Материаловедение

Добровольская Ирина Петровна

доктор физико-математических наук

Ведущий научный сотрудник

Институт высокомолекулярных соединений

РАН

Литература

- ***Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И.*** **Материаловедение: Учебник для вузов.-СПб: Химиздат, 2007. - 784 с.**
- Материаловедение: Учебник для вузов / Под ред. Арзамасова Б.Н. - 3-е изд. – М.: Машиностроение, 2002. – 646с.
- ***Гуляев А.П.*** **Металловедение: Учебник для вузов.- 6-е изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.**

Материаловедение – наука, изучающая связи между составом, структурой и свойствами металлов, полимеров и композиционных материалов.

Наука о строении и свойствах твердых тел насчитывает около 200 лет.

Российские ученые:

П.П. Аносов в 1831г. впервые изучил влияние углерода на свойства стали.

Д.К. Чернов установил наличие полиморфизма железа.

Тема лекции

- **Кристаллическое строение материалов**

  -типы кристаллических решеток

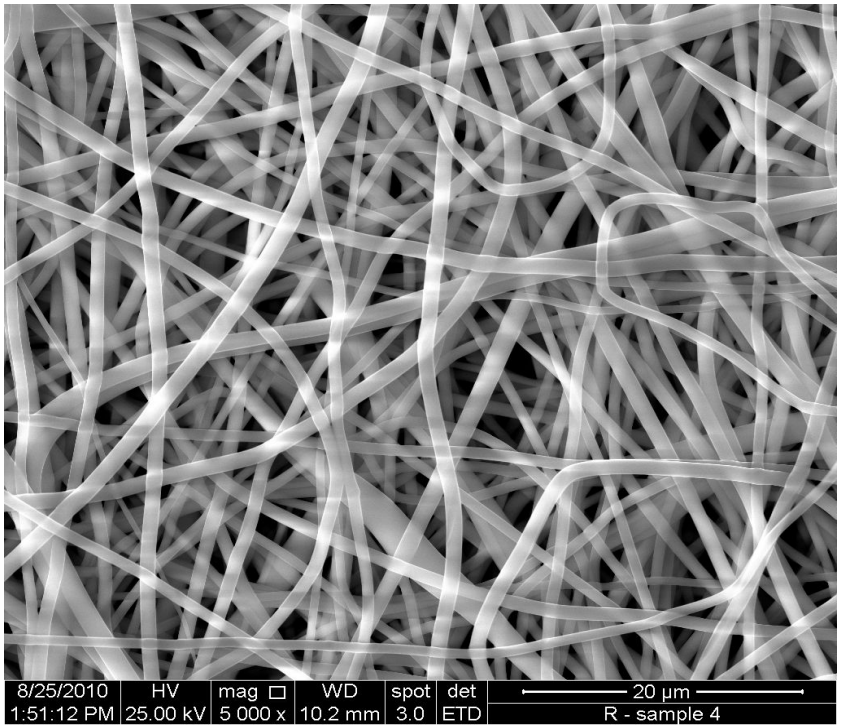
  - дефекты кристаллов

-

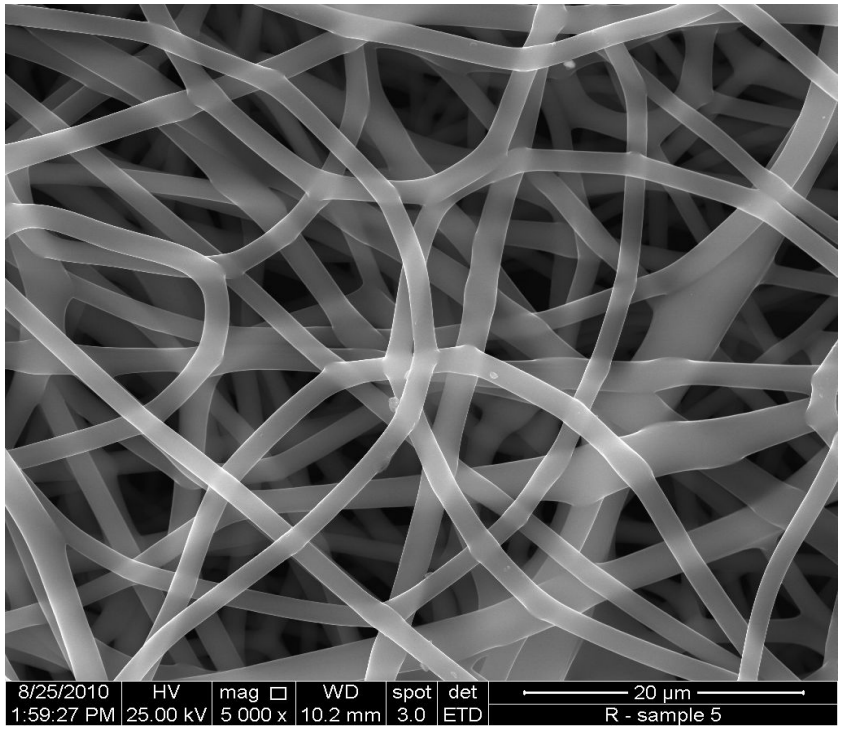
Современные направления развития материаловедения

