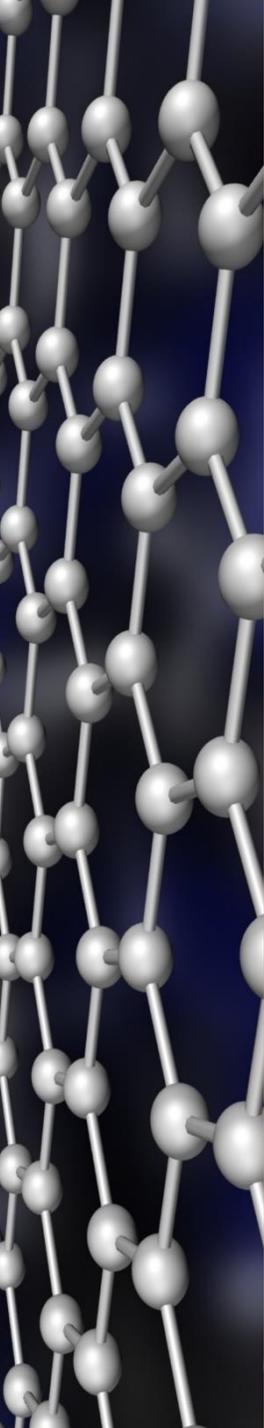


МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

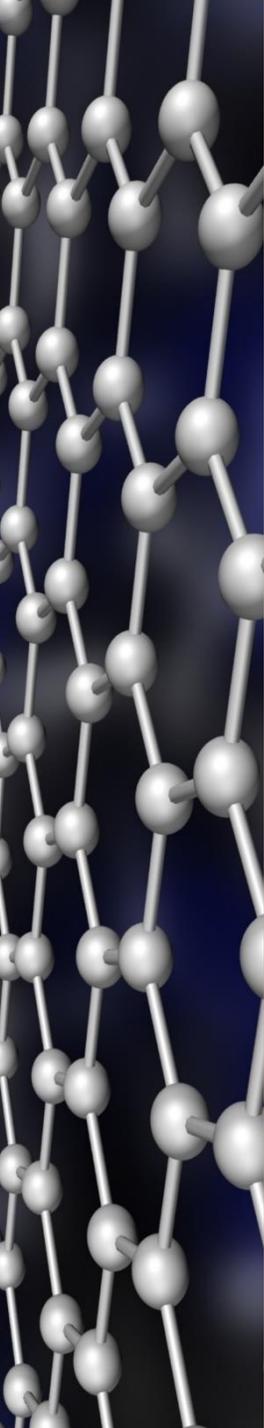
Лекция 3. Механические свойства. Деформация металлов и разрушение

КЛИМЕНОВ Василий Александрович,
профессор ИШНПТ ТПУ



Содержание лекции

- › Стандартные механические свойства
- › Деформация и разрушение металлов. Механизмы пластической деформации и разрушения
- › Механизмы упрочнения металлов
- › Исследование структуры и механизмов деформации на различных масштабных уровнях
- › Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла. Отдых и полигонизация. Рекристаллизация. Холодная и горячая деформация (самостоятельно)



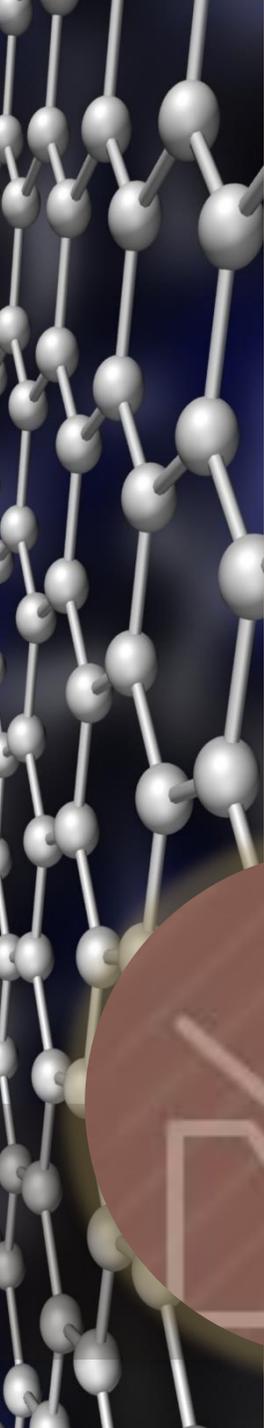
Дополнительная литература

- › Michael F Ashby, David R H Jones Engineering Materials v.1, 2005, v.2 2006.

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 Al4 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

Адаптировано из M.F. Ashby, D.R. Jones, Engineering Materials. V. I, University of Cambridge, UK⁴

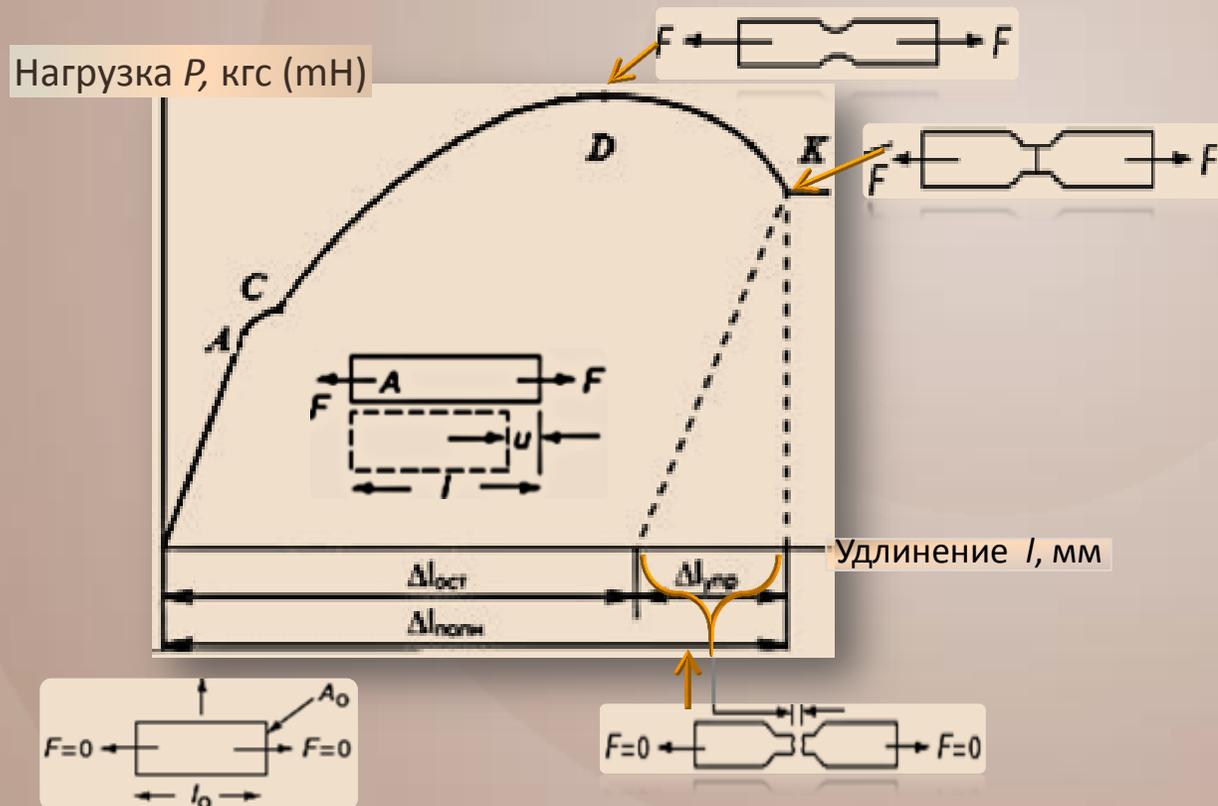


Стандартные механические свойства

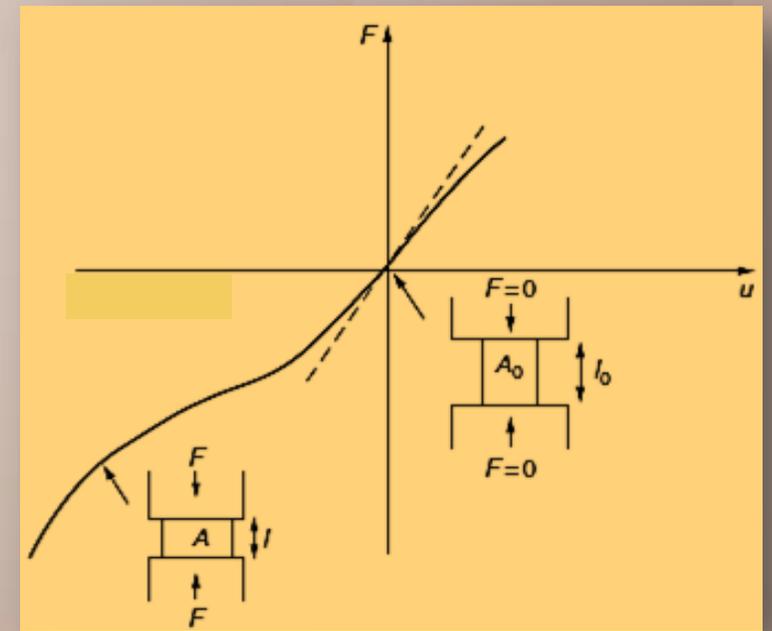
Поведение материала при растяжении и сжатии

- › Механические свойства определяют способность металлов сопротивляться воздействию внешних нагрузок
 - **статические** – действующие постоянно или медленно возрастающие
 - **динамические** – действующие мгновенно, характер удара
 - **циклические** – изменяющиеся по величине и направлению

Испытание на растяжение



Испытание на сжатие

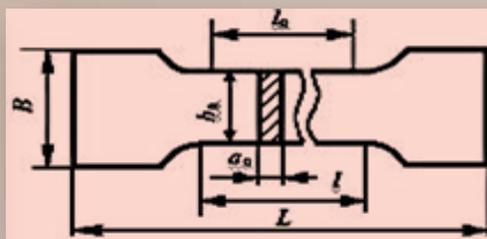
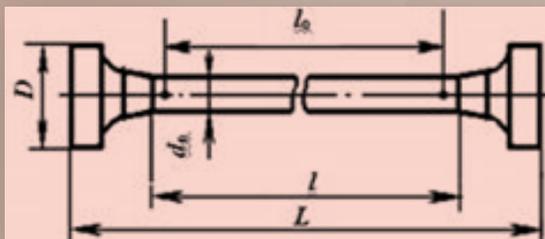


Универсальный комплекс для испытаний на растяжение, сжатие и изгиб

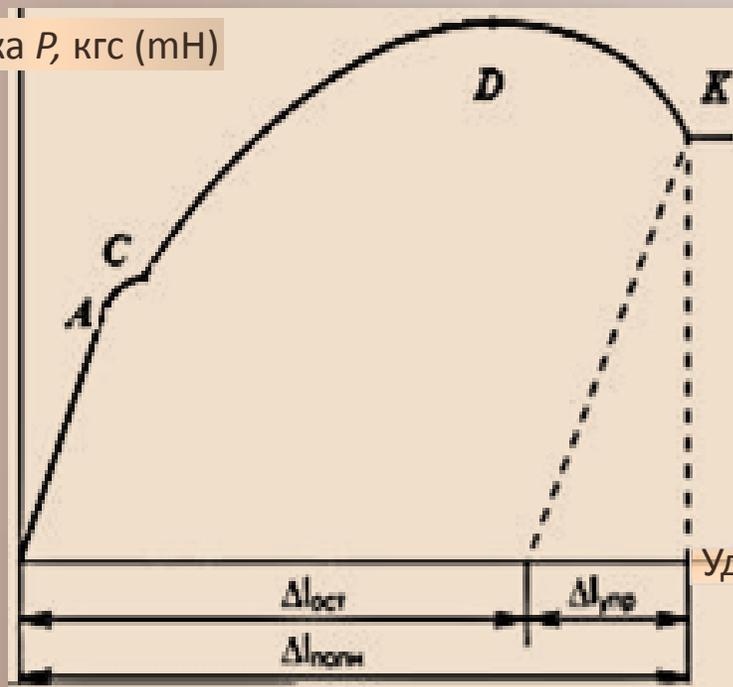


Машинная диаграмма растяжения и диаграмма условных напряжений

Цилиндрический и плоский образцы



Нагрузка P, кгс (мН)



