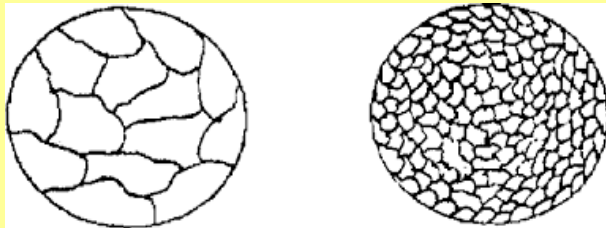
Вдоль волокна

пластичность и ударная вязкость **в 3 раза выше**, чем поперёк волокна при сохранении прочности.

Волокна должны **повторять контур детали** и не пересекаться.

Влияние микроструктуры на свойства металлов.

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



РАЗМЕР ЗЕРНА
20МКМ

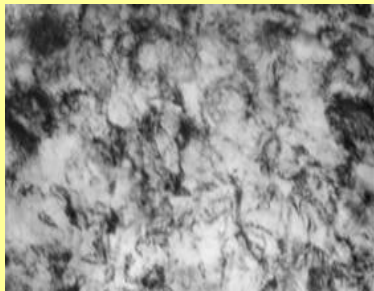
1МКМ

С измельчением зерна увеличивается поверхность границ зерен, т.е. препятствий на пути трещины, и для ее распространения надо прикладывать большие усилия:

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

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

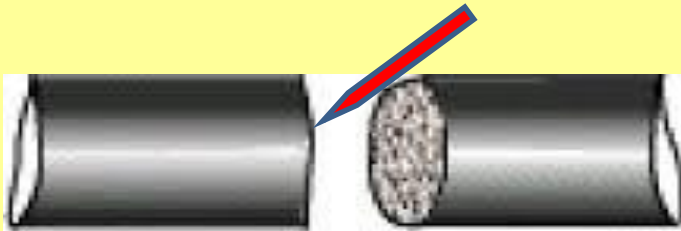
Чем более сложную субструктуру имеет металл, тем выше показатели прочности и пластичности.



Развитая субструктура,
x5000.

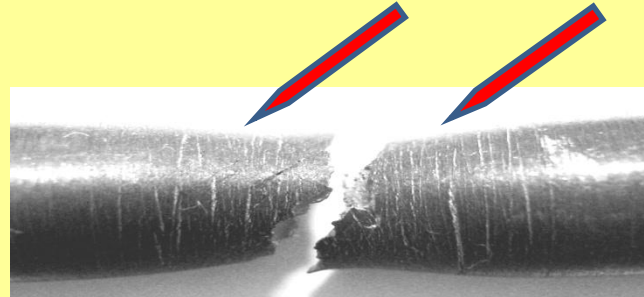
Отмеченное **повышение** комплекса **механических свойств** обусловлено **присутствием дислокаций** и их свойствами,

Хрупкое разрушение.



Разрушение отрывом, без
видимой деформации

Вязкое разрушение.



Разрушению предшествовала
деформация – образовалась шейка



Излом кристаллический,
блестящий

Излом волокнистый,
матовый

Квазихрупкое разрушение.

Поверхностный слой
вала **хрупкий** -
упрочненный, обладает
высокой твердостью и
износостойкостью.

Сердцевина – вязкая с
запасом пластичности,
чтобы воспринимать
ударные и циклические
нагрузки.



Участок вязкой
составляющей

Хрупкая
составляющая

Смешанный излом

Соотношение хрупкой и вязкой составляющих в изломе является показателем склонности материала к хрупкому разрушению, т.е. косвенной оценкой его надежности.

Трещиностойкость – свойство материала с трещиной противостоять разрушению, т.е. оказывать сопротивление продвижению трещины. **Есть два основных параметра трещиностойкости:**

Вязкость разрушения:

G_{1c} [Н/м] – сила, необходимая для продвижения трещины

l на единицу длины при напряжении σ

$$G_{1c} = \frac{\pi \cdot l \cdot \sigma^2}{E}$$

$$l_{кр} = \frac{E \cdot G_{1c}}{\pi \sigma^2}$$

$$\sigma_{кр} = \sqrt{\frac{G_{1c} \cdot E}{\pi \cdot l}}$$

Коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_{1c} = \frac{E \cdot G_{1c}}{(1 - \mu)} \left[\text{МПа/м}^{1/2} \right]$$