- Высокопрочные, высокомодульные материалы
  Сталь - 1 500 МПа
  Полимеры – 3 500 МПа
  Углерод – 5 500 МПа
- Радиационностойкие
- Термо- и жаростойкие
- Хемостойкие
- Материалы с заданными трибологическими свойствами
- ***Наноматериалы*** *(нано - 10^{-9} м)*

3D-Matrices Processed by Electro-Spinning



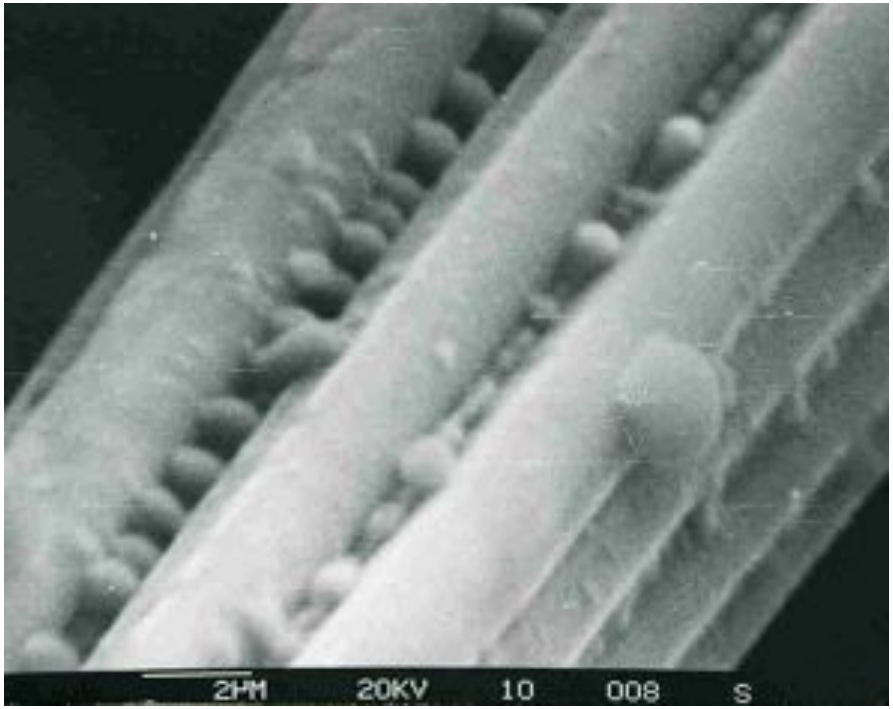
CoPA 20% Ø 800 nm

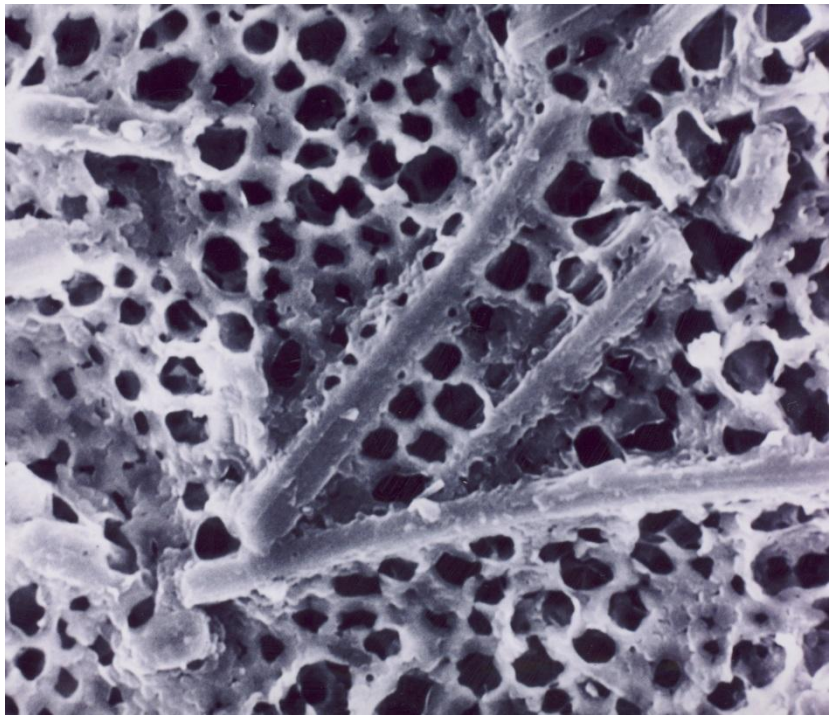


CoPA 30% Ø 1500 nm

Dependence of Fiber's Diameter on Concentration of CoPA Polymer Solution

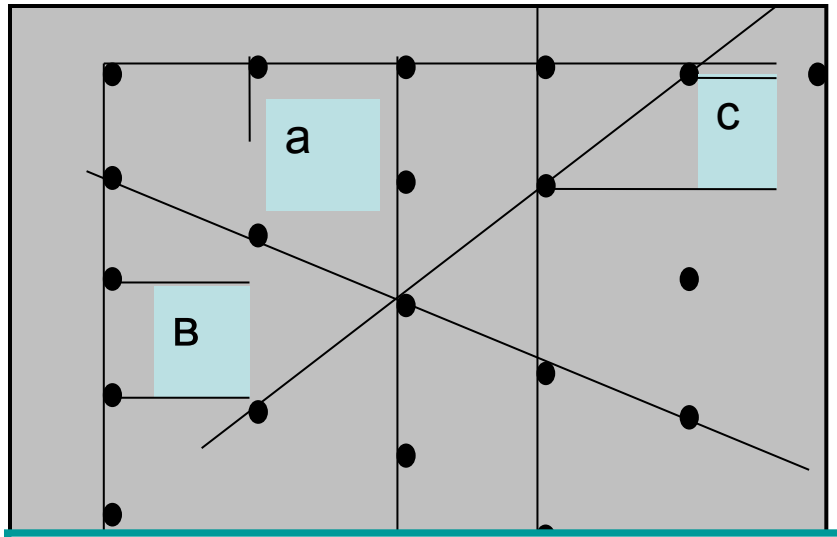
Примеры наноструктур

