

Курс МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Кафедра «Технология конструкционных материалов и
производство ракетно-космической техники»

Кристаллическое строение металлов

Кристаллическое строение вещества
Пространственно-кристаллическая решетка
Решетка объемноцентрированная кубическая (ОЦК)
Решетка гранецентрированная кубическая (ГЦК)
Решетка гексагональная плотноупакованная (ГП)
Точечные дефекты
Краевая дислокация
Винтовая дислокация
Границы зерен и субзерен
Схемы скольжения дислокаций
Контур и вектор Бюргерса краевой дислокации
Контур и вектор Бюргерса винтовой дислокации

Кристаллическое строение вещества

Природные кристаллы: кварца-горного хрусталя (а) и топаза (б)

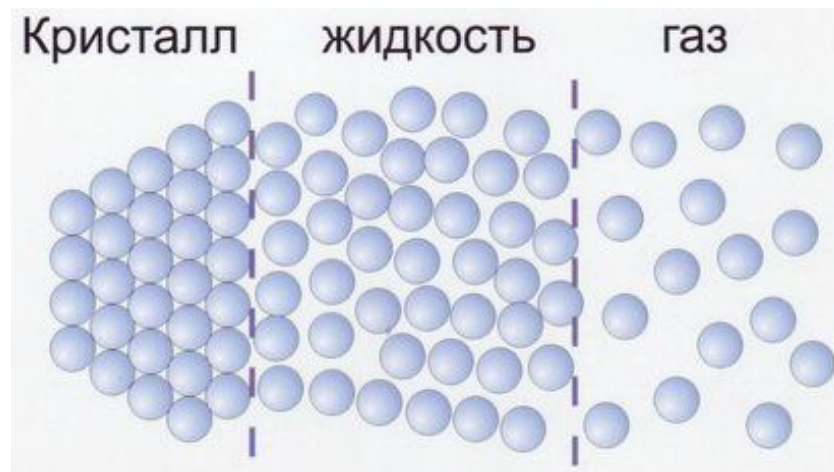
а)



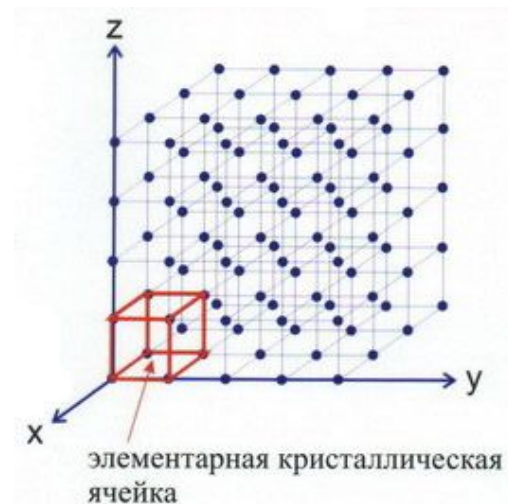
б)



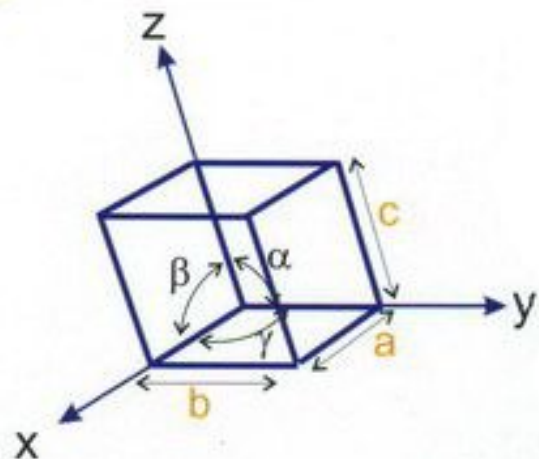
Схематическая модель расположения частиц в веществе



Пространственно-кристаллическая решетка



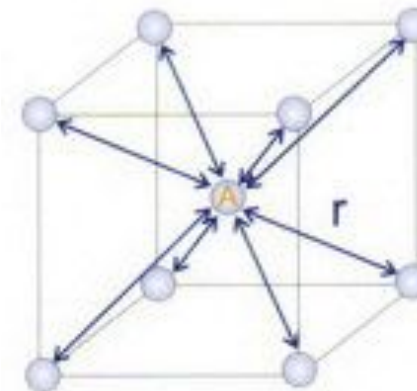
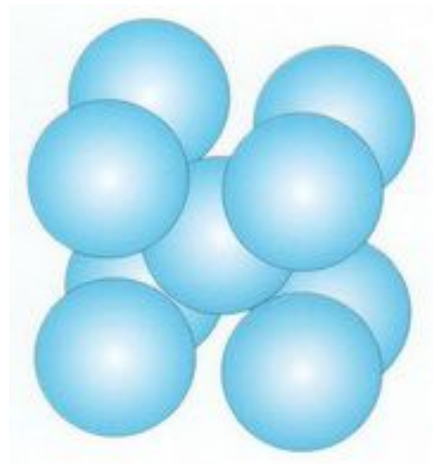
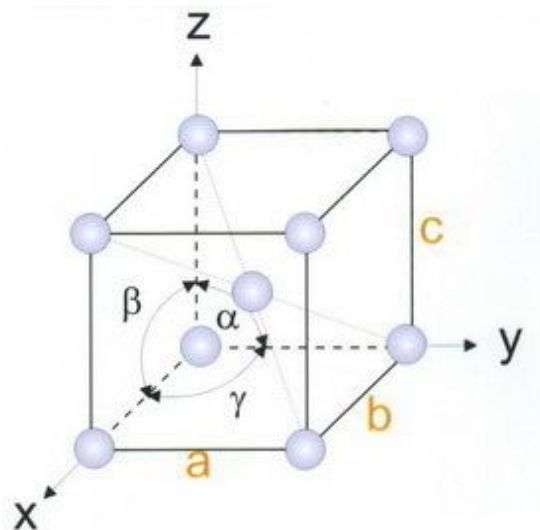
Основные характеристики кристаллической решетки



- углы между осями α , β , γ ;
- периоды решетки a , b , c ;
- число атомов, приходящееся на ячейку n ;
- координационное число Z , равное числу ближайших равноудаленных атомов
- коэффициент компактности K , равный доле объема ячейки, занятой атомами:

$$K = \frac{n \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{V_{\text{яч.}}}$$

Решетка объемноцентрированная кубическая (ОЦК)



r – наименьшее расстояние до соседних атомов

Характеристики решетки

угол между осями

период решетки

число атомов на ячейку

координационное число

коэффициент компактности

$a = b = c$;

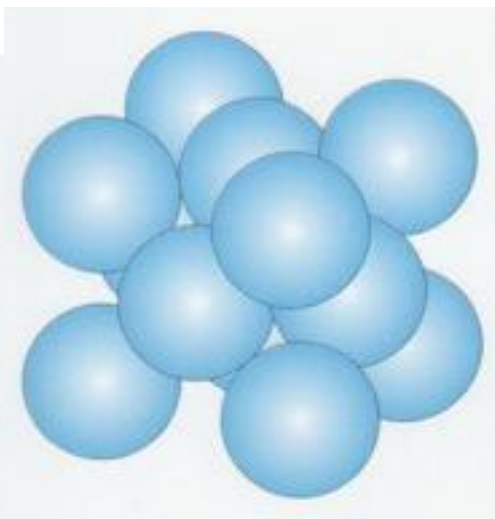
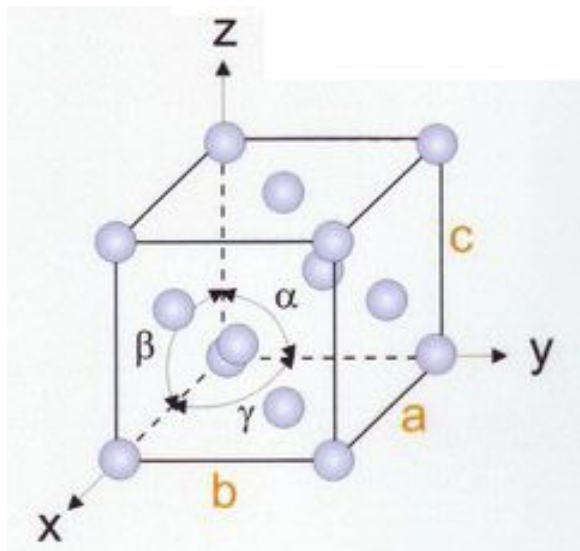
$n = 2$;

$Z = 8$;

$K = 0.68$

$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$;