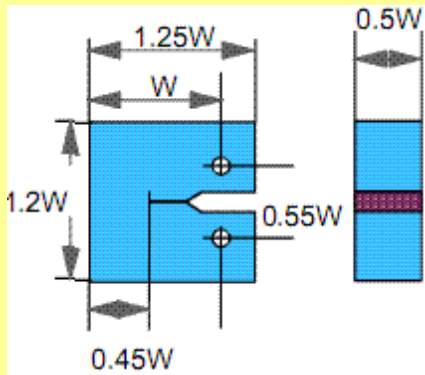
E – модуль упругости;

μ – коэффициент Пуассона

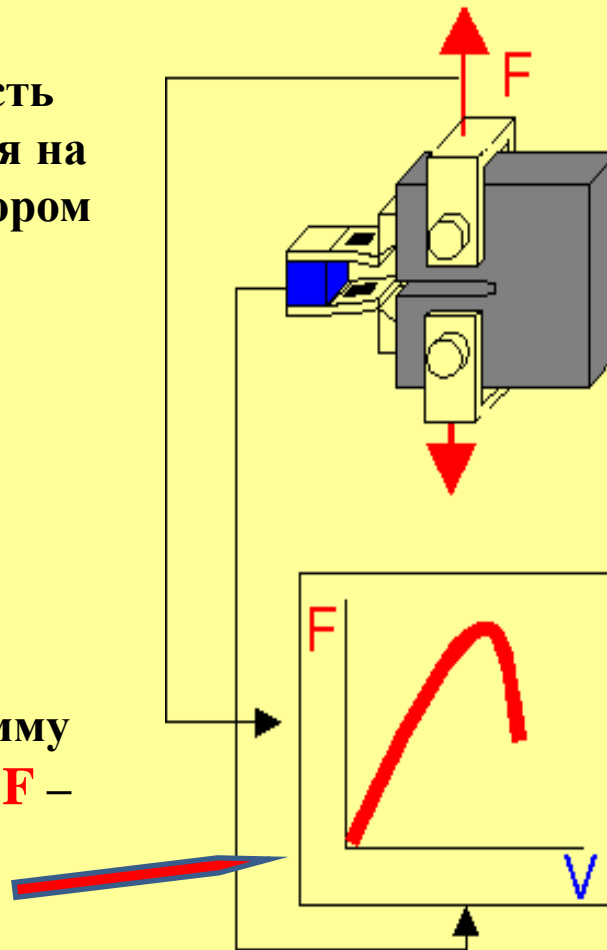
Показатели трещиностойкости позволяют определить критическую длину трещины **$l_{кр}$** , которая приведет к разрушению при действующем напряжении **σ** , или критическое максимальное напряжение **$\sigma_{кр}$** , которое выдержит изделие без разрушения при данной длине трещины.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

Испытания на вязкость разрушения проводятся на образцах с концентратором напряжений



Записывают диаграмму « приложенная сила F – скорость раскрытия трещины V ».

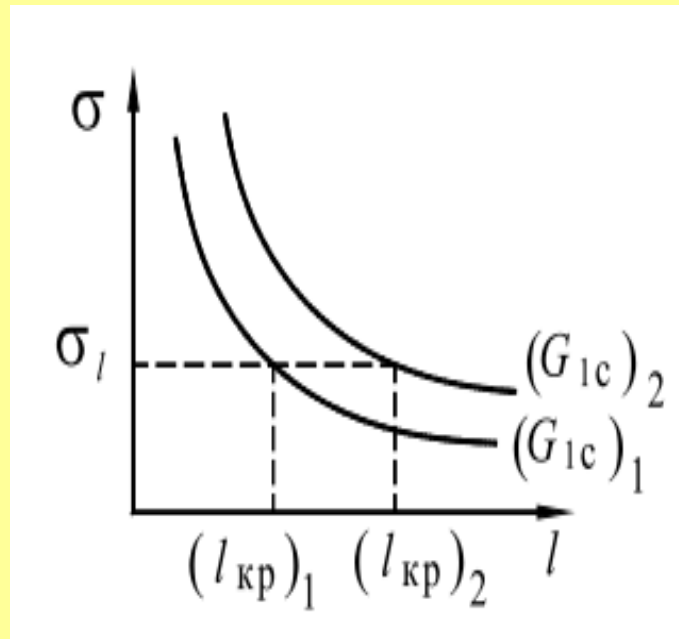


Трещиностойкость определяют для ответственных конструкций, работающих в сложно-напряженном состоянии под высокими ударными и циклическими нагрузками. Так как испытания сложные, то оценку работоспособности изделий производят по значениям K_{Cp} .