Удлинение l, мм

Испытание на растяжение

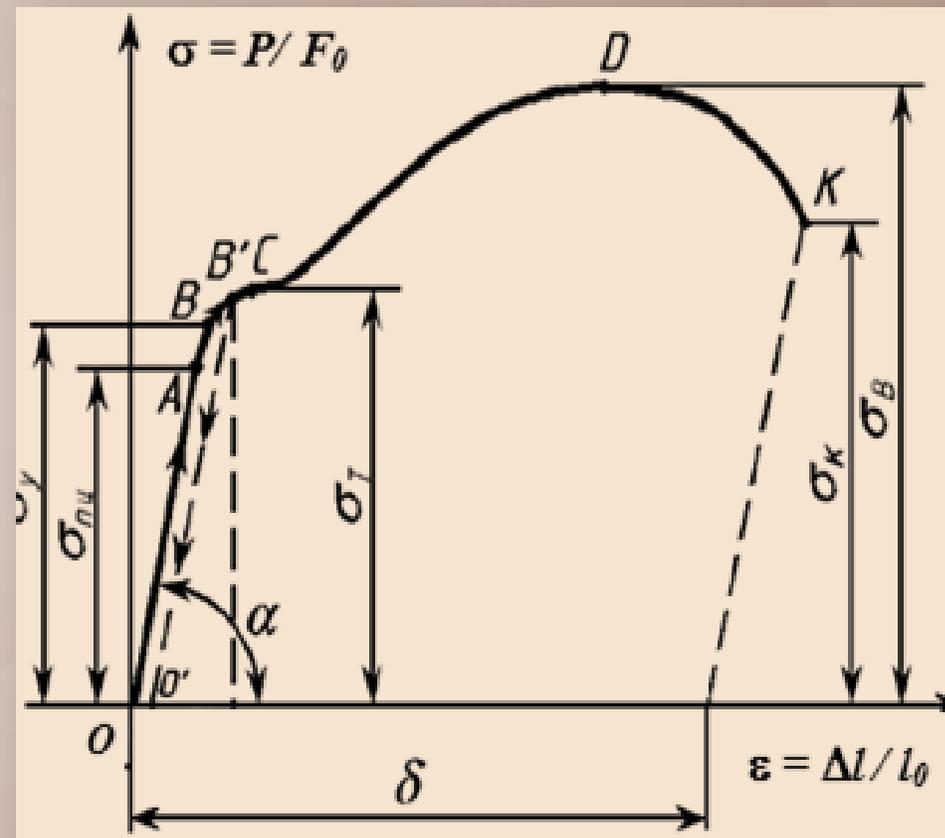


Диаграмма условных напряжений

Основные механические характеристики

› **Предел упругости** - наибольшее напряжение, до которого остаточная деформация при разгрузке не обнаруживается

$$\sigma_{yn} = \frac{P_{yn}}{F_0}$$

› **Модуль упругости** - тангенс угла наклона к оси абсцисс

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

› **Предел пропорциональности** – напряжение от нагрузки, после которого нарушается закон Гука $\sigma = E \cdot \varepsilon$, E – модуль жесткости

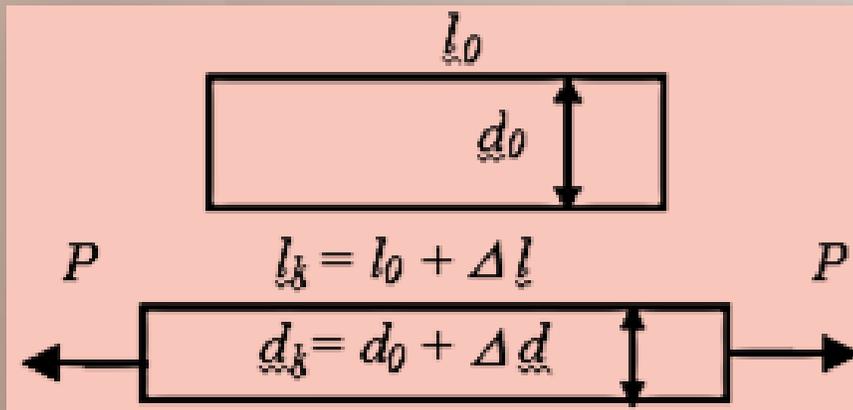
$$\sigma_{nc} = \frac{P_{nc}}{F_0}$$

› **Предел текучести** - напряжение, при котором рост деформации - без увеличения растягивающей нагрузки

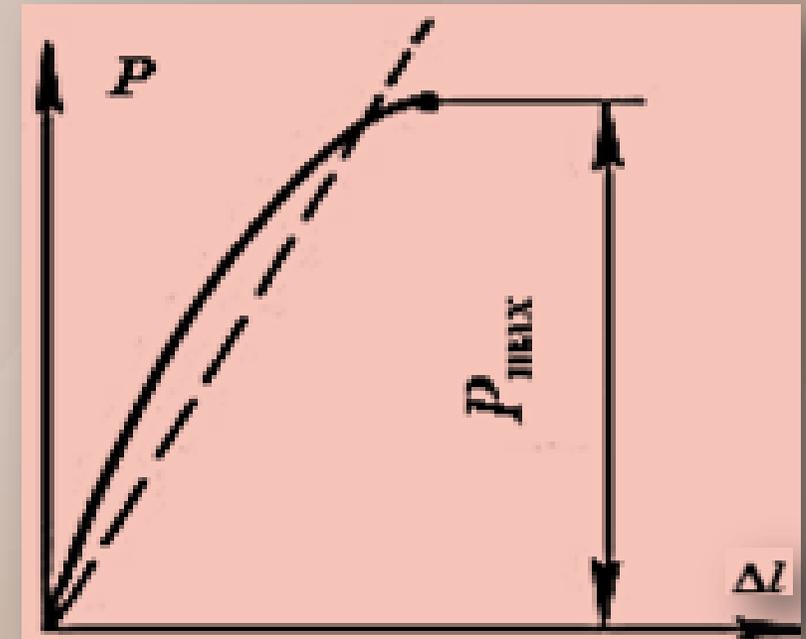
$$\sigma_m = \frac{P_m}{F_0}$$

› **Условный предел текучести**

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$$



Упругая деформация



Кривая растяжения чугуна

Основные механические характеристики

› **Предел прочности** – напряжение, соотв. макс. нагрузке на образец до разрушения

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}$$

› Относительное **удлинение**

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$$

› Относительное **сужение**, F_k – площадь поперечного сечения в месте разрыва

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$$

› **Напряжение в момент отрыва образца.** P_k – растягивающая нагрузка в момент разрыва