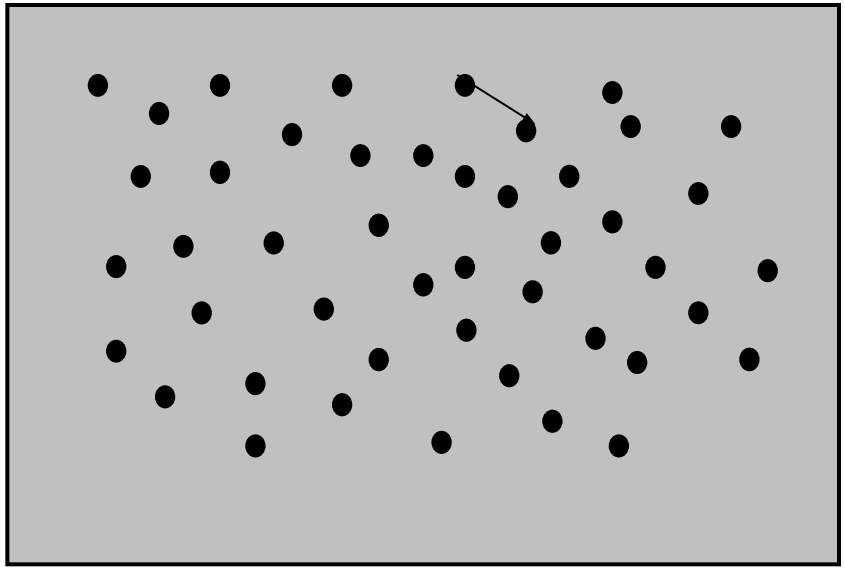




Кристаллическая структура материалов

Типы упорядоченности в твердых и жидких телах



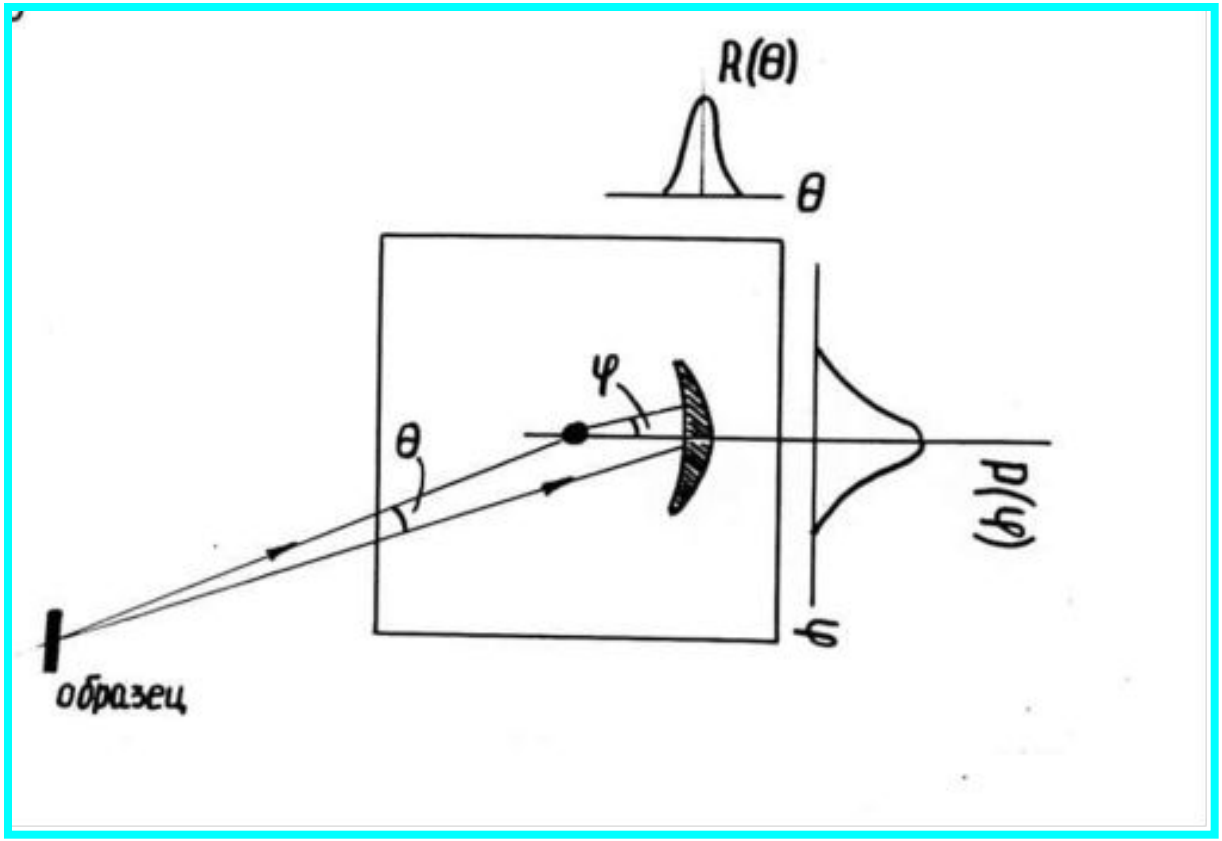


Дальний порядок – в каком - то направлении, на расстоянии ***na*** от заданного атома **обязательно** находится атом