Решетка гранецентрированная кубическая (ГЦК)



r – наименьшее расстояние до соседних атомов

Характеристики решетки

угол между осями
 период решетки
 число атомов на ячейку
 координационное число
 коэффициент компактности

$$a = b = c;$$

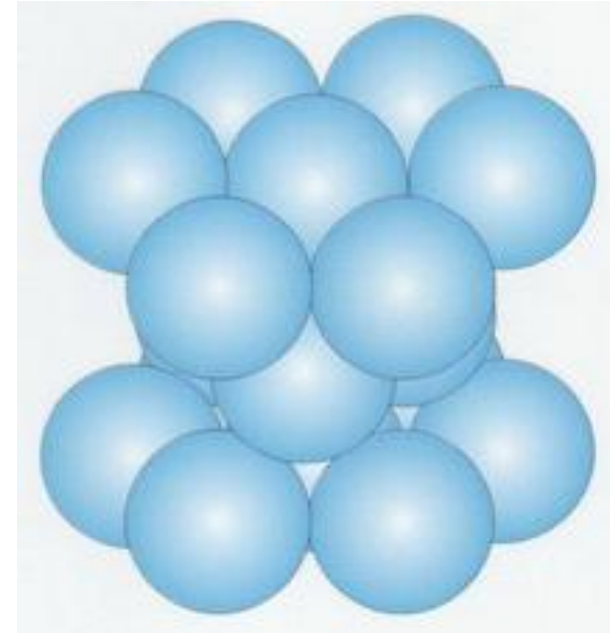
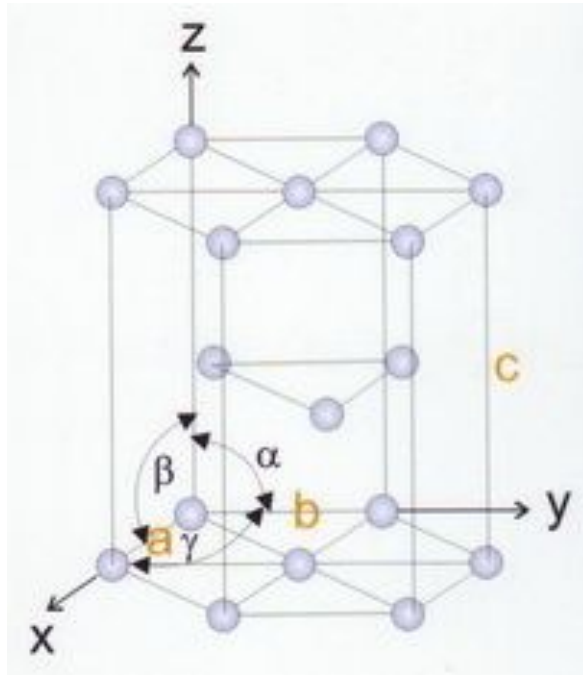
$$n = 4;$$

$$Z = 12;$$

$$K = 0.74$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ;$$

Решетка гексагональная плотноупакованная (ГПУ)



Характеристики решетки

угол между осями
 период решетки
 число атомов на ячейку
 координационное число
 коэффициент компактности
120°;

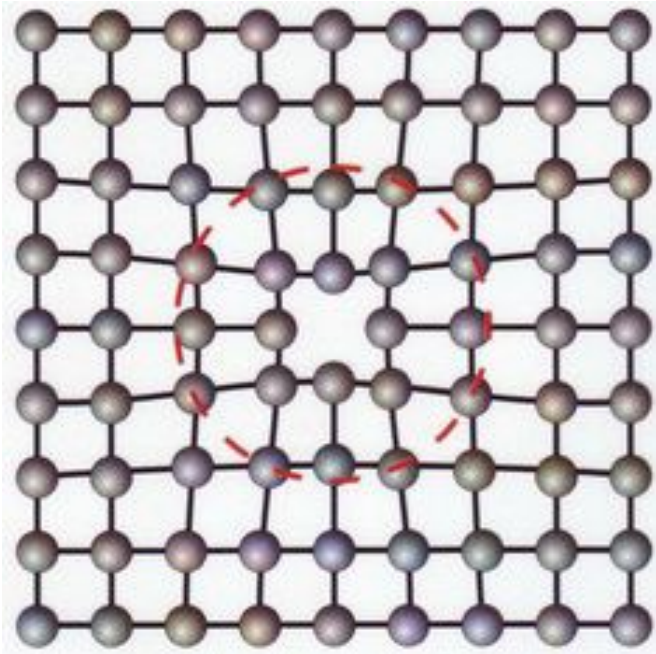
a = b, c = 1,633;

n = 6;

Z = 12;

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma =$$

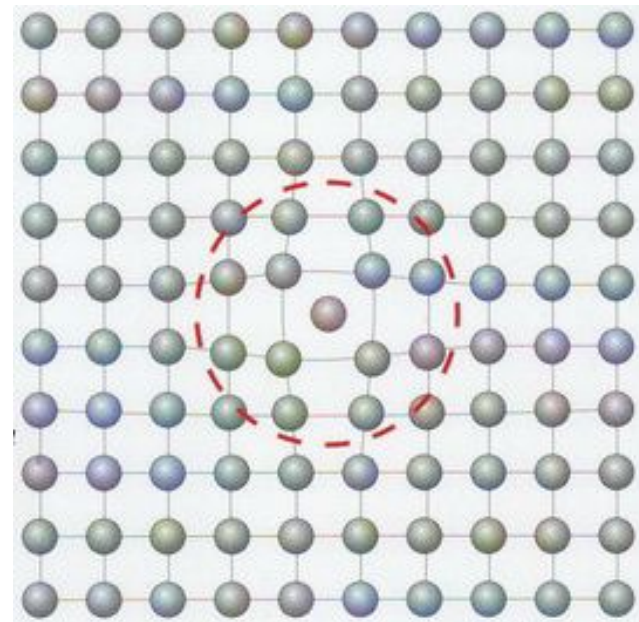
Точечные дефекты



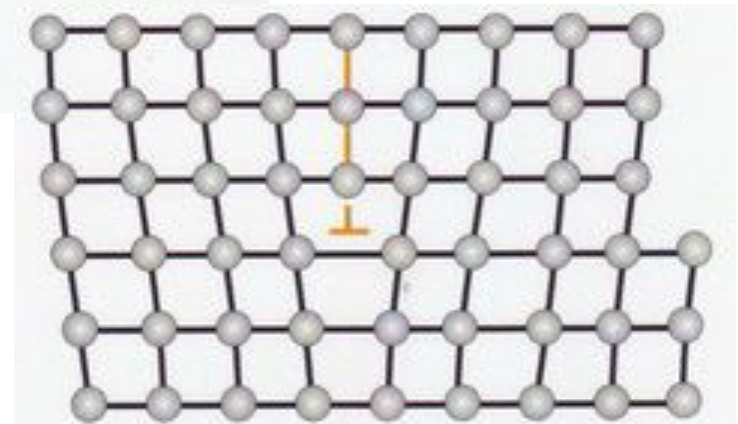
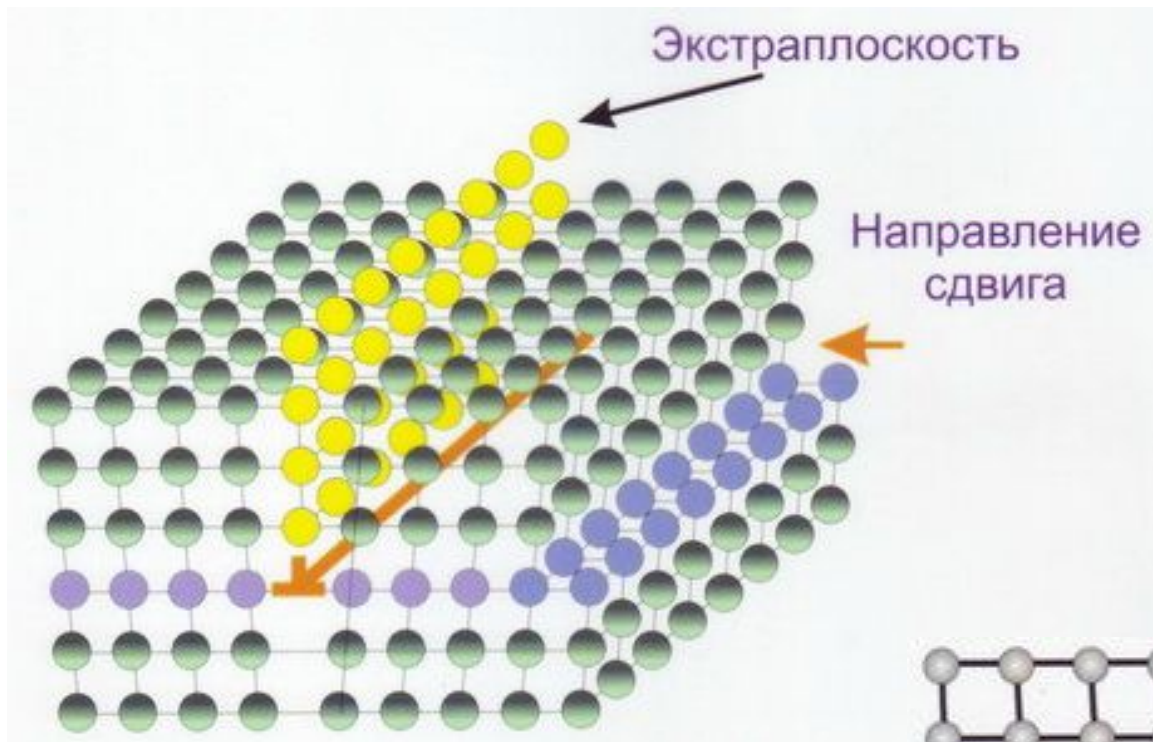
Вакансия – это узел кристаллической решетки незанятый атомом или ионом.