$$\sigma_k = \frac{P_k}{F_0}$$

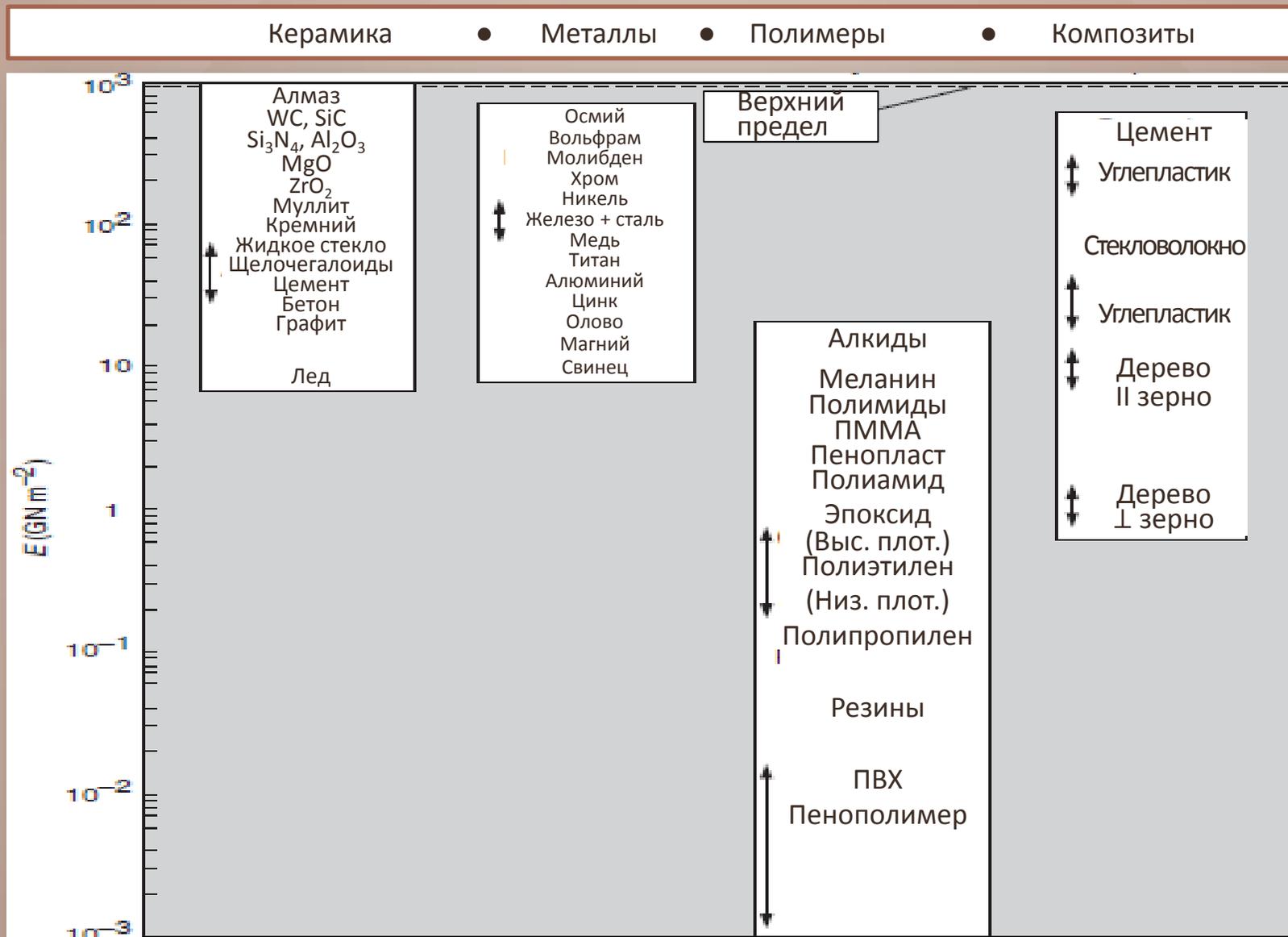
› **Надежный металл**

$$\delta \geq 15\% \text{ и } \psi \geq 45\%$$

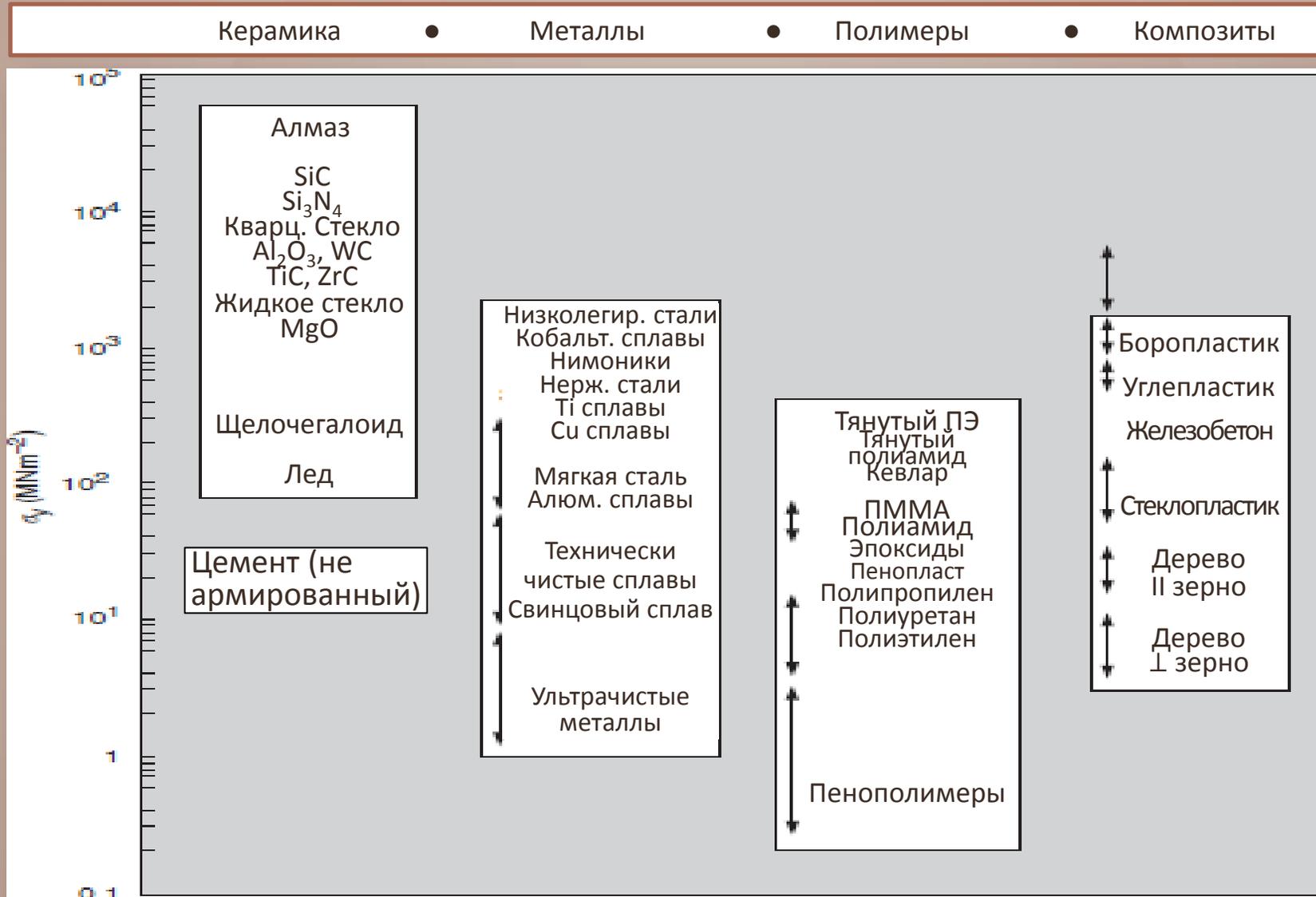
Классификация по пластичности	$\delta, \%$
Низкая	5 - 10
Средняя (надежные металлы)	15 – 25
Высокая	> 30

Классификация по прочности	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$		
	Сплавы железа (стали)	Сплавы алюминия	Сплавы титана
Низкая	650	200	400
Средняя	650–1300	200–400	400–800
Высокая	1300–1400	400	800

Гистограмма модуля Юнга



Гистограмма предела текучести



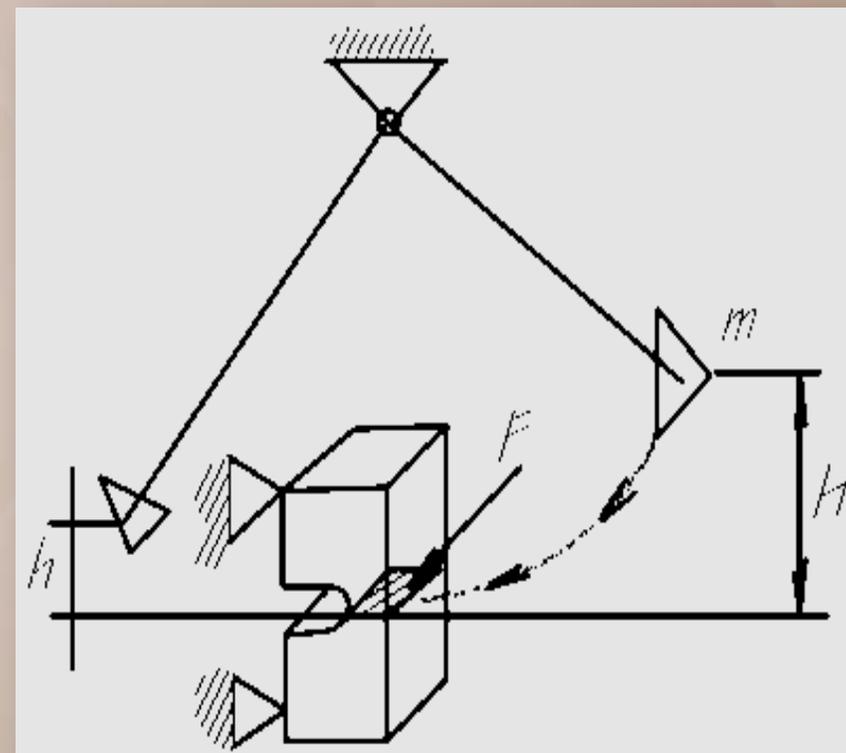
Испытание на ударную вязкость

- › **Ударная вязкость (КС)**- способность материала сопротивляться хрупкому разрушению. Испытания проводят на образцах определенной формы и размеров. Образец устанавливают на маятниковом копре надрезом в сторону, противоположную удару маятника, который поднимают на высоту H . На разрушение образца затрачивается работа

$$A = P \cdot (H - h),$$

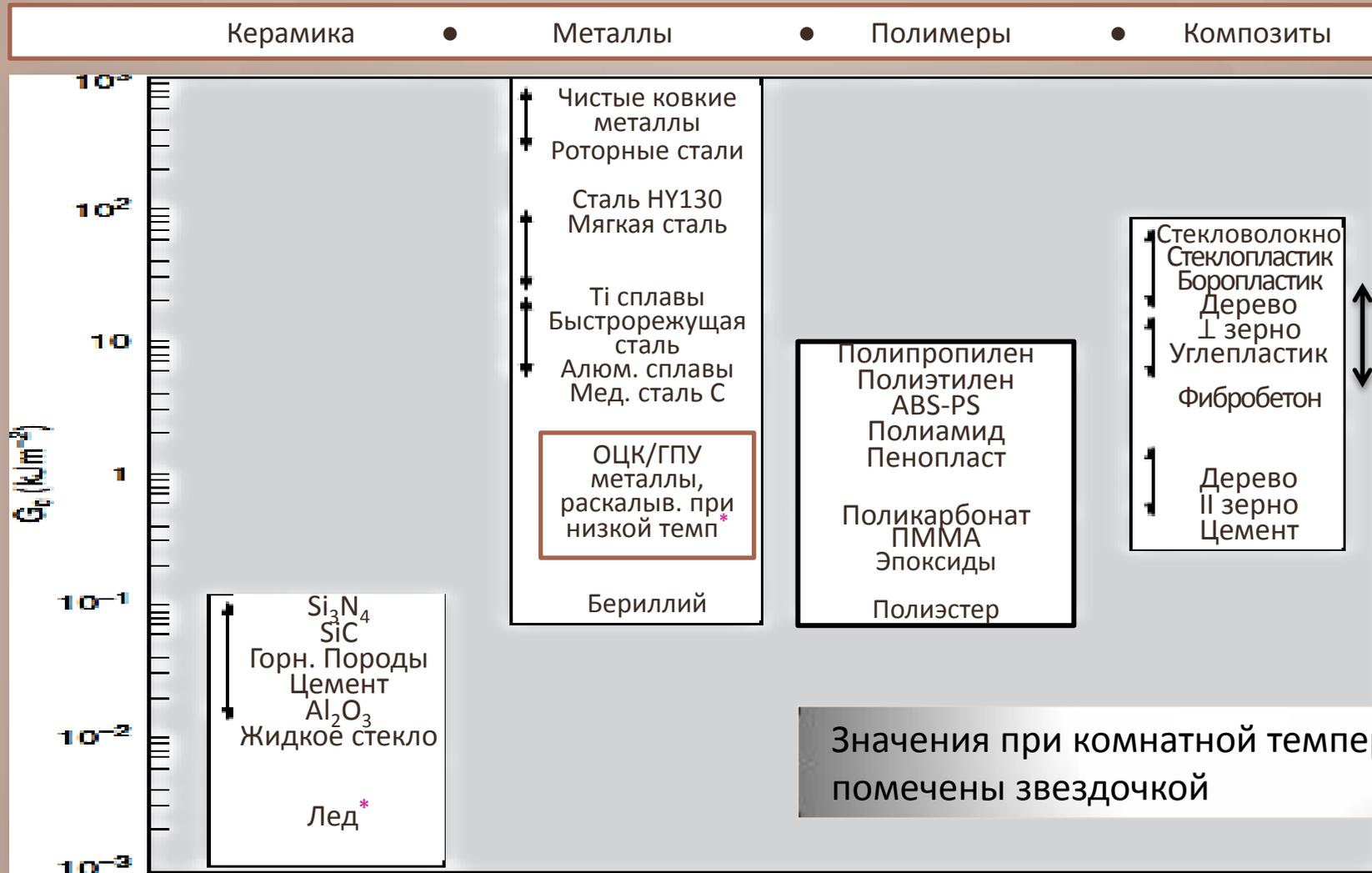
где P – вес маятника, h – высота подъема маятника после удара

- › Ударная вязкость определяется как отношение работы разрушения к площади поперечного сечения в месте надреза (Дж/м²)



Маятниковый копер

Гистограмма вязкости



Твёрдость

› **Твёрдость** – сопротивление материала **индентору**, не деформирующегося при испытании. Чем больше сопротивление пластической деформации, тем выше твердость

› Метод Бринелля

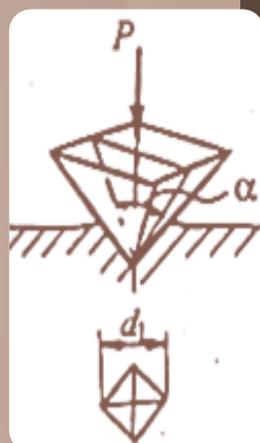
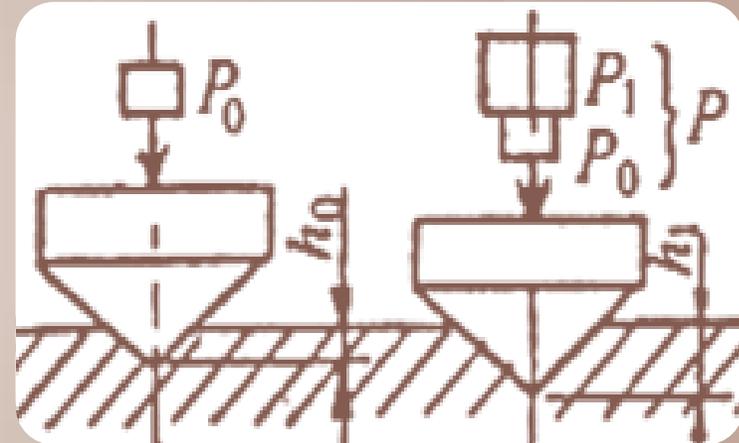
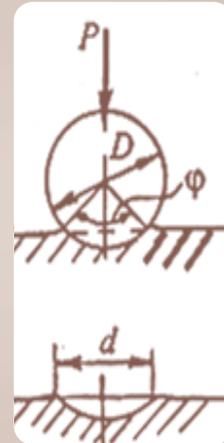
Индентор – стальной закаленный шарик. Твердость определяется отношением нагрузки, приложенной к площади сферической поверхности отпечатка

Определение твердости по

Бринеллю •

Роквеллу •

Виккерсу



$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

P – нагрузка на шарик (кгс); d – диаметр отпечатка (мм). Диаметр шарика D и величину нагрузки P выбирают в зависимости от твердости материала. Число твердости тем выше, чем меньше диаметр отпечатка

Твёрдость

› Метод Роквелла

Индентор - алмазный **конус** или стальной закаленный **шарик**. Предварительная нагрузка $P_0 = 98,07$ Н (10 кгс), под действием которой индентор вдавливается на глубину h_0 , необходима для исключения влияния упругой деформации и шероховатости поверхности на результаты измерений. Под действием основной нагрузкой P_1 индентор вдавливается на глубину h_1

› Метод Виккерса

Индентор – алмазная четырехгранная **пирамида** с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$. Диагональ отпечатка d_1 измеряется с помощью микроскопа. Нагрузка - от 10 до 1000 Н, ниже 50 Н - для определения твердости тонких изделий и поверхностных слоев металла

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d_1^2} = 1,854 \frac{P}{d_1^2}$$