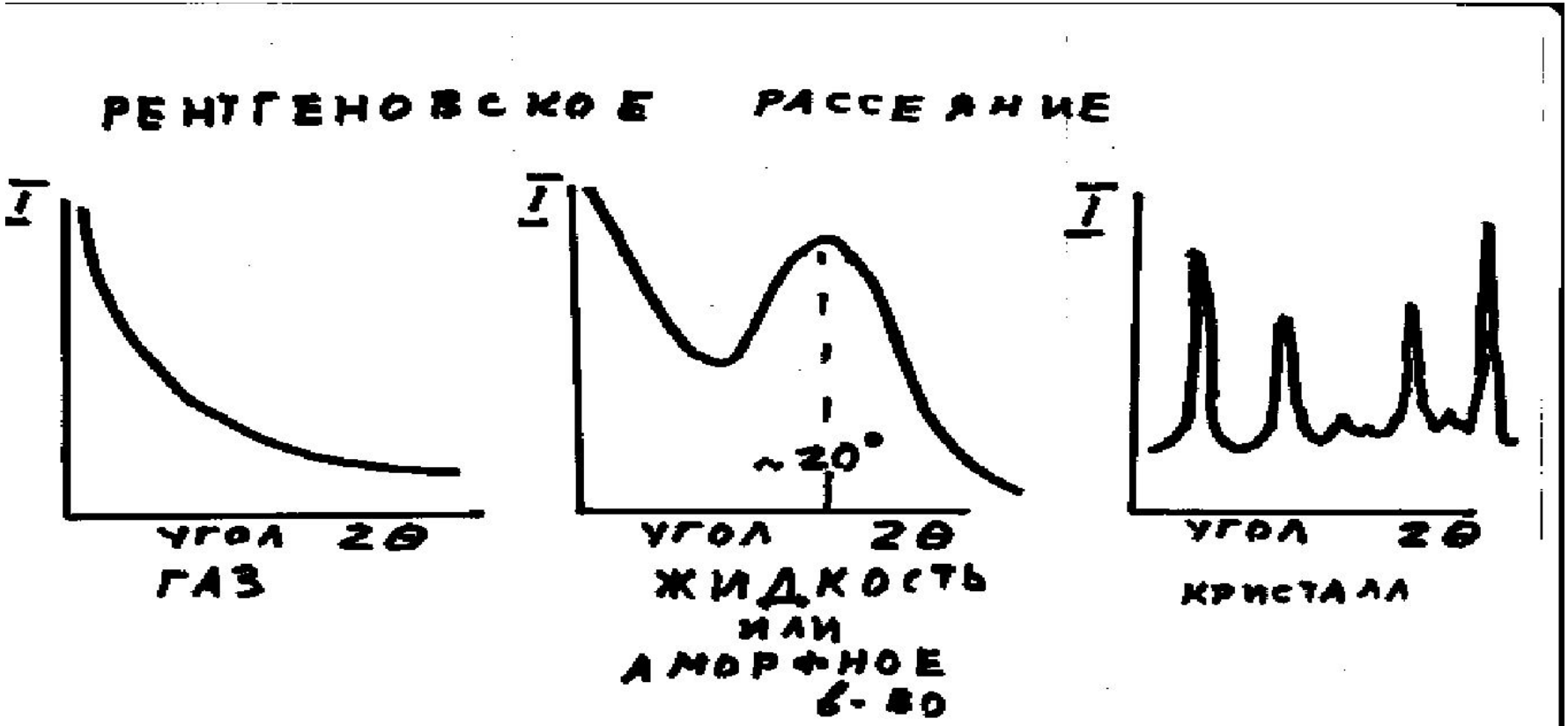
Ближний порядок

a – среднее расстояние между атомами

Схема рентгеновского рассеяния



Рентгеновское рассеяние газом, жидкостью и кристаллическим веществом



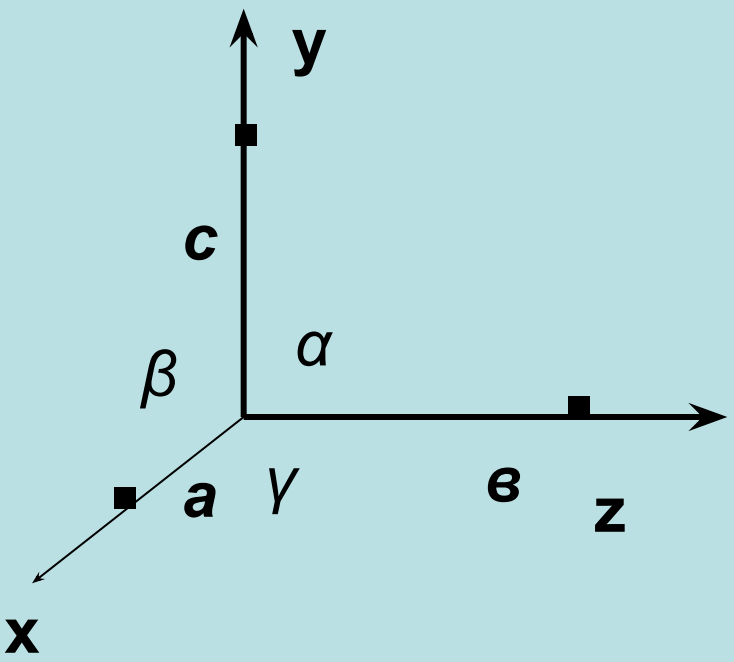
Кристаллические структуры

Для описания кристаллической структуры используют понятие **кристаллической ячейки**.

Трансляцией этого наименьшего объема можно полностью воспроизвести структуру кристалла.

Основные типы кристаллических решеток