Межузельный атом – атом, расположенный в межатомном пространстве кристаллической решетки

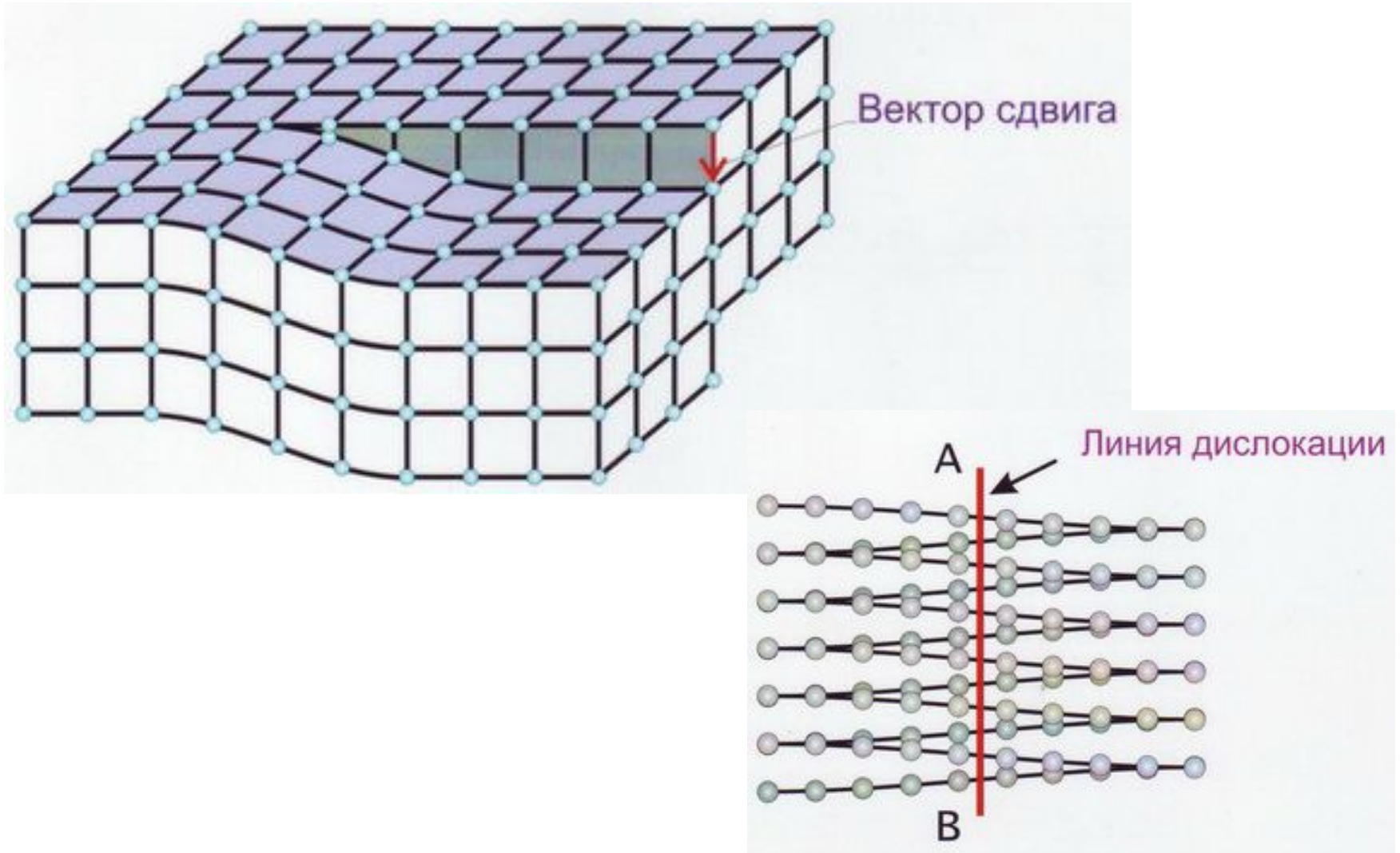
Образование вакансии или межузельного атома приводит к локальному искажению решетки кристалла



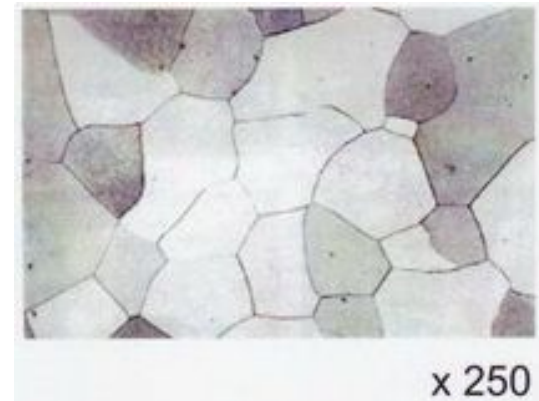
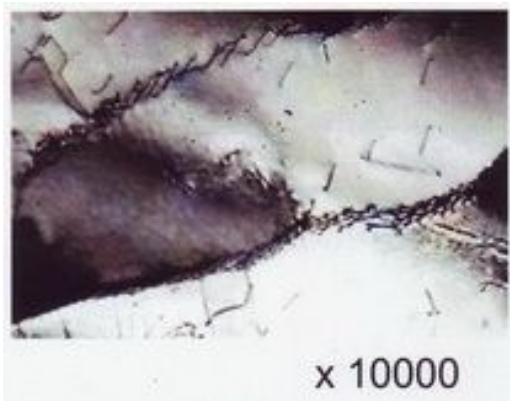
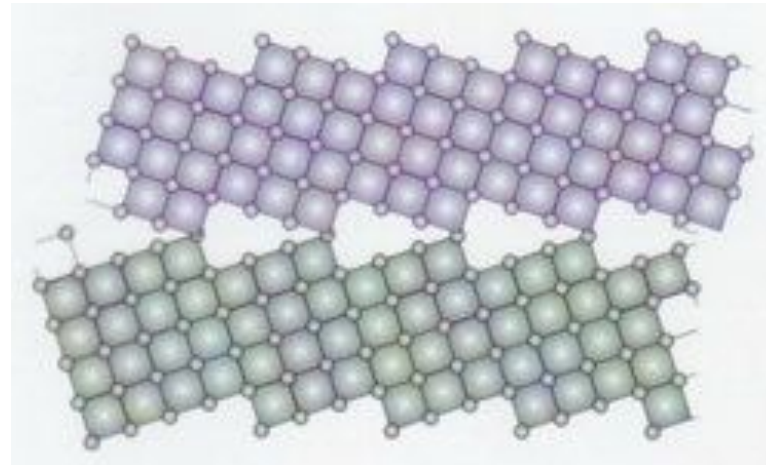
Краевая дислокация