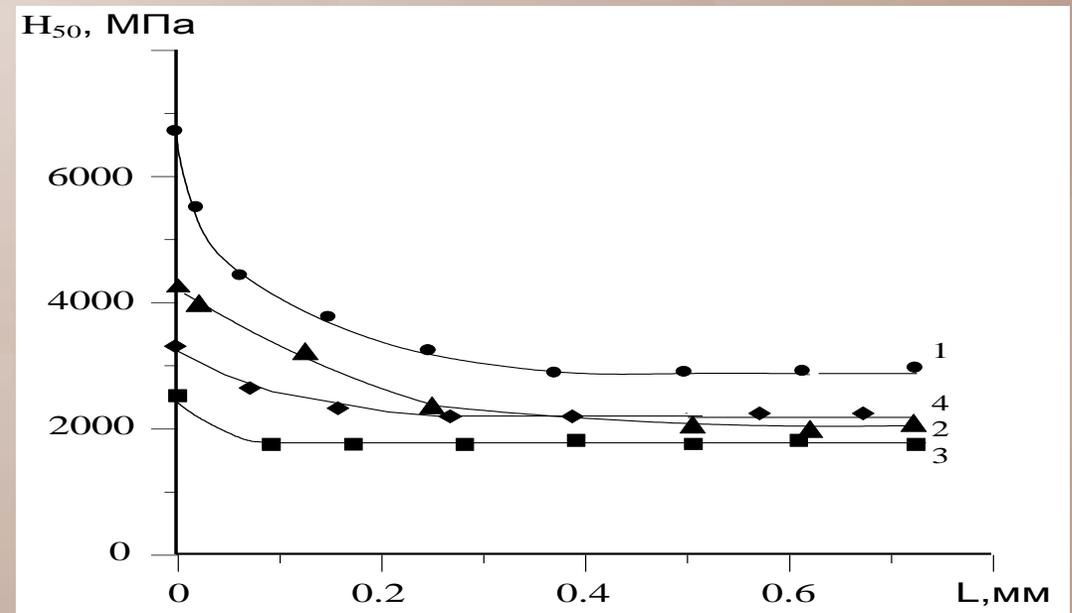
Число твердости, P – нагрузка, время выдержки индентора под нагрузкой. Размерность твердости (кгс/мм²) не ставится

Продолжительность выдержки для сталей 10–15 с, цветных металлов 30 с. Например, 420 $HV_{10/15}$ означает, что число твердости 420 получено при нагрузке $P = 10$ кгс, приложенной в течение 15 с

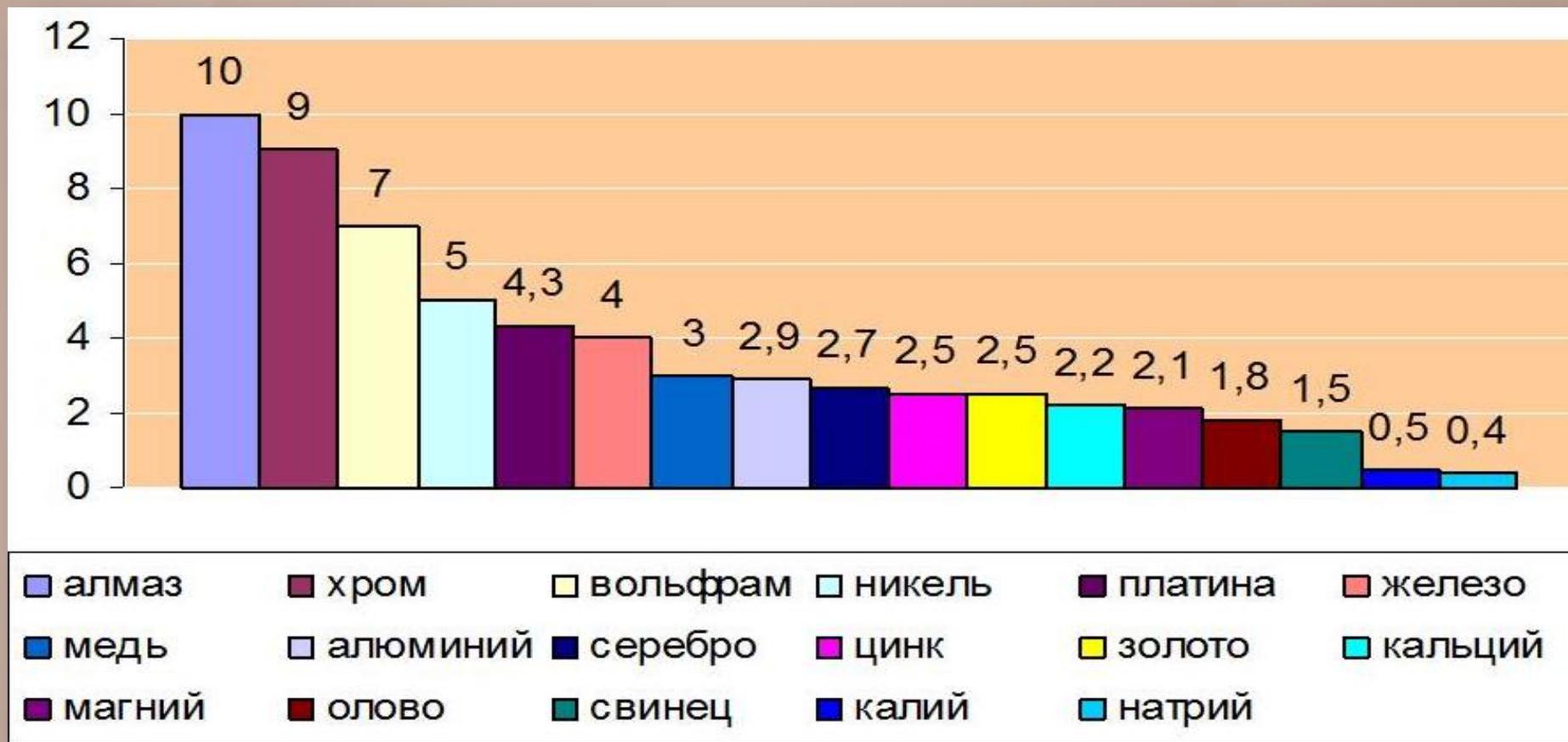
Микро- и нанотвердость

Микротвердость определяется вдавливанием в поверхность алмазной пирамиды при небольших нагрузках ($0,01\text{--}2\text{ Н}$). Размер диагонали отпечатка индентора определяют с помощью микроскопа. По формуле (как для метода Виккерса) определяют число твердости.

Нанотвёрдость –твёрдость наноразмерных объектов или отдельных наноразмерных элементов входящих в состав нанокompозитов или наноструктурированного материала. Глубина внедрения индентора менее $0,2\text{ мкм}$



Твёрдость

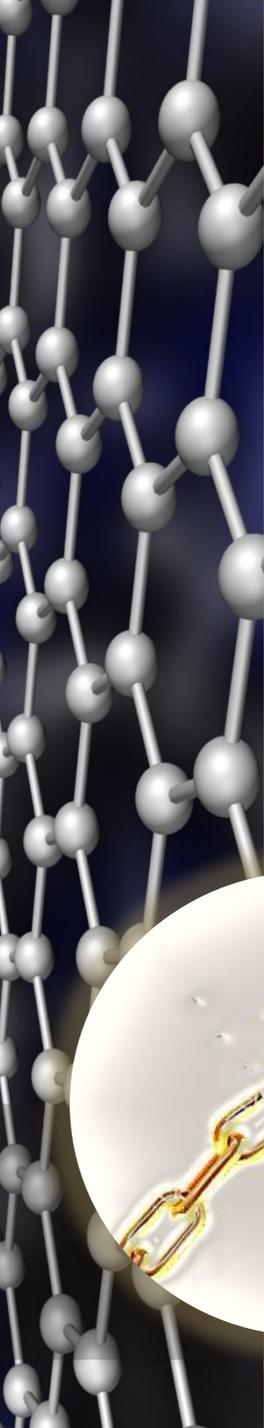


Другие механические свойства материалов

- › **Хладноломкость** – склонность металла к переходу в хрупкое состояние с понижением температуры. Железо, вольфрам, цинк, ОЦК и ГПУ металлы
- › **Усталость** – постепенное накопление повреждений в материале при повторных знакопеременных напряжениях, не превышающих предела текучести, приводящее к разрушению
- › **Выносливость** – сопротивление металлов усталости
- › **Предел выносливости** – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за базовое число циклов нагружения без разрушения



Вездеход КАМАЗ-5350 "Арктика"



Деформация и разрушение металлов

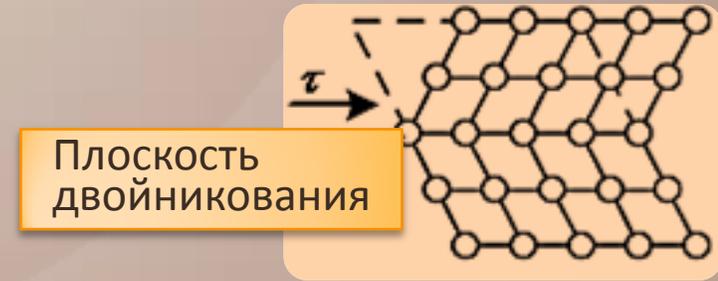
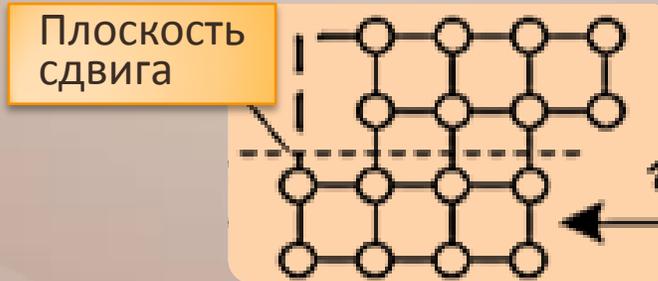
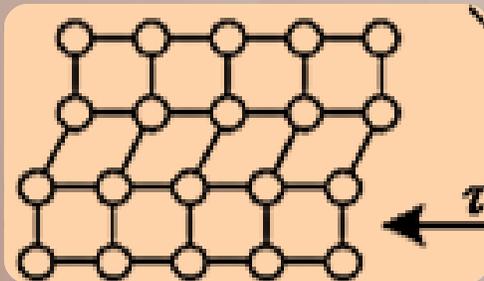
Виды деформаций

- › **Деформация** – изменение формы и размеров тела под действием внешних воздействий без разрушения
- › **Механическое напряжение** – мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле и действующих на единицу площади поперечного сечения. Единица измерения – паскаль: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$, $1 \text{ кгс/мм}^2 = 10 \text{ МПа}$
- › Напряжения и вызываемые ими деформации возникают при действии внешних сил в результате фазовых и структурных превращений, связанных с изменением объема
- › **Упругая деформация** - небольшие смещения атомов из положения равновесия. Баланс кулоновских сил притяжения и отталкивания, которыми связаны атомы, нарушается. При снятии нагрузки смещенные атомы под действием кулоновских сил возвращаются в исходное положение, деформация исчезает
- › С ростом нагрузки начинается **пластическая деформация**, которая осуществляется **скольжением** и **двойникованием** и остается после снятия нагрузки