- Кубическая
- Тетрагональная
- Ромбическая
- Ромбоэдрическая
- Гексагональная
- Моноклинная
- Триклинная



Расстояния ***а, в, с,*** между центрами атомов, называются ***параметрами*** или ***периодами решетки.***

Кубическая решетка

- Характеристики:

- углы между осями

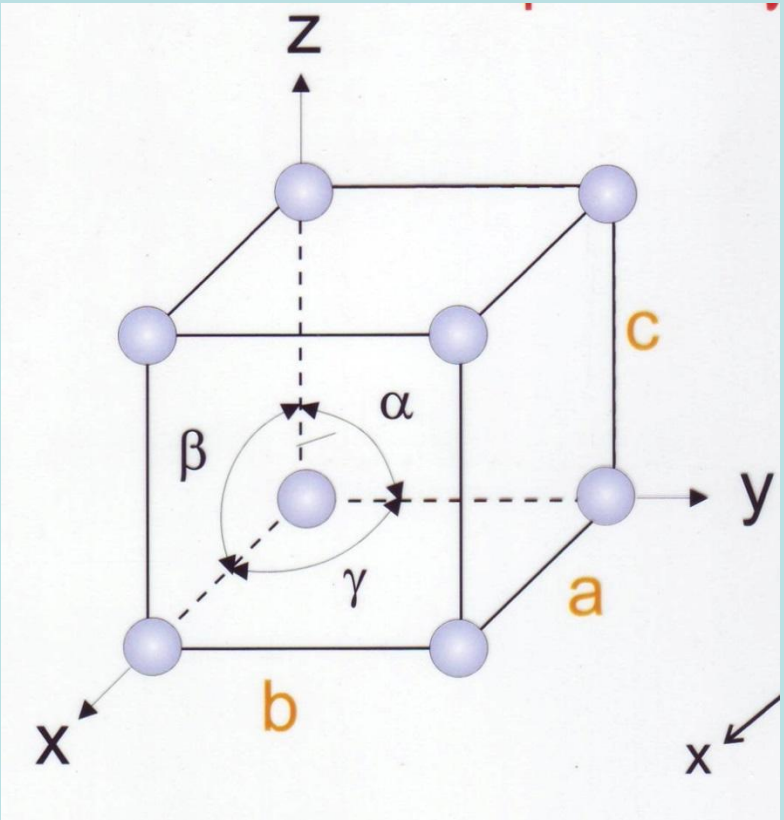
$\alpha = \beta = \gamma = 90^o$

- параметры решетки

$a = b = c$

- координационое

число Z = 6



Объемноцентрированная кубическая (ОЦК)

- Характеристики:

- углы между осями

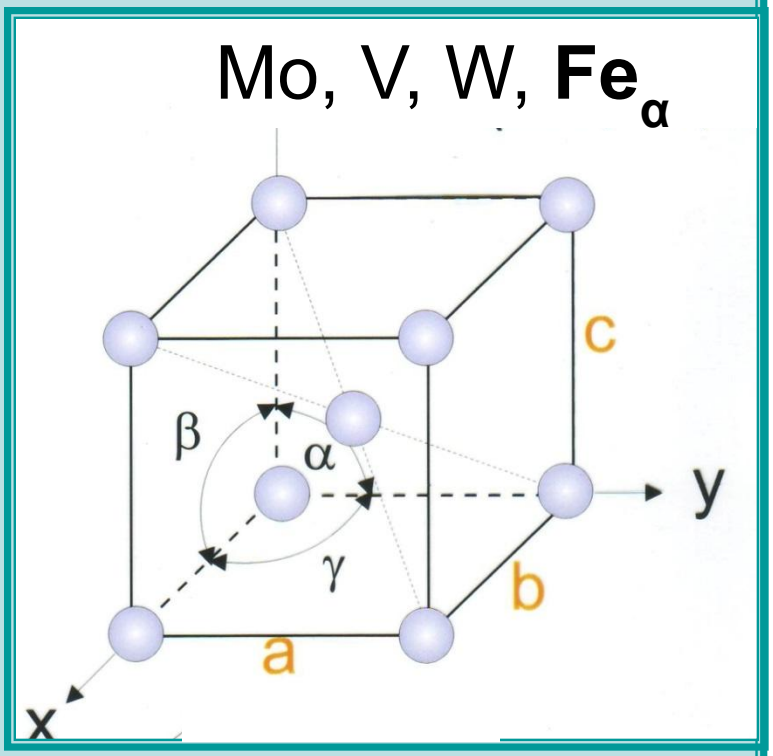
$\alpha = \beta = \gamma = 90^o$

- параметры решетки

$a = b = c$

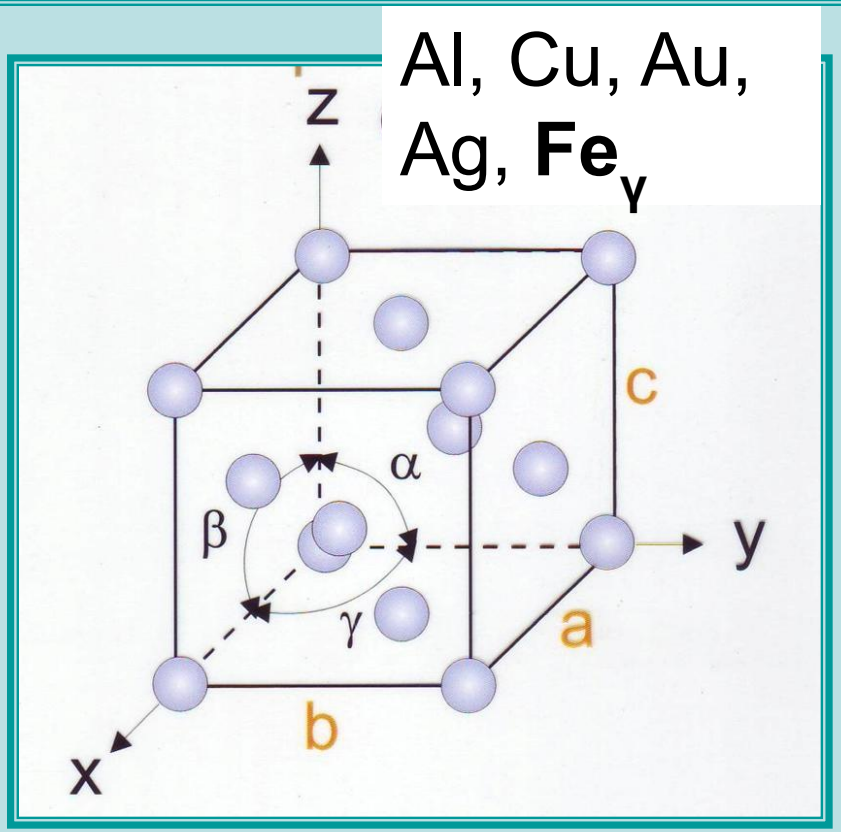
- координационное

число Z=8



Гранецентрированная кубическая (ГЦК)

- Координационное число Z=