Винтовая дислокация



Границы зерен и субзерен



Малоугловые и большеугловые границы в Fe_γ

Схемы скольжения дислокаций

Схема движения краевой дислокации

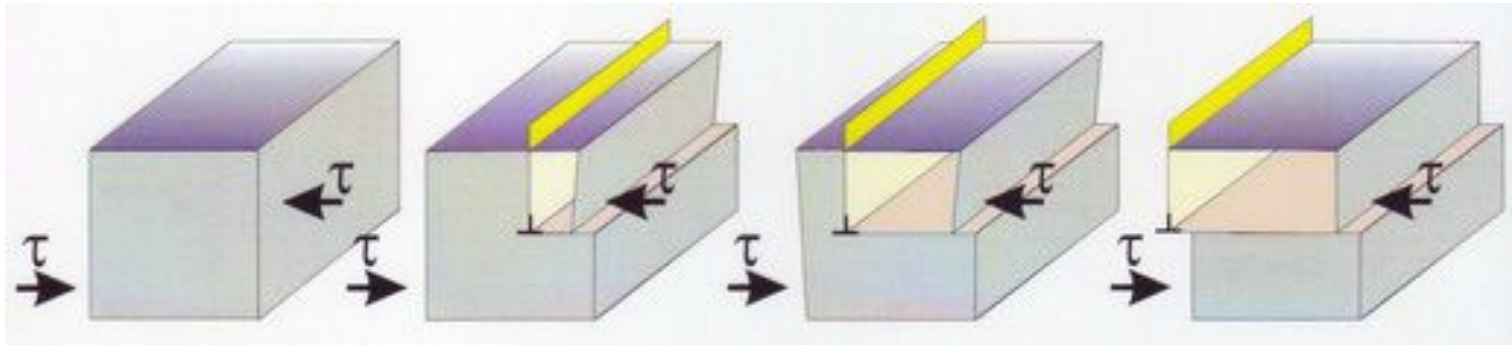
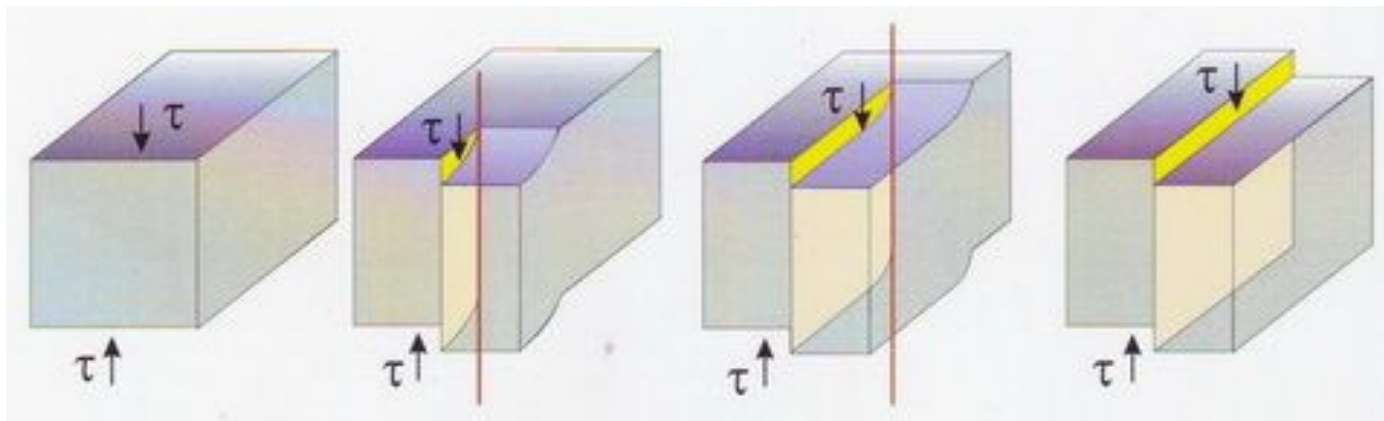
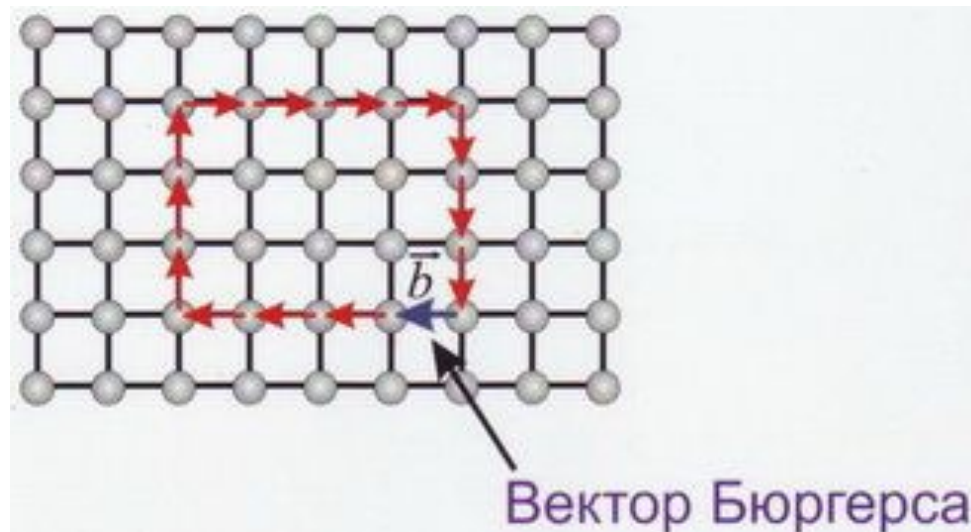
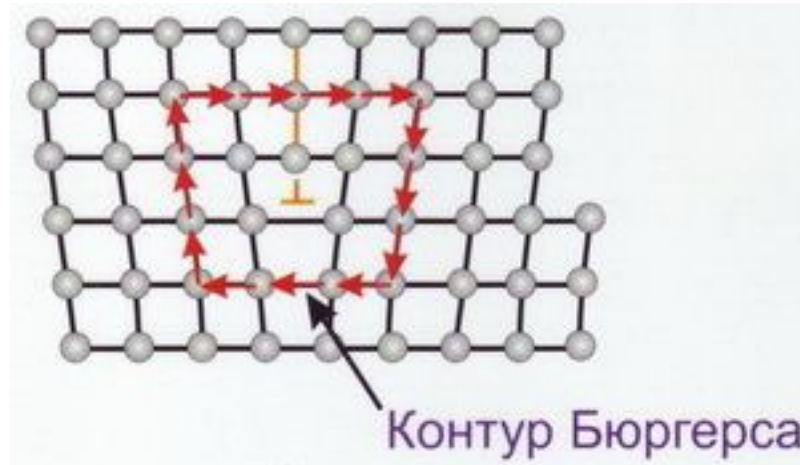


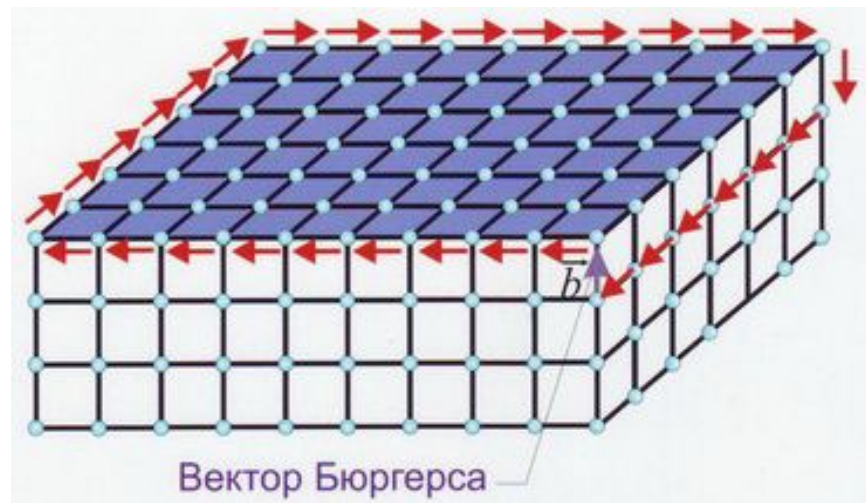
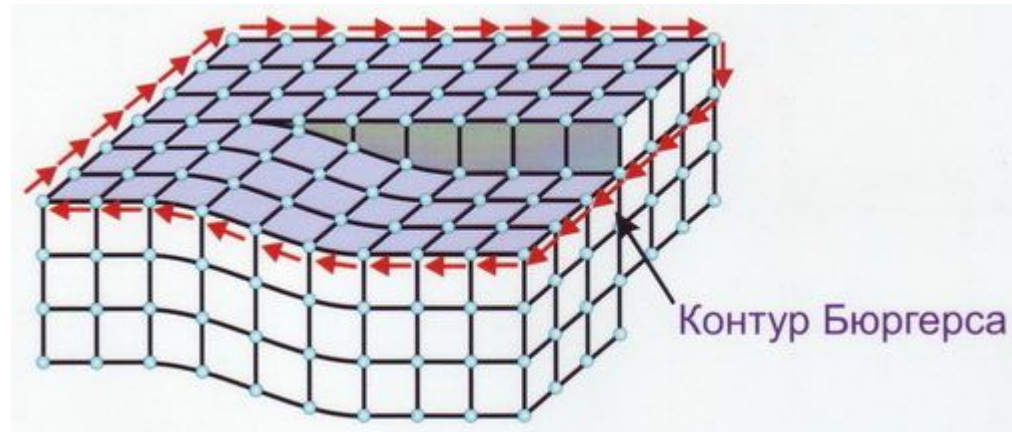
Схема движения винтовой дислокации



Контур и вектор Бюргерса краевой дислокации



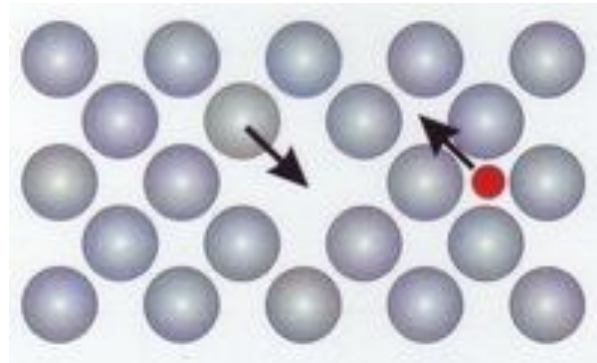
Контур и вектор Бюргерса винтовой дислокации



Диффузия в металлах

Под диффузией понимают перемещение атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные для данного вещества

Диффузия может осуществляться по **вакансионному** и **межузельному** механизмам.



Диффузия сопровождается массопереносом.