Деформация упругая

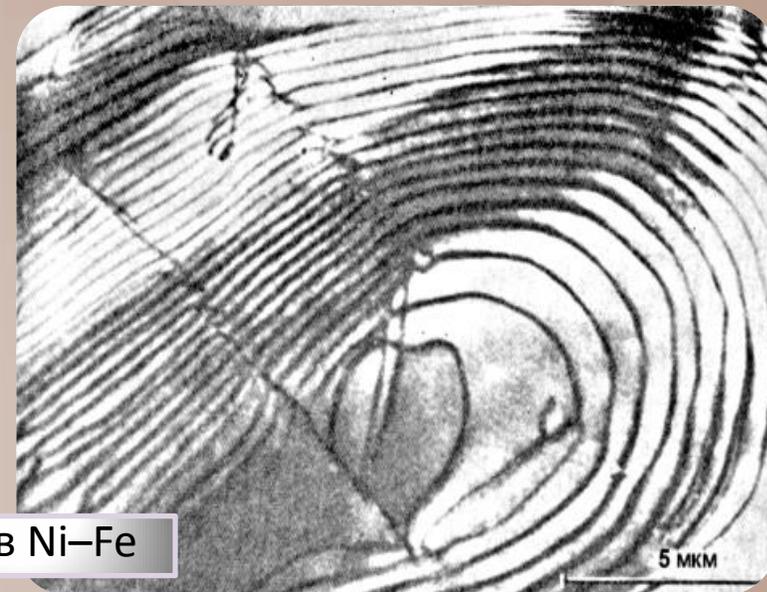
• Деформация скольжением

• Деформация двойникованием

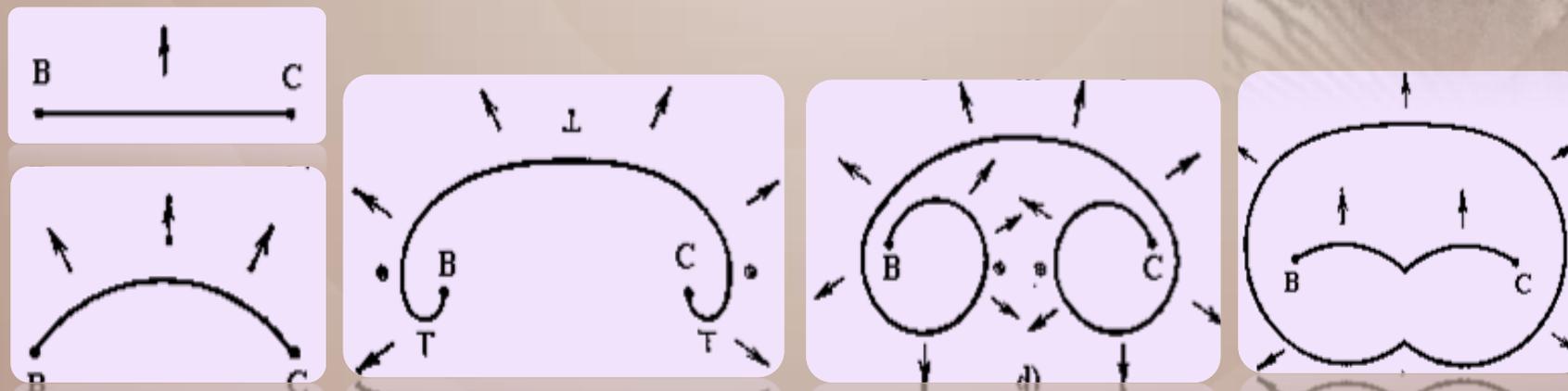


Источник Франка-Рида

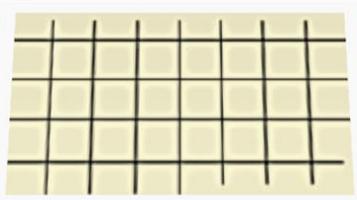
- › В процесс пластической деформации вовлекается большое число дислокаций. За исключением закрепленных дислокаций, которые не могут двигаться, остальные дислокации должны бы мигрировать к поверхности, оставляя за собой кристалл без дислокаций. Однако этого не происходит. Необходимое число дислокаций возникает из источника внутри кристалла



Сплав Ni-Fe

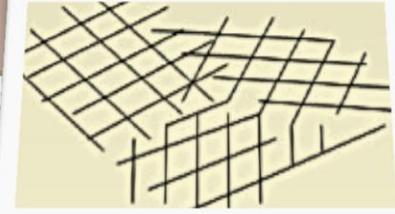


Кристаллы



МОНОКРИСТАЛЛЫ
одиночные кристаллы

ПОЛИКРИСТАЛЛЫ
множество сросшихся монокристаллов



ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

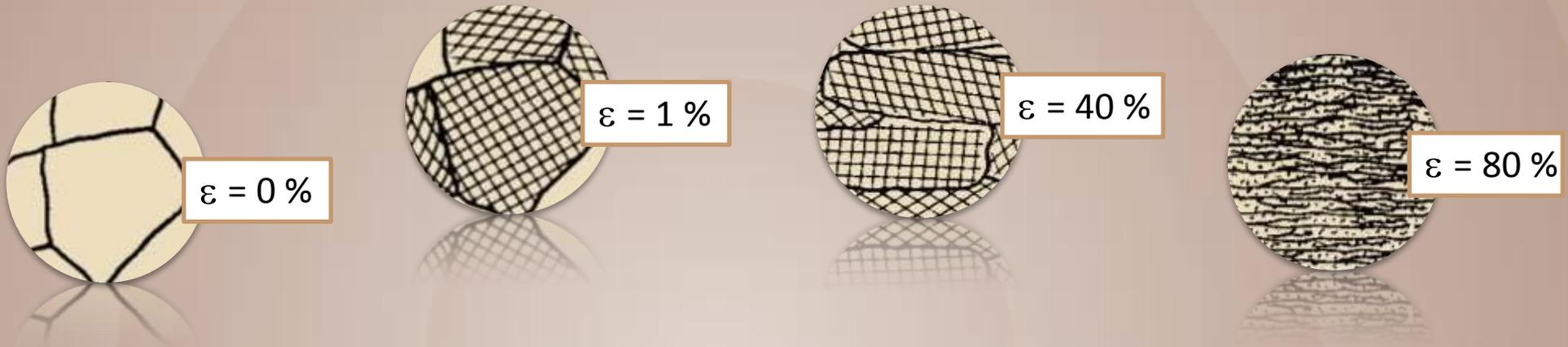
- › Правильная геометрическая форма
- › Постоянная температура плавления
- › Анизотропия – зависимость физических свойств от направлений внутри кристалла

- › Правильная геометрическая форма
- › Постоянная температура плавления
- › Изотропия

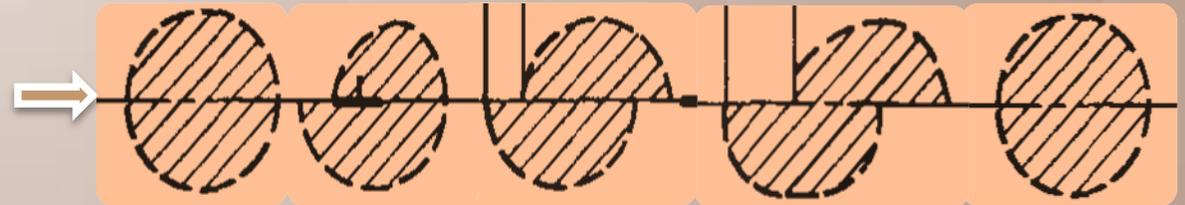
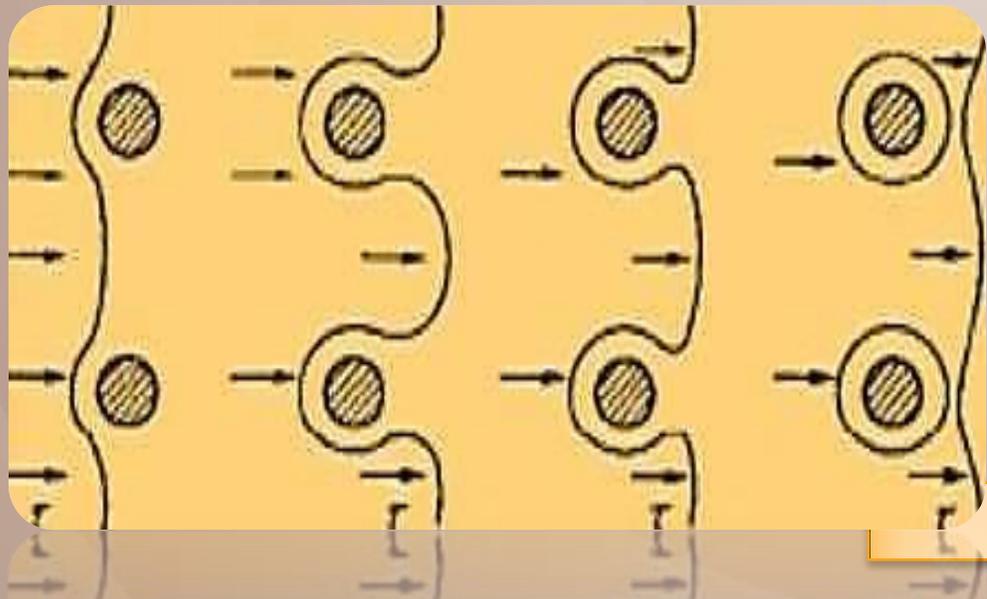


Деформация моно- и поликристаллов

Микроструктуры при пластической деформации



Движение дислокаций в двухфазном сплаве

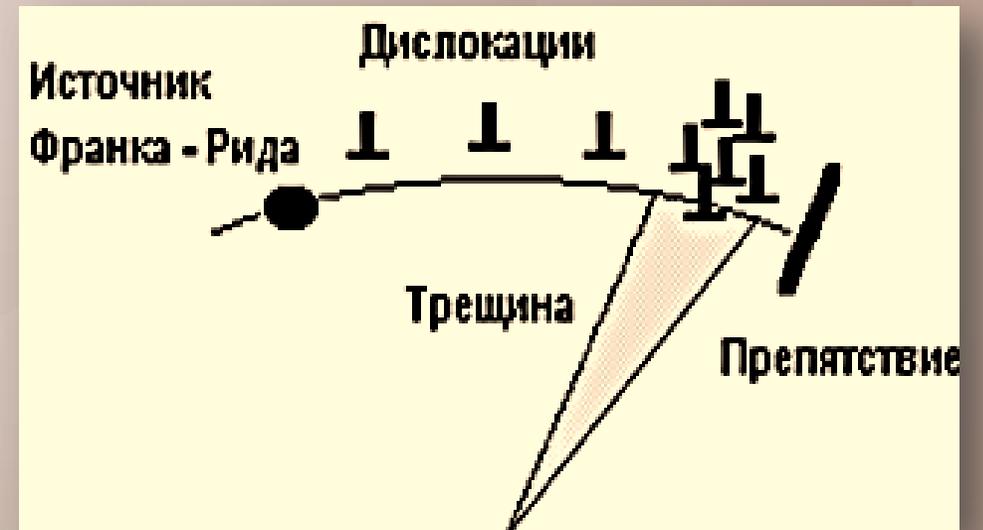


Перерезание дислокацией когерентных частиц

Образование дислокационных петель

Разрушение металлов

- › Процесс деформации при достаточно высоких напряжениях заканчивается зарождением трещины и ее распространением через все сечение образца – **разрушением**
- › **Вязкое разрушение** - металл претерпевает перед разрушением упругую и значительную пластическую деформацию (более 30 %). Трещина тупая, раскрывающаяся
- › **Хрупкое разрушение** - при отсутствии или незначительном развитии пластической деформации. Трещина ветвящаяся
- › Механизм зарождения трещины при хрупком и вязком разрушении одинаков
- › **Модель Стро-Мотта.** Под действием напряжений краевые дислокации скапливаются перед препятствиями (границы зерен, межфазные границы, включения). Дислокации настолько тесно прижаты друг к другу, что их экстраплоскости сливаются, а под ними образуется **зародышевая микротрещина** в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения дислокаций.
- › **Механизм Котрелла** разработан применительно к ОЦК металлам, склонным к хрупкости при низких температурах



Образование трещины при скоплении дислокаций у препятствия

Фрактография поверхностей излома

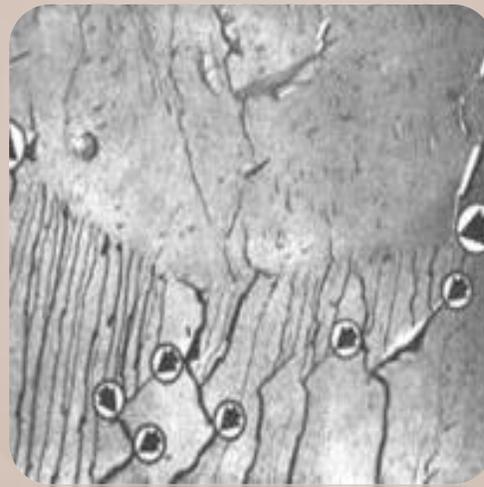
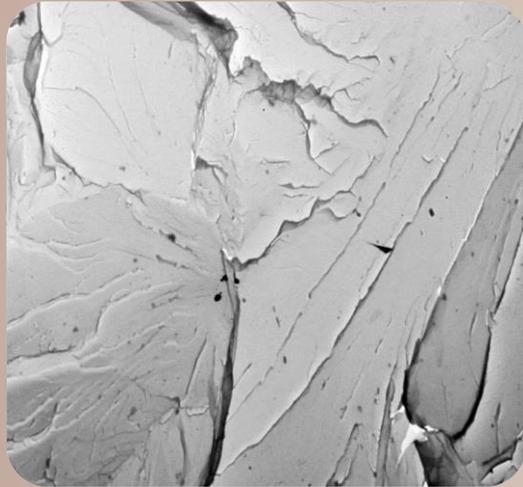
Хрупкий излом