Значения работы развития трещины K_{Cp} на качественном уровне позволяют судить о способности материала сопротивляться хрупкому разрушению.

Существует связь между разрушающим напряжением и длиной трещины.

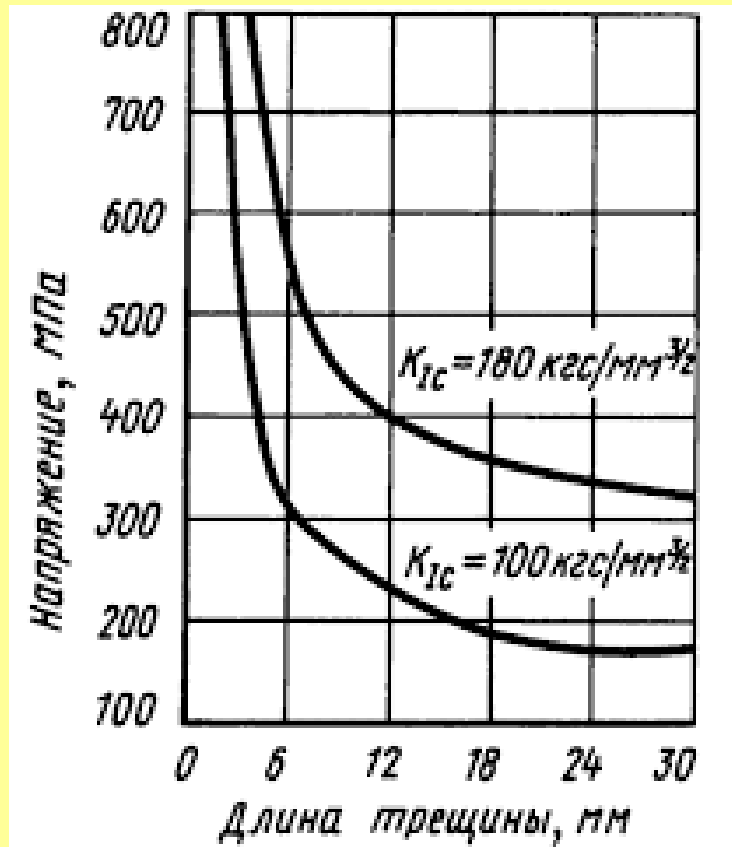
Один материал имеет вязкость разрушения G_{IC1} и при напряжении σ_1 трещина достигает длины $l_{кр1}$.



Второй материал имеет вязкость разрушения G_{IC2} и при напряжении σ_1 трещина достигает длины $l_{кр2}$.

Чем выше вязкость разрушения, тем больше критическая длина трещины при данном уровне напряжений и меньше вероятность хрупкого разрушения.

Связь между разрушающим напряжением и длиной трещины



Пример: При уровне напряжений 400 МПа сталь с $K_{1c} = 100$ кгс/мм^{3/2} может эксплуатироваться до длины трещины не более 4 мм, а с $K_{1c} = 180$ кгс/мм^{3/2} – до 12 мм. Вероятность неконтролируемого хрупкого разрушения в первом случае выше, чем во втором.

Надежность выше у изделия, изготовленного из материала, имеющего больший коэффициент интенсивности напряжений.

Критерии надежности и долговечности.

Надежность материала определяется его способностью противостоять возникновению внезапного отказа, который является следствием хрупкого разрушения.

Критерии надежности: трещиностойкость, работа развития трещины и температура вязко – хрупкого перехода.

$$G_{1c}, K_{1c}, K_{Ic}, T_{кр}$$

Долговечность определяется способностью материала сопротивляться постепенному отказу, когда изделие теряет свою работоспособность. Главным образом, это сопротивление изнашиванию, усталостному разрушению и коррозии.