Кристаллизация металлов

Самопроизвольная кристаллизация. Схема процесса кристаллизации
Самопроизвольная кристаллизация
Рост зародышевых центров
Строение слитка

Самопроизвольная кристаллизация

Изменение свободной энергии металла



Кривые охлаждения при кристаллизации

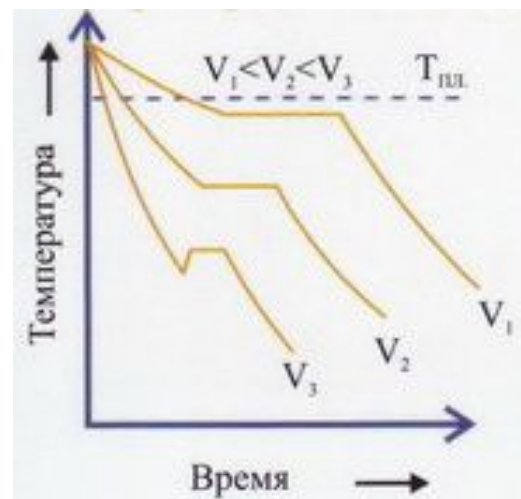
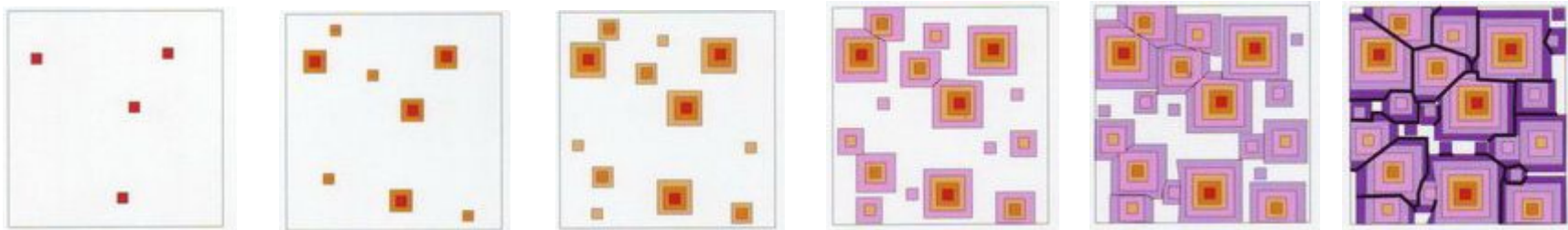
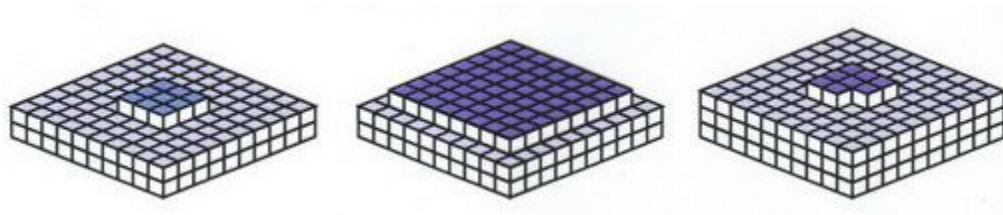


Схема процесса кристаллизации

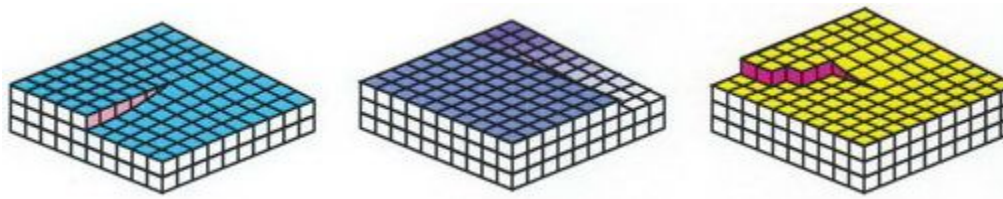


Рост зародышевых центров

с образованием двумерного зародыша



при наличии винтовой дислокации

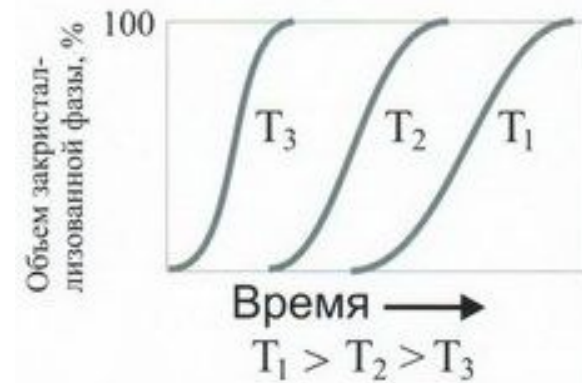


Параметры кристаллизации

Ч.Ц. – число зародышевых центров, возникающих в единице объема за единицу времени

С.Р. – скорость увеличения линейных размеров растущего кристалла

Кинетика кристаллизации



Строение слитка

Схема дендритных кристаллов



Схема макроструктуры слитка



Механические свойства металлов

Испытания на растяжение

Диаграмма условных напряжений

Испытания на растяжение

Измерения твердости по Бринеллю

Измерение твердости по Роквеллу

Испытания на выносливость

Испытания на ударный изгиб

Хрупкое внутризеренное разрушение (скол)

Вязкое внутризеренное разрушение

Межзеренное разрушение

Испытания на растяжение

Разрывной образец до и после испытаний

Кривые растяжения



Диаграмма условных напряжений



$$\sigma = \frac{P}{F_0}$$

Условное напряжение:

где F_0 – исходная площадь поперечного сечения образца

Относительная деформация:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

где l_0 – начальная длина

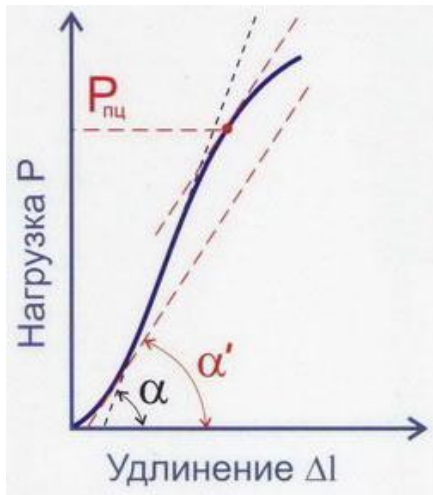
Характеристики прочности (МПа):

Предел пропорциональности – $\sigma_{\text{пл.}}$
 Предел упругости – $\sigma_{\text{упр.}}$
 Предел текучести – σ_{T} ($\sigma_{0,2}$)
 Предел прочности
 (временное сопротивление) – $\sigma_{\text{в}}$

Характеристики пластичности (%):

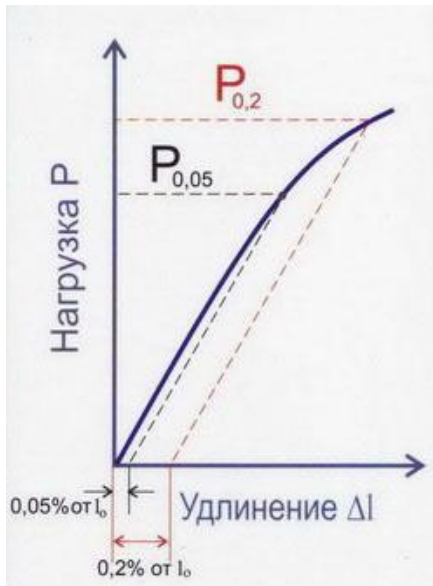
Относительное удлинение – δ
 Относительное сужение – ψ

Испытания на растяжение



Предел пропорциональности – напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и деформацией достигает некоторой определенной величины

$$\sigma = \frac{P_{пц}}{F_0}$$



Предел упругости – напряжение, при котором остаточная деформация достигает заданной величины.

Остаточная деформация выбирается от 0,05 до 0,005%

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}$$

Испытания на растяжение



Физический предел текучести – напряжение, при котором образец деформируется под действием неизменной нагрузки.

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}$$

Предел прочности или **временное сопротивление** – условное напряжение, соответствующее максимальному усилию, которое может выдержать образец до разрушения.

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

Условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) – напряжение, которому соответствует остаточная деформация, равная 0,2%.

Относительное удлинение –

где l_0 – начальная длина образца

l_K – конечная длина образца

Относительное сужение –

где F_0 – исходная площадь поперечного сечения образца,

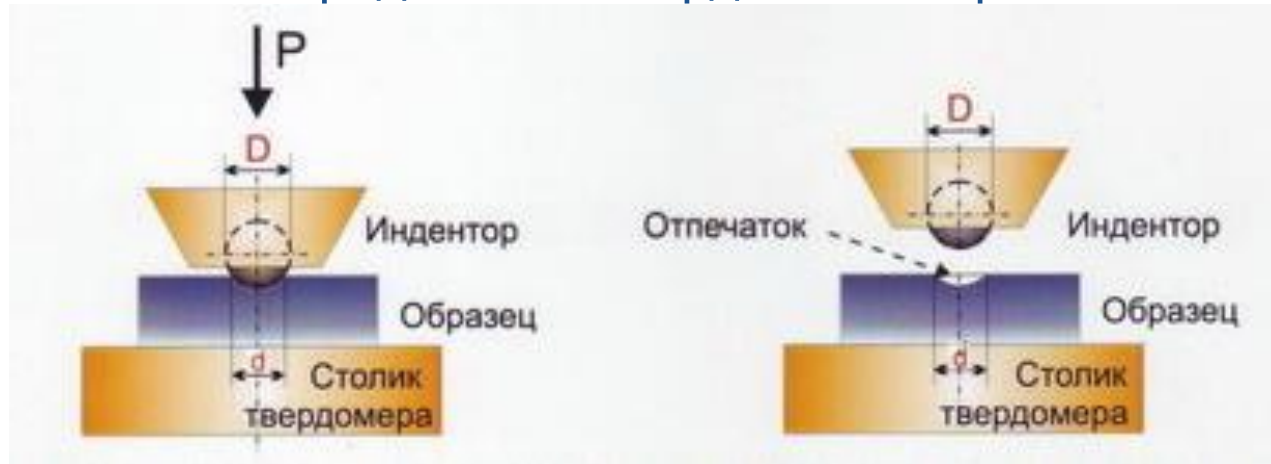
F_K – площадь поперечного сечения образца в месте разрушения

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

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

Измерения твердости по Бринеллю

Схема определения твердости по Бринеллю



Индентор – стальной закаленный шарик диаметром D , равным 10, 5 или 2,5 мм.