Смешанный



Вязкий



Механизмы упрочнения металлов

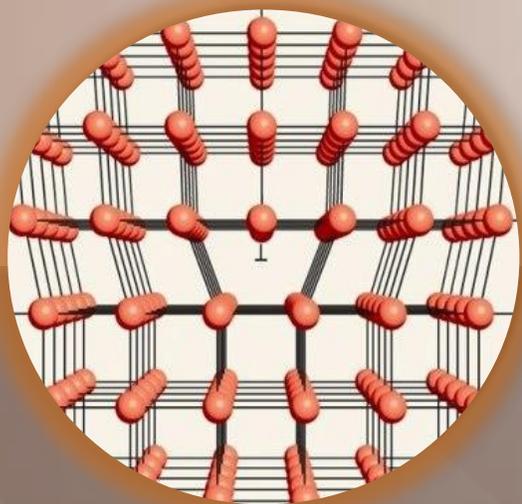
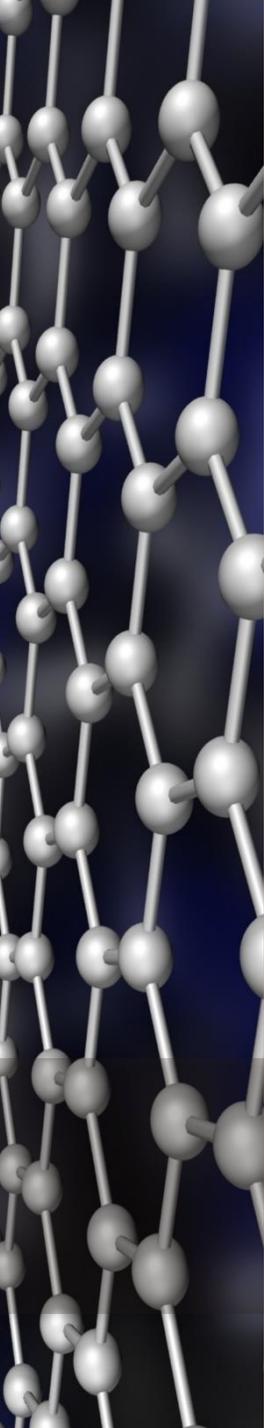
- › **Сопротивление кристаллической решетки** движению дислокаций при деформации. Эффективность этого механизма зависит от силы межатомных связей и, чем больше их величина, тем выше сопротивляемость деформации
- › Напряжение, необходимое для начала пластической деформации (τ_p) прямо пропорционально модулю упругости при сдвиге материала (G): $\tau_p \sim G$
- › **Упрочнение за счет увеличения количества дислокаций** в структуре материала. Величина упрочнения, обусловленная механизмом торможения дислокаций (τ_p), прямо пропорциональна плотности дислокаций (ρ), $\tau_p \sim \sqrt{\rho}$. Чем больше степень деформации материала, тем больше плотность дислокаций и сопротивление материала деформации

› 3 стадии деформационного упрочнения

- › **I стадия легкого скольжения** - пластическая деформация осуществляется движением дислокаций, в одной системе (без значительного роста приложенных напряжений)
- › **II стадия деформационного упрочнения** – множественное скольжение при более значительной степени деформации. Движение дислокаций - в двух и более системах. Плотность дислокаций 10^{11} - 10^{12} см^{-2}
- › **III стадия деформационного упрочнения** - поперечное скольжение винтовых дислокаций под влиянием возрастающего напряжения

Механизмы упрочнения металлов

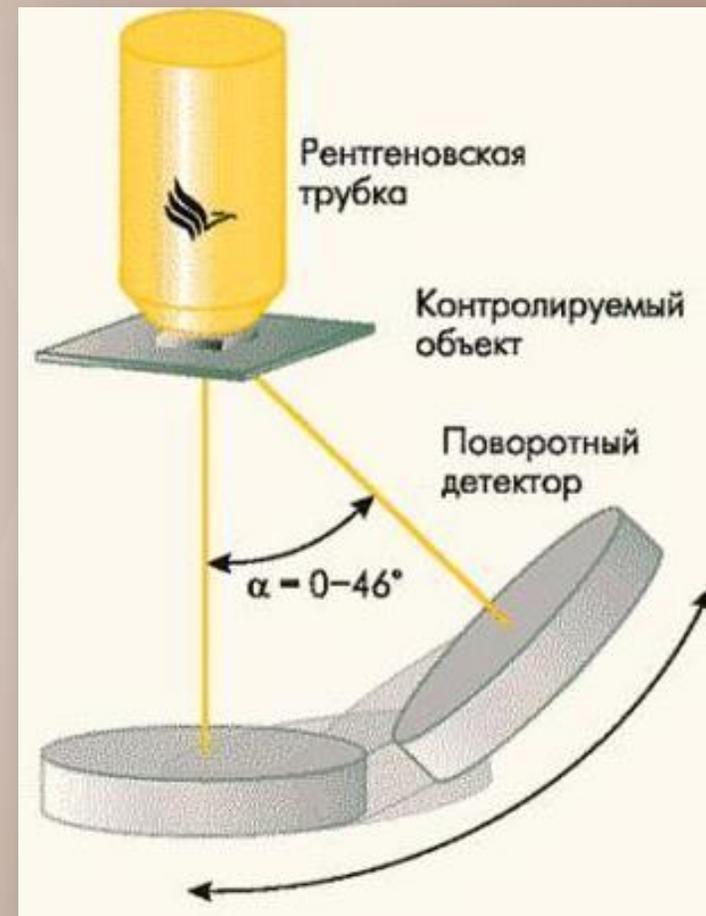
- › **Торможение дислокаций дисперсными частицами**, которые являются сильным препятствием для движения дислокаций
- › Механизмы преодоления дислокациями частиц
 - **перерезание** частиц
 - **прохождение** между частицами
- › **Торможение дислокаций границами зерен, фрагментов и блоков**
- › Границы зерен, фрагментов и блоков в связи с концентрацией дефектов, являются участками, тормозящимидвигающиеся дислокации. Напряжение, необходимое для пластической деформации с учетом преодоления дислокациями границ (τ_r), обратно пропорционально диаметру зерна (d):
 $\tau_r \sim d^{-2}$



Структура и деформация на различных масштабных уровнях

Рентгеноструктурный анализ материалов

- › **Рентгеноструктурный анализ (РСА)** – метод исследования строения тел, с помощью дифракции рентгеновских лучей. Структура вещества изучается на основании оценки пространственного распределения интенсивности рассеянного рентгеновского излучения
- › Длина волны рентгеновского излучения сопоставима с размерами атома и постоянной решетки кристаллического тела. При рентгеновском облучении кристалла наблюдается дифракционная картина, которая зависит от длины волны рентгеновских лучей и строения объекта
- › Для исследования атомной структуры применяют излучение с длиной волны порядка единиц ангстрем



Рентгеноструктурный анализ материалов

Рентгеновская съемка по методу Лауэ

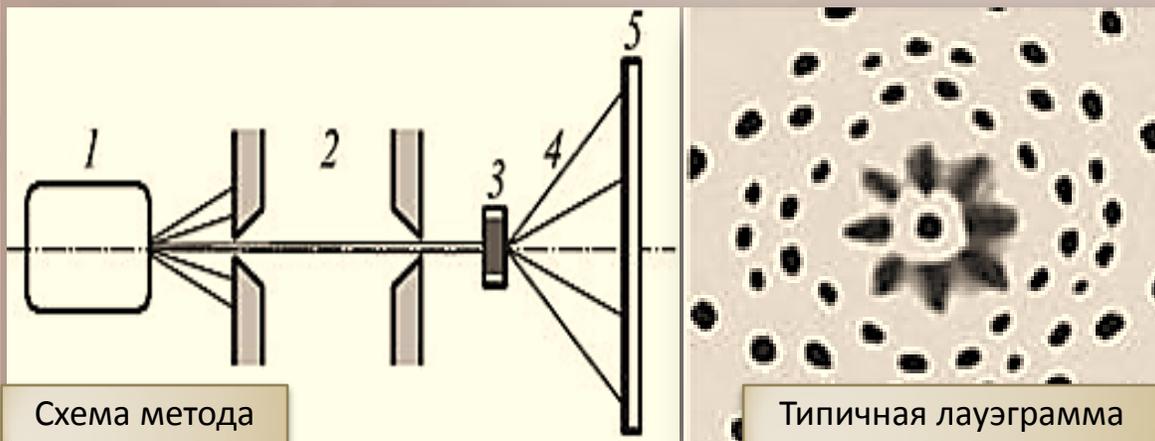


Схема метода

Типичная лауэграмма

1 - пучок рентгеновских лучей; 2 - коллиматор; 3 - образец; 4 - дифрагированные лучи; 5 - плоская фотопленка

Рентгеновская съемка методом порошка

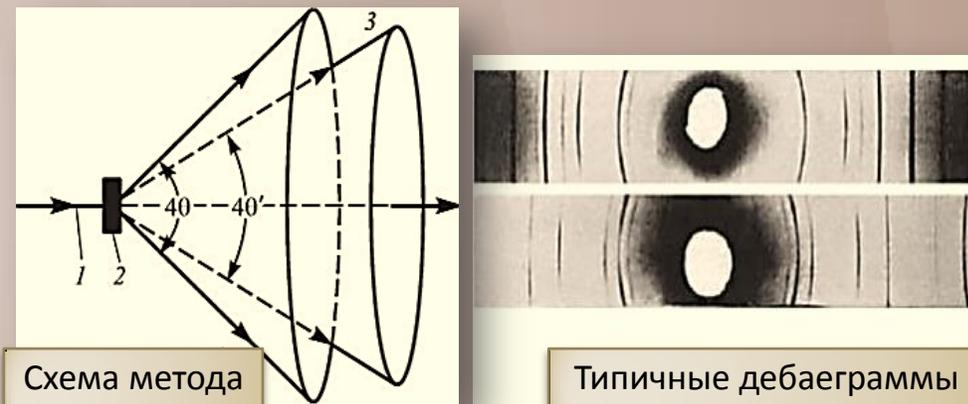


Схема метода

Типичные дебаеграммы

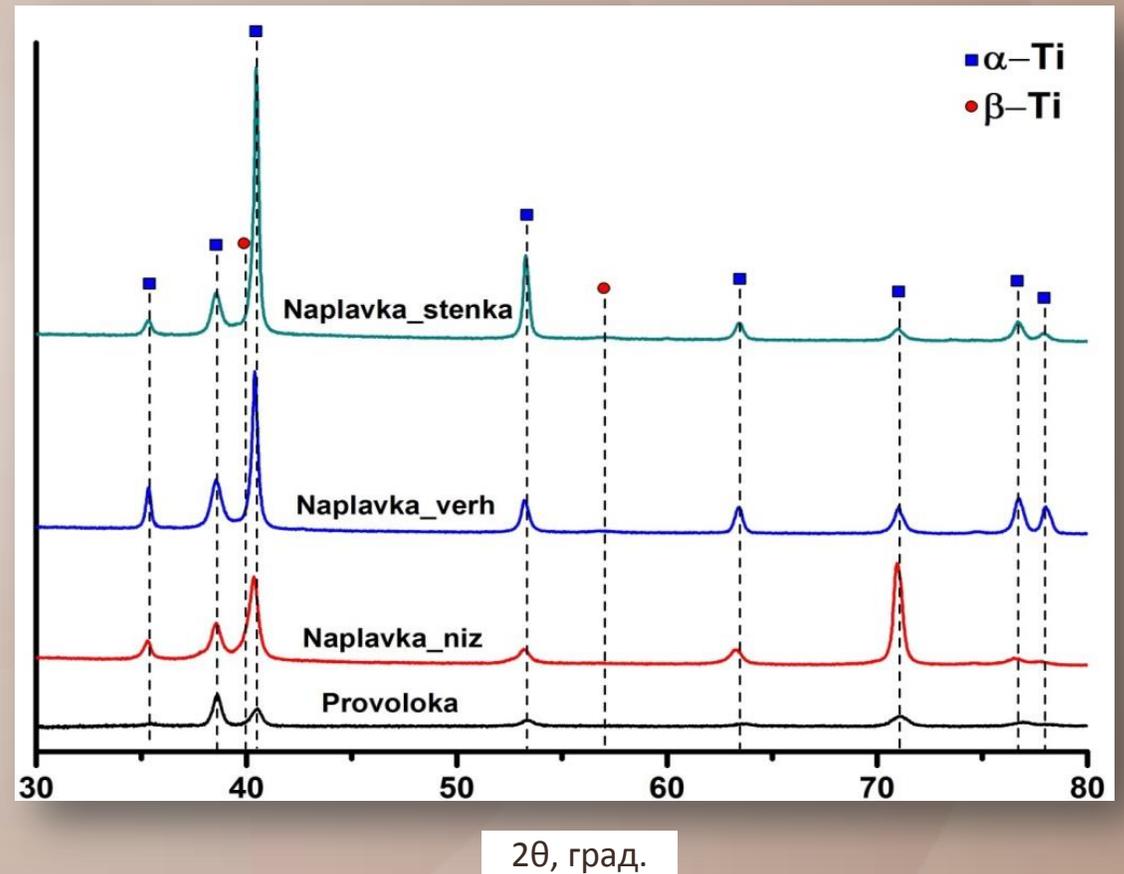
1 - первичный пучок; 2 - порошковый или поликристаллический образец; 3 - дифракционные конусы