Критерии долговечности: износостойкость, предел выносливости, циклическая долговечность, живучесть и коррозионная стойкость

$$I, \sigma_{-1}, N, N_{ж}, K$$

КОНСТРУКЦИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ (КП) МАТЕРИАЛА

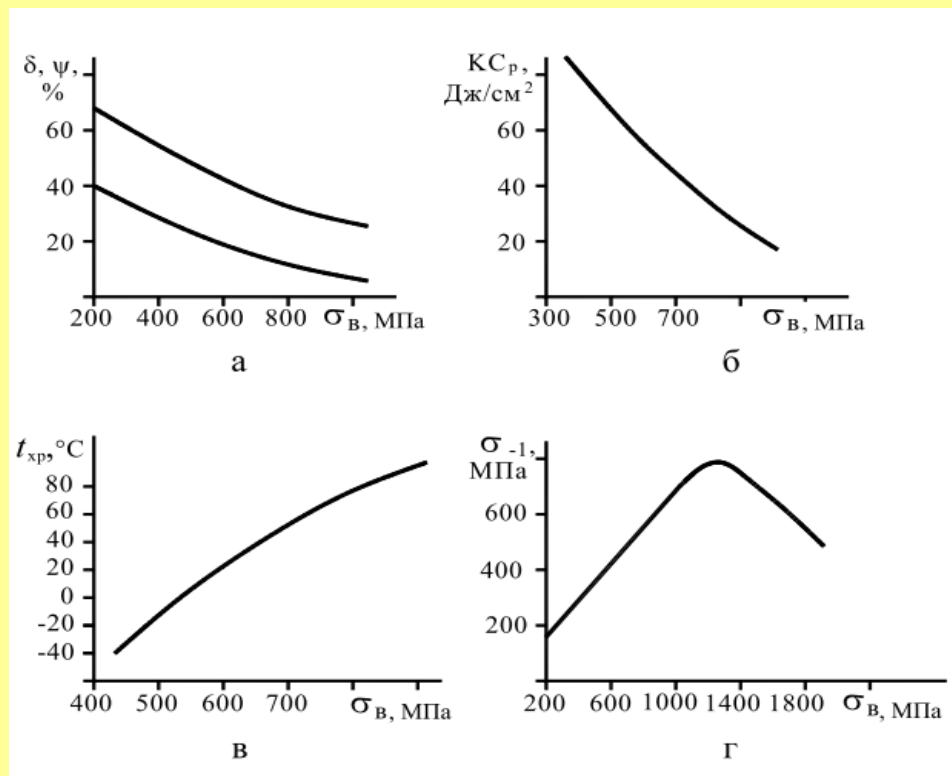
Конструкционная прочность – комплекс показателей, определяющих работоспособность материала конкретного изделия в данных условиях эксплуатации.

КП характеризует как свойства самого материала, так надежность и долговечность его работы в данной конструкции.

$\sigma_B \uparrow$; $\sigma_{0,2} \uparrow$; $\sigma_{-1} \uparrow$; $\delta \uparrow$; $\psi \uparrow$; $K_{CS} \uparrow$; $K_{CSz} \uparrow$;
 $K_{CSp} \uparrow$; $t_{xp} \downarrow$; $N \uparrow$; $N_{жс} \uparrow$; $G_{1c} (K_{1c}) \uparrow$; $I \uparrow$.

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СВОЙСТВАМИ

Одновременно достичь высоких показателей прочности, пластичности, ударной вязкости, циклической долговечности, живучести, критериев трещиностойкости, износостойкости и низкого порога хладноломкости очень сложно. Для этого нужны специальные методы обработки материала.



Такой характер изменения свойств обусловлен наличием в реальном материале дефектов кристаллического строения и их различным влиянием на показатели конструкционной прочности.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

- × **Прочность** – свойство материала сопротивляться деформации и разрушению.
- × **Конструкционная прочность** – комплекс свойств, определяющих работоспособность материала конкретного изделия в данных условиях эксплуатации.
 - × **Конструктивная прочность** – это свойства изделия, определяющие его работоспособность.
- Термины «прочность» и «конструкционная прочность» - это характеристики свойств материала.
- × Термин «конструктивная прочность» - характеристики конкретного изделия из данного материала.

Вопросы для самостоятельной работы

- ✘ 1. Пути упрочнения металла, исходя из плотности дислокаций.
- ✘ 2. Основные конструкционные материалы.
- ✘ 3. Влияние дефектов кристаллического строения на свойства материалов..

Литература

- ✘ 1. 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).
- ✘ 2. 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.4-7, 18 – 27).



Кафедра технології металів и
матеріалознавства

Доц. Дощечкина Ирина Васильевна

E-mail: div_khadi@ukr.net

Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ