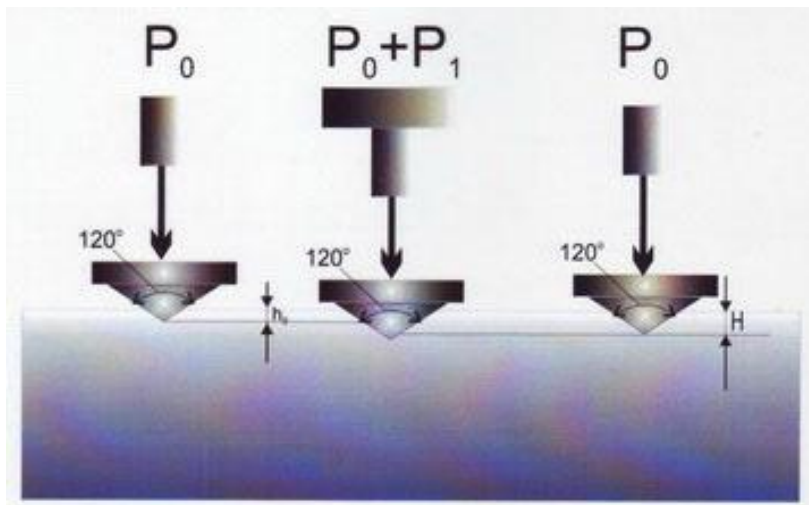
Нагрузка – от $2,5D^2$ до $30D^2$ (кГс)

Время выдержки под нагрузкой – 10, 30 или 60 секунд.

Число твердости по Бринеллю (НВ) – отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка $F_{отп}$

$$HB = \frac{P}{F_{отп}} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

Измерение твердости по Роквеллу



Индентор – алмазный конус с углом 120° при вершине или стальной шарик диаметром 1,588 мм.

P_0 – предварительная нагрузка (100Н)

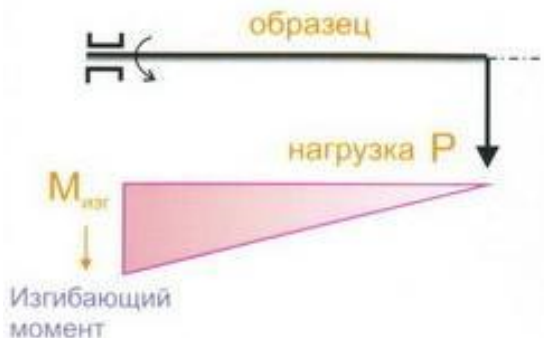
P_1 – основная нагрузка.

Единица твердости по Роквеллу (HR) – безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002мм.

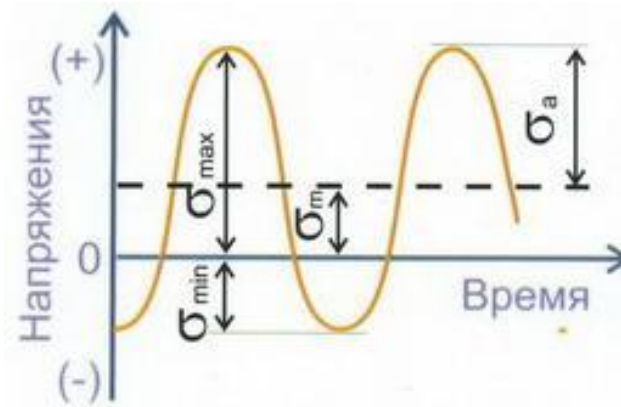
Обозначения твердости	Индентор (наконечник)	Шкала индикатора	Основная нагрузка	Расчетная формула
HRC HRA	алмазный конус	С А	1400 Н 500 Н	$100 - \frac{H - h_0}{0,002}$
HRB	стальной шарик	В	900 Н	$130 - \frac{H - h_0}{0,002}$

Испытания на выносливость

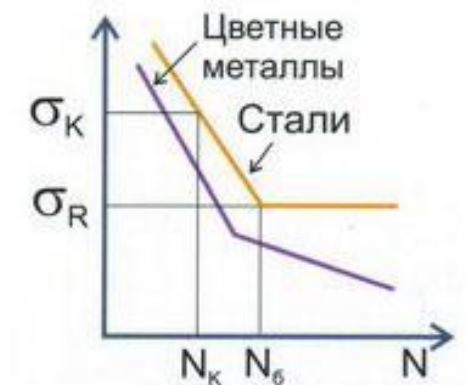
Схема нагружения – изгиб с вращением



Цикл напряжений



Кривые усталости



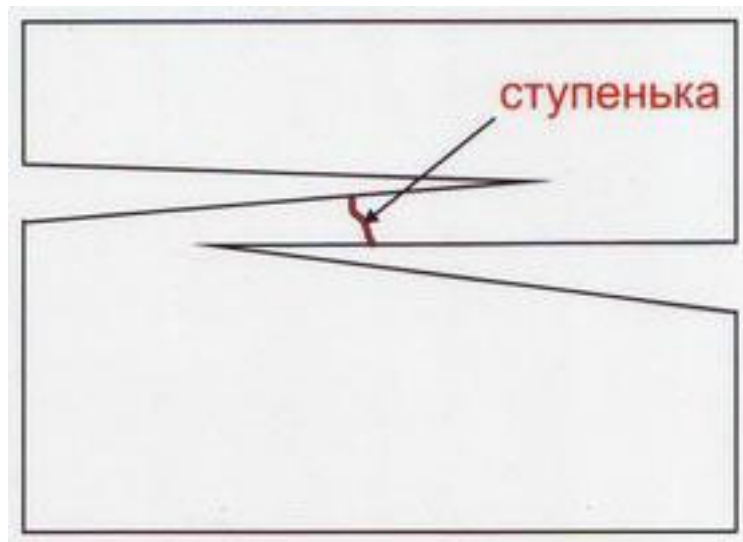
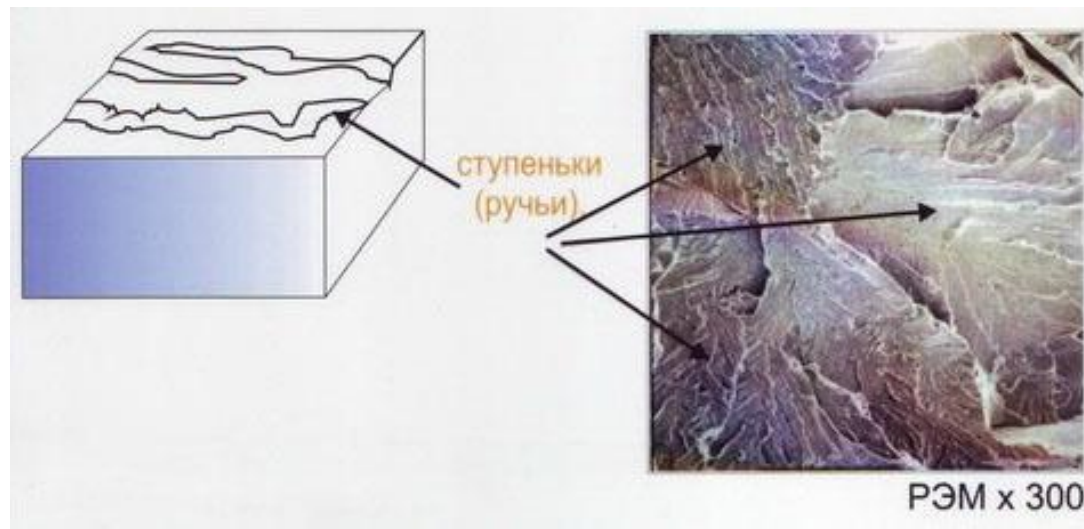
Разрушение при усталости (схема)