Рентгеноструктурный анализ материалов

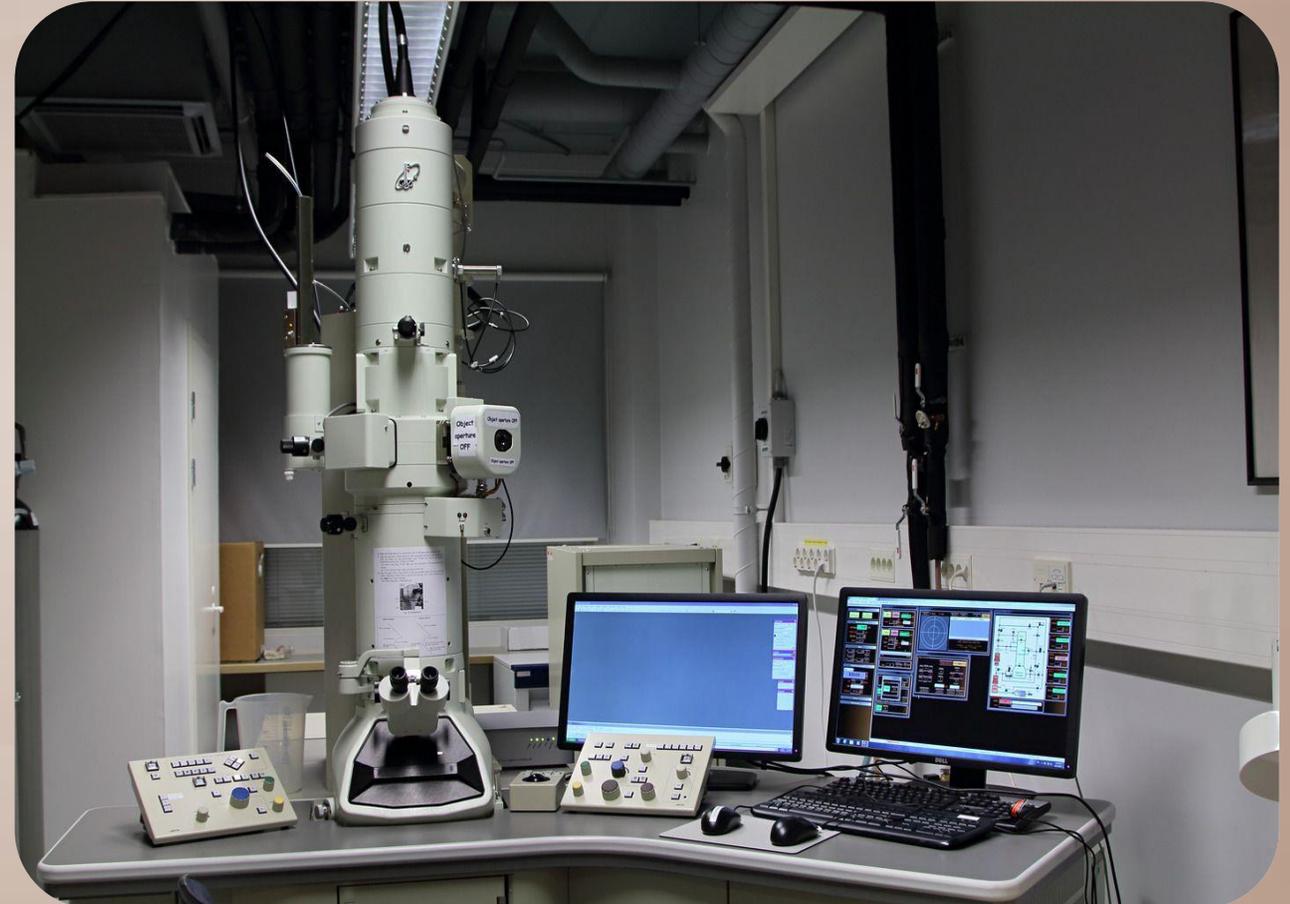
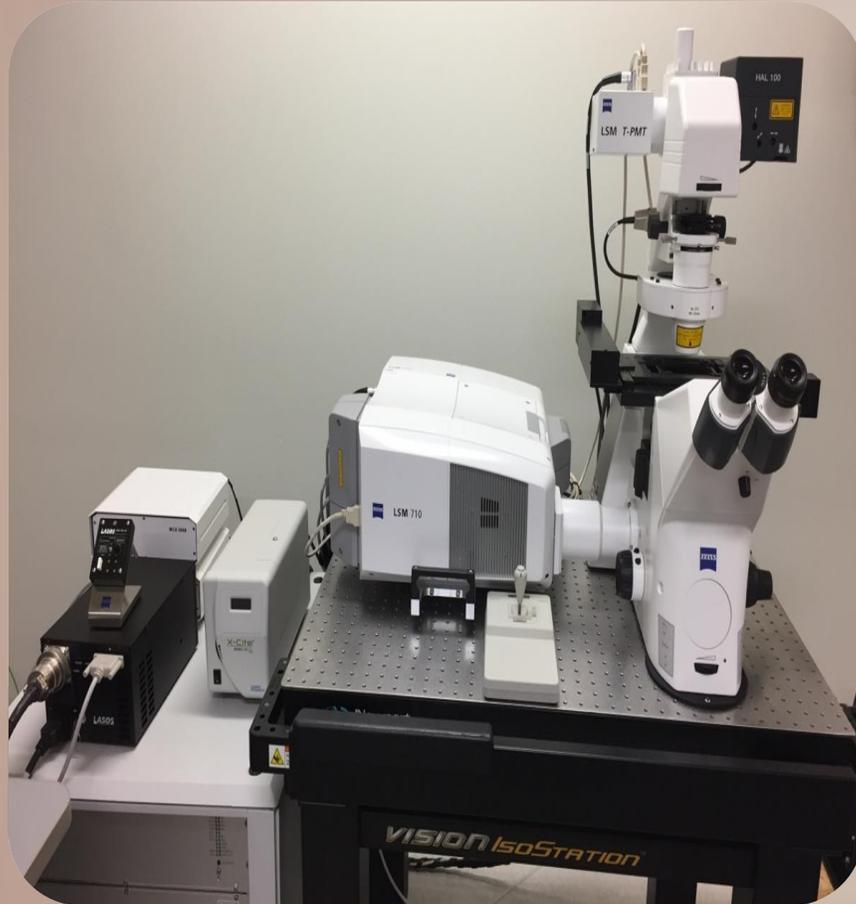


Установка для рентгеноструктурного анализа

Интенсивность, усл. ед.



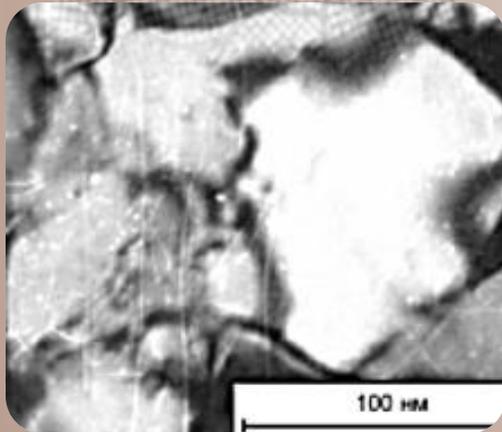
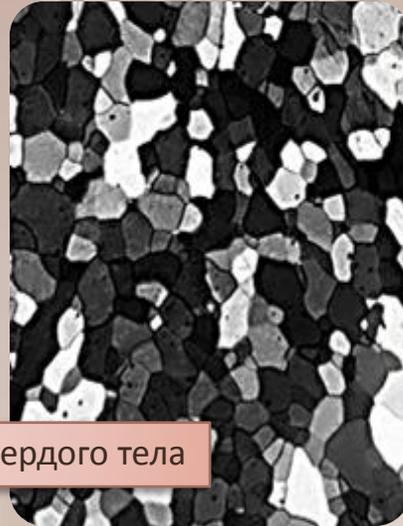
Оптическая и электронная микроскопия



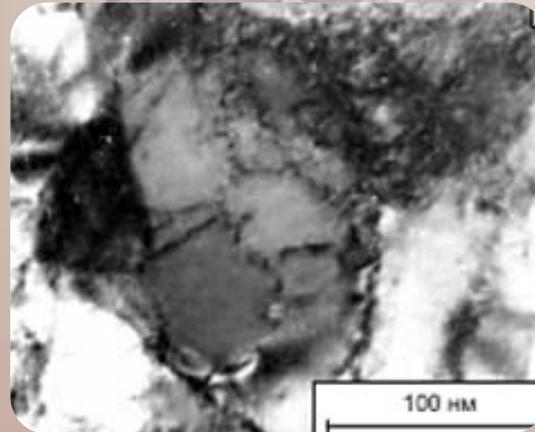
Исследование деформации на микро-уровне



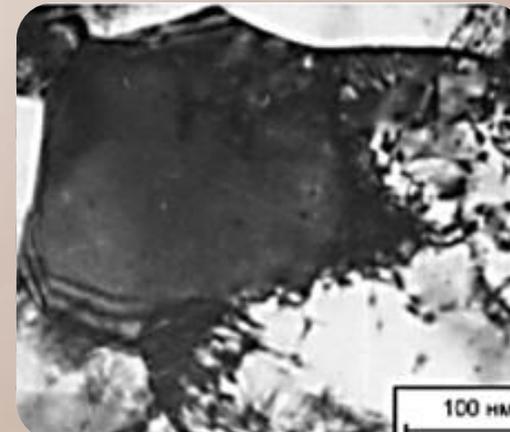
Микроструктура твердого тела



Бездислокационные зерна



Зерна с хаотически расположенными дислокациями



Зерна с дислокационными ячейками



Наночастицы

Исследование деформации на мезо- и макро-уровне (Vic-3D комплекс)