Испытания на ударный изгиб

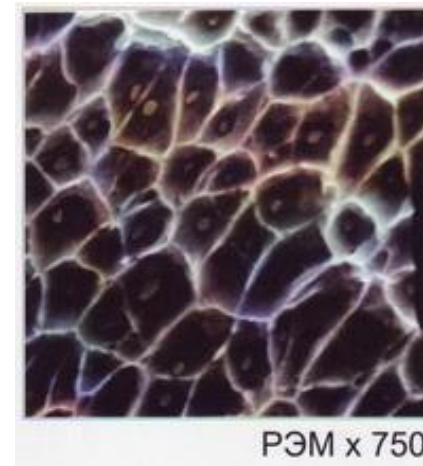
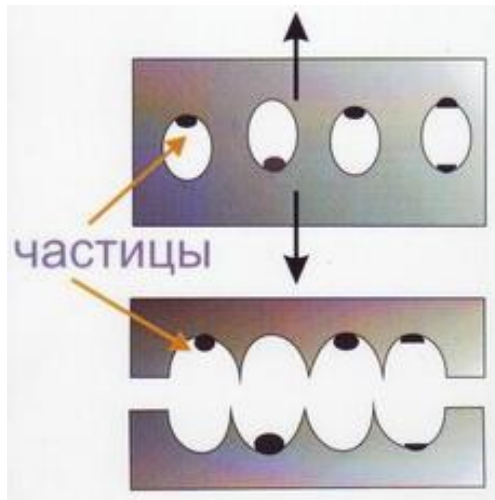
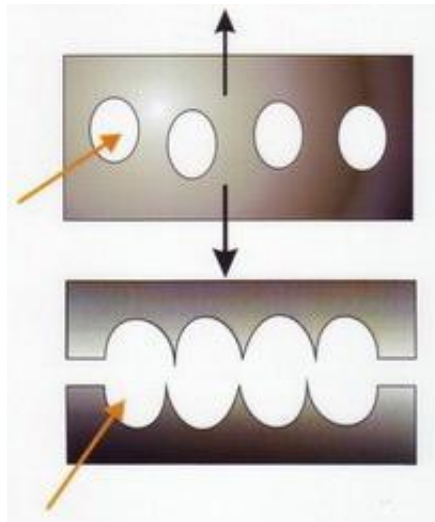
Схема испытания

Хрупкое внутризеренное разрушение (скол)



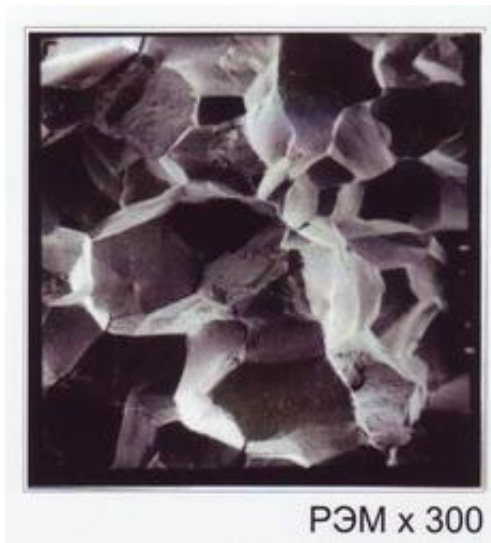
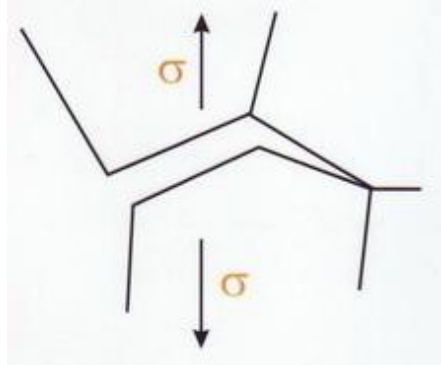
Хрупкое разрушение Fe_α происходит по плоскостям $\{100\}$

Вязкое внутризеренное разрушение

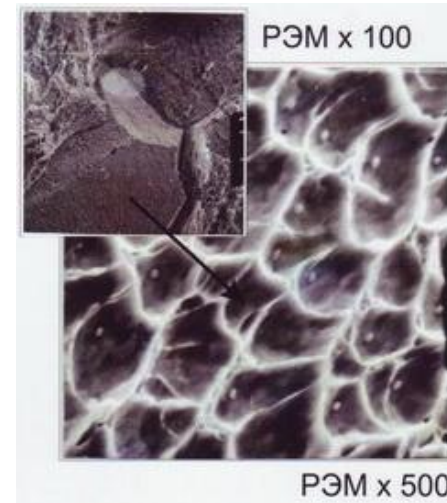
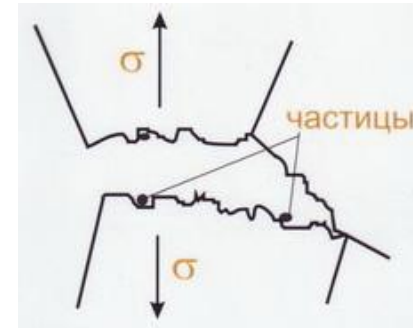


Межзеренное разрушение

Хрупкое разрушение



Вязкое разрушение



Пластическая деформация металлов, влияние нагрева на структуру и свойства деформированных металлов

Деформация скольжением

Деформация двойникованием

Изменение микроструктуры при пластической деформации

Текстура деформации

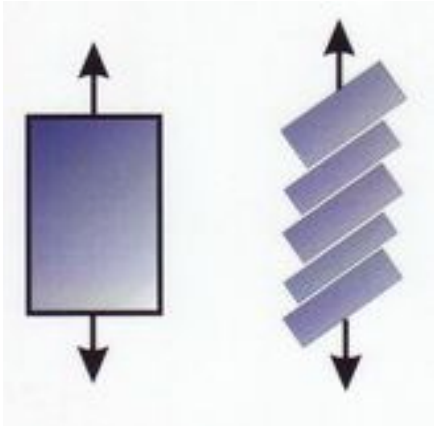
Пути повышения прочности металлов

Полигонизация

Рекристаллизация

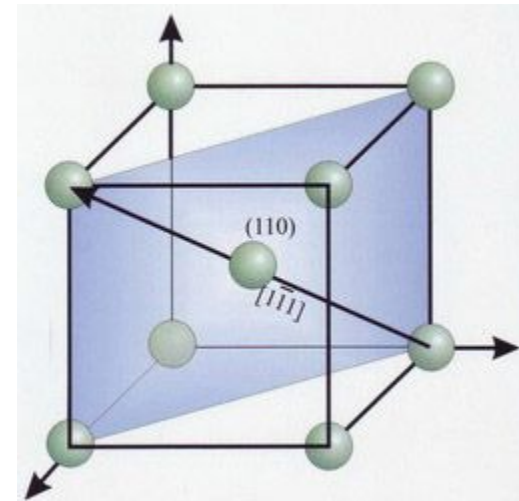
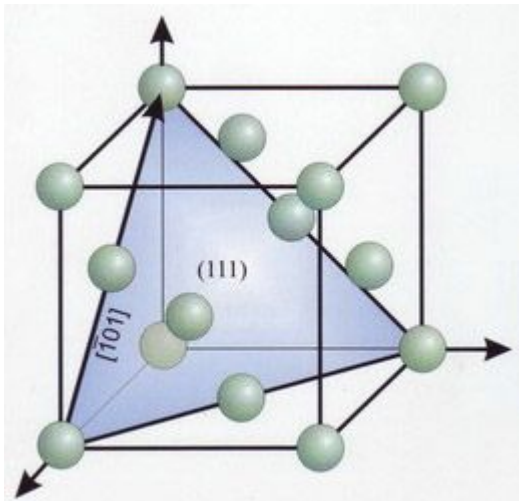
Влияние нагрева на свойства деформированного металла

Деформация скольжением



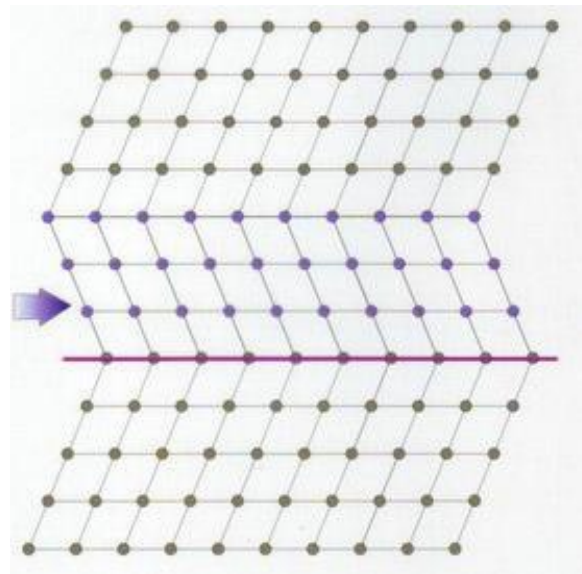
Полосы скольжения в деформированном алюминии

Плоскости и направления скольжения



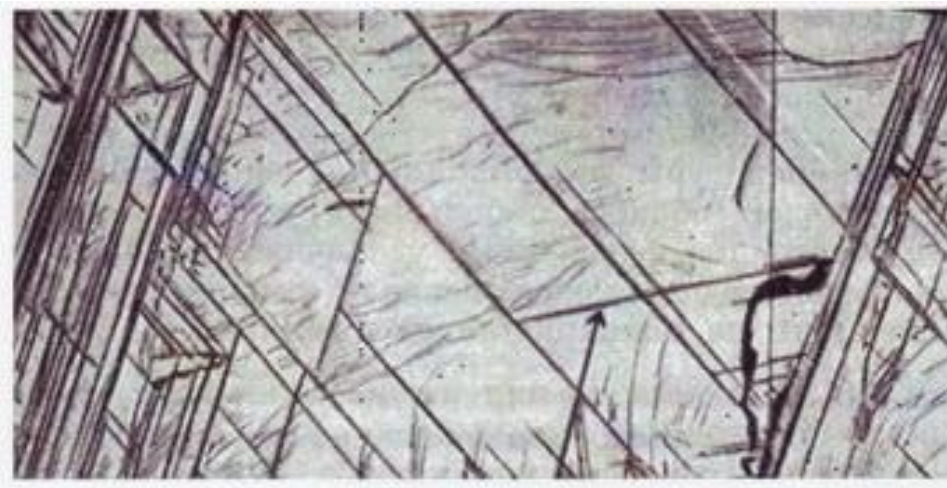
Деформация двойникованием

Двойник



Плоскость двойника

Двойники деформации в кристалле цинка



Изменение микроструктуры при пластической деформации

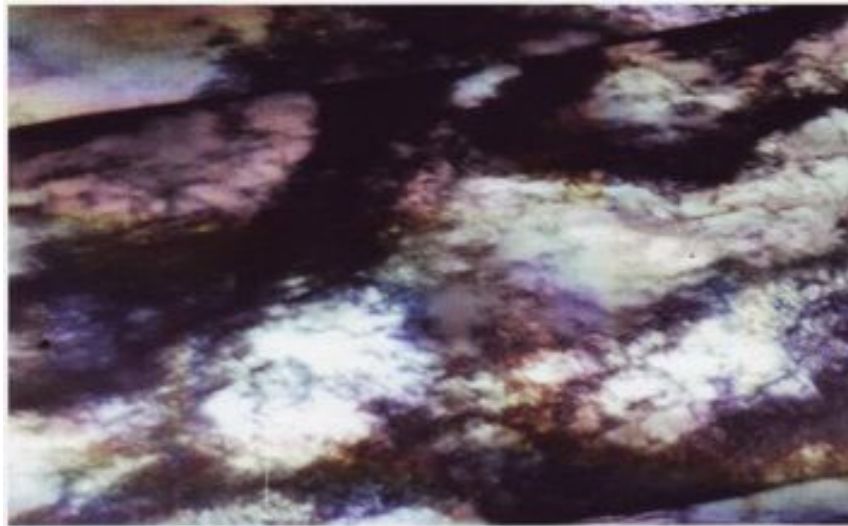


Исходная структура



Увеличение степени деформации

Ячеистая дислокационная структура деформированного металла



Текстура деформации

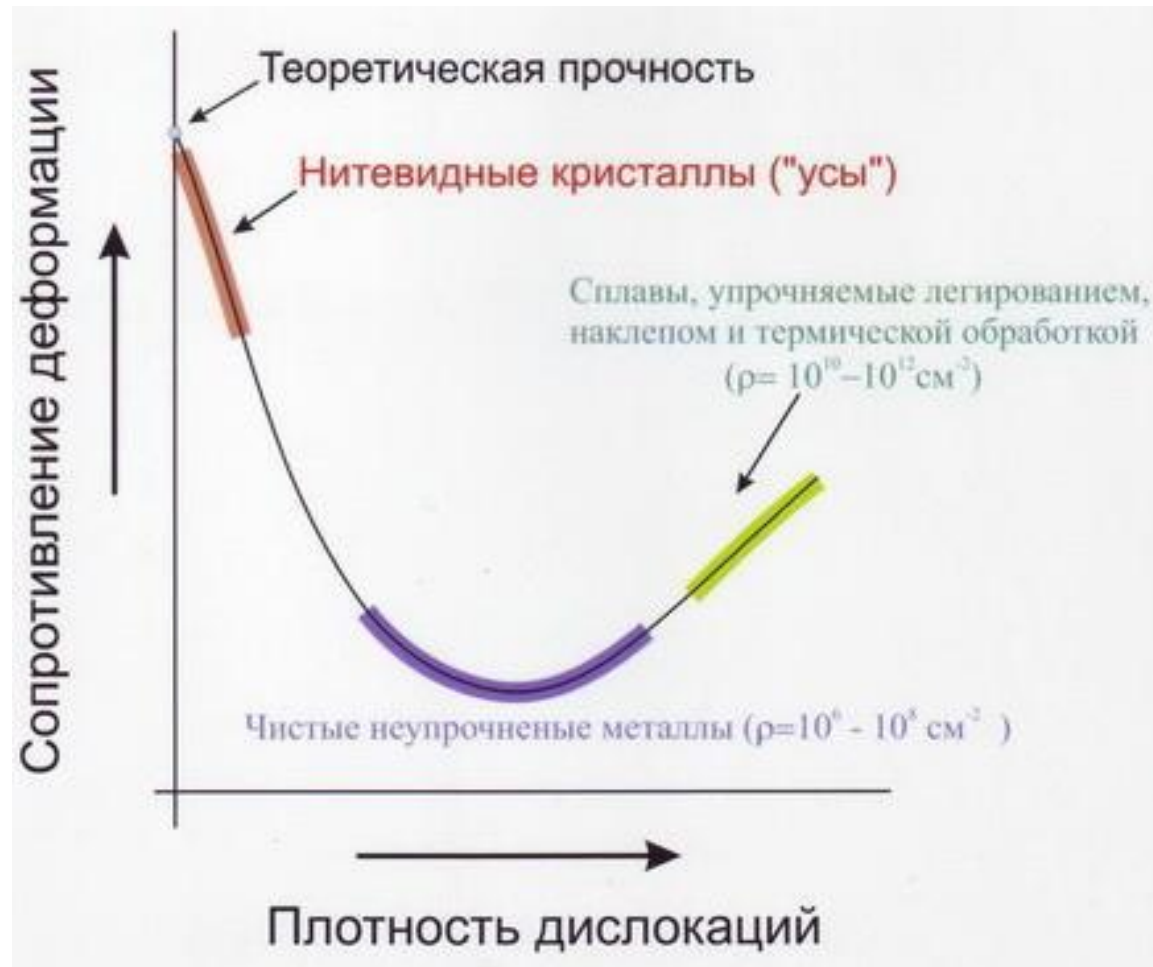
Преимущественная пространственная ориентировка кристаллической решетки зерен называется **текстурой**

При интенсивном деформировании возникает **текстура деформации**

Текстура при волочении

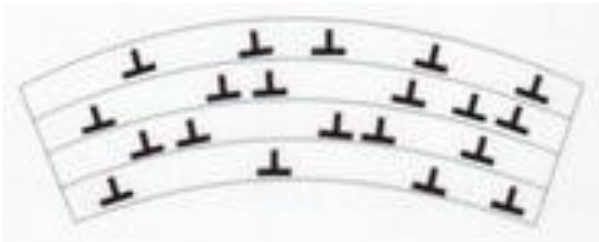


Пути повышения прочности металлов



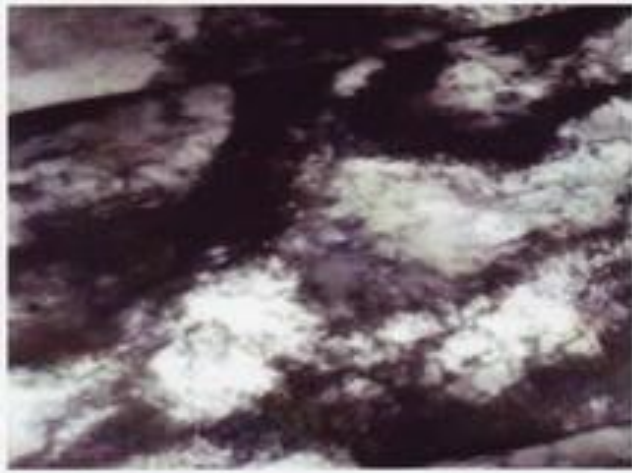
Полигонизация

Схема полигонизации

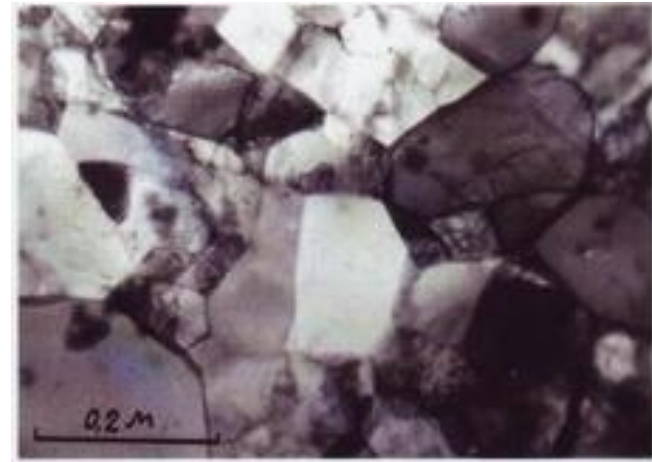


Изменение структуры при нагреве

Структура после
холодной деформации



Структура после
холодной деформации



Рекристаллизация

Хрупкое разрушение

Вязкое разрушение

Влияние нагрева на свойства деформированного металла

Хрупкое разрушение

Вязкое разрушение