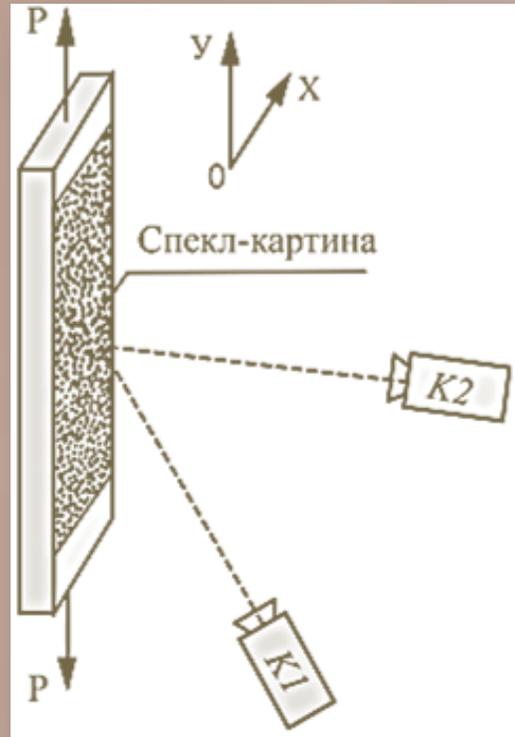
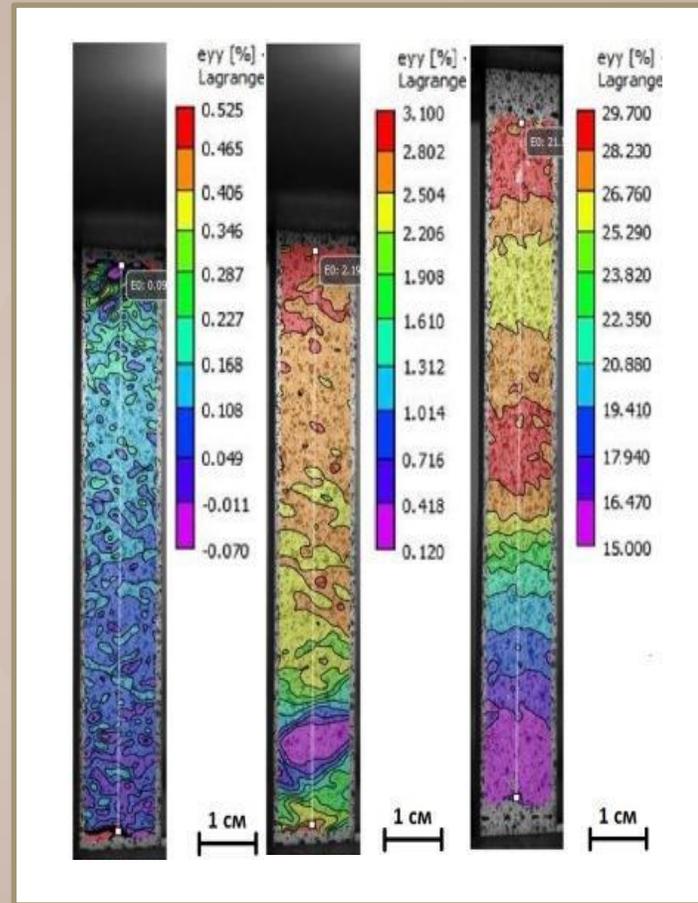


Схема регистрации изображений со спекл-картины на боковой поверхности при растяжении. K1, K2 - цифровые камеры; P - нагрузка



Распределение вертикальных относительных деформаций на боковой поверхности образца. Цифры соответствуют деформационно-напряженному состоянию

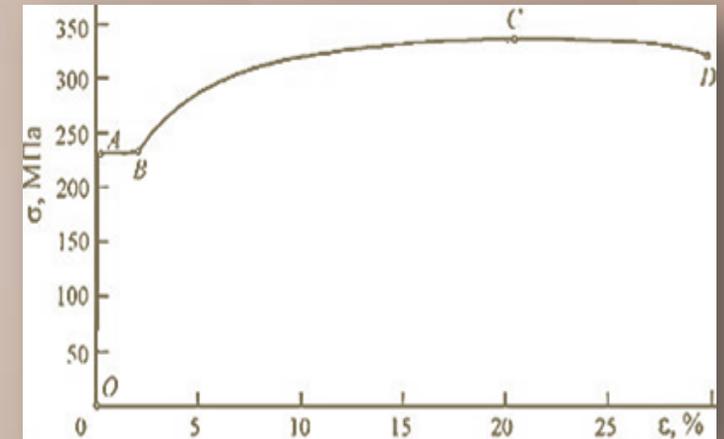


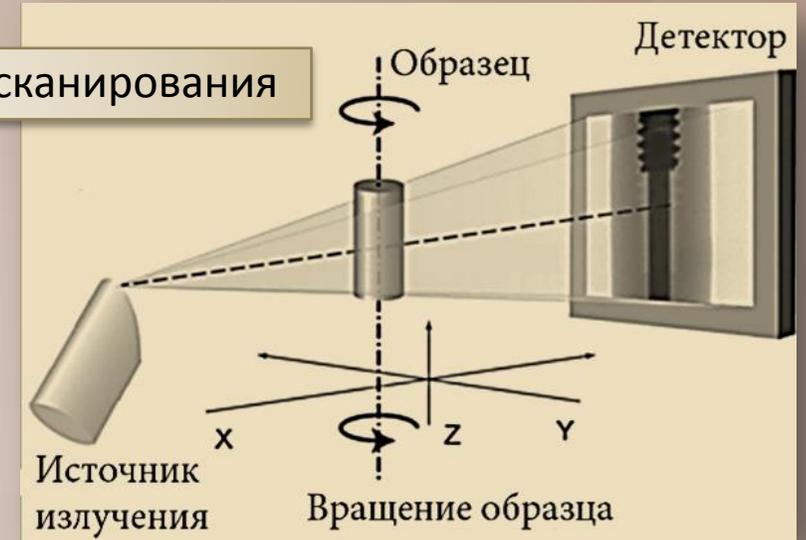
Диаграмма деформирования углеродистой стали СтЗсп

Компьютерная рентгеновская томография



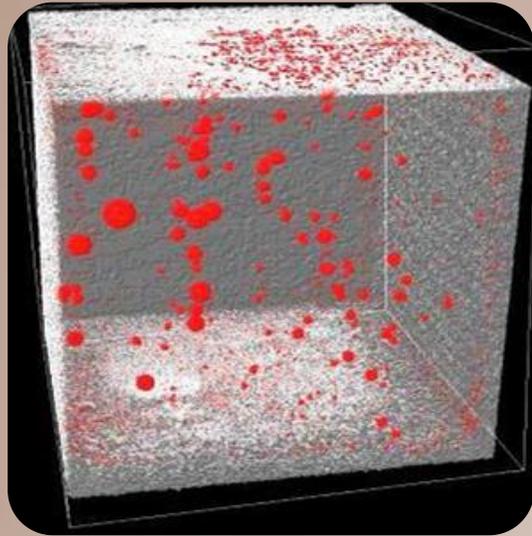
Технические характеристики

Схема сканирования

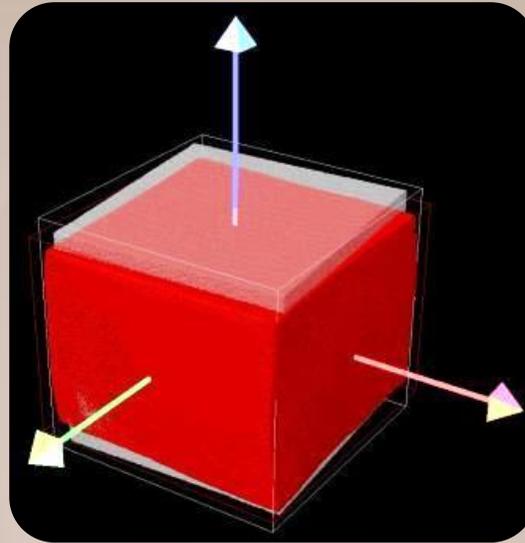


Пространственное разрешение, мкм	до 5
габариты рабочей области, мм	1150x600x550
Рентгеновский аппарат	XWT 160-TC (X-RAY WorX)
Анодное напряжение, кВ	20 – 150
Анодный ток, мкА	1 – 1000
Фокусное пятно, мкм	1,4
Детектор - панель	PaxScan-2520V (Varian)
Размер пикселя детектора, мкм	127
Рабочая область детектора, мм	193x242
Размер детектора, пиксель	1900x1500

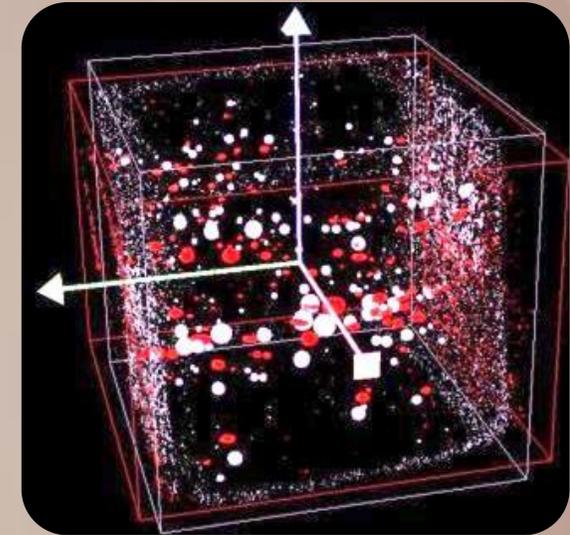
Деформируемый титановый образец



Пористость внутри образца

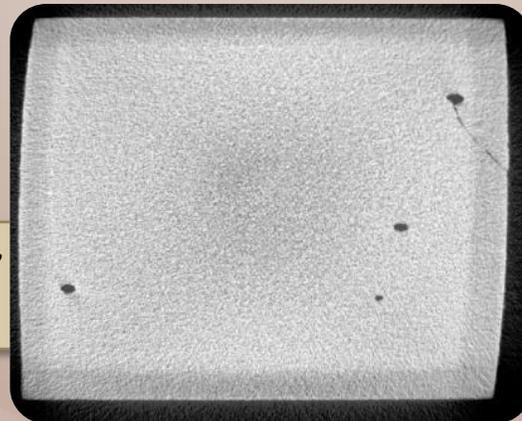


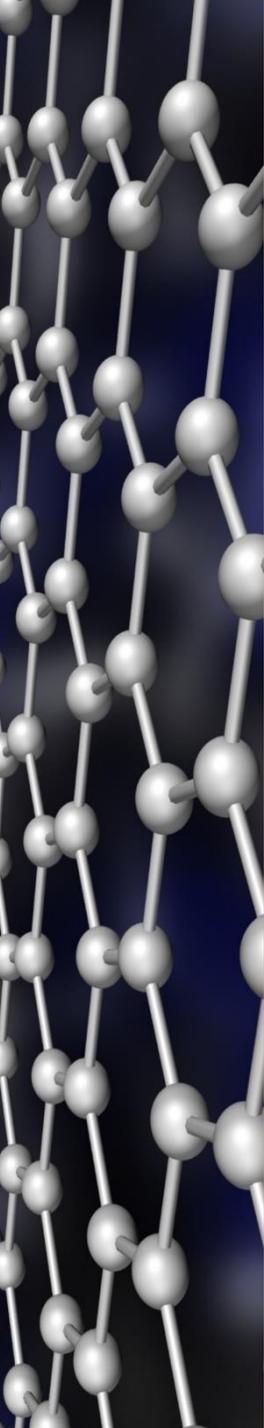
Исходный и деформированный образец



Пористость в исходном (белая) и в деформированном двойникованием образце (красная)

Сформированная трещина, растущая из поры (правый верхний угол)

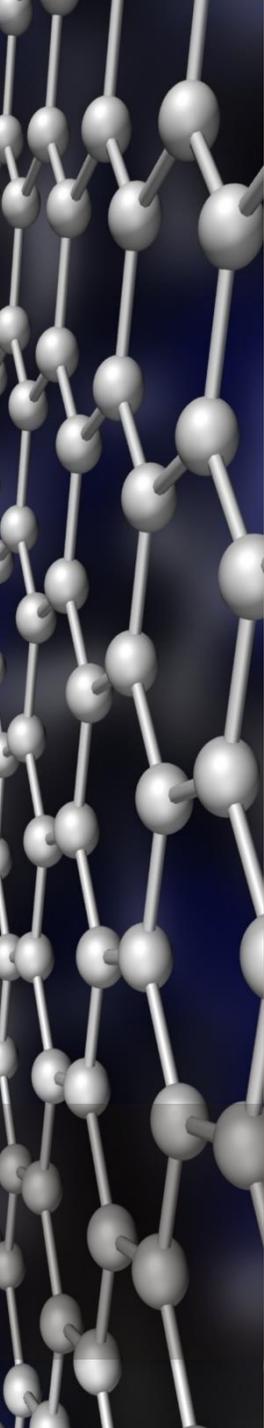




КЛЮЧЕВЫЕ ВОПРОСЫ

- › Охарактеризовать основные механические свойства металлов
- › Описать кривые растяжения и диаграмму условных напряжений. Выбор материала по основным механическим характеристикам.
- › Определение твёрдости и методы. Микро- и нанотвёрдость
- › Механизмы пластической деформации. Разрушение и его виды
- › Особенности методов исследования деформации на различных масштабных уровнях

Охарактеризовать влияние температуры на структуру и свойства деформированного металла. Наклёп и ковка.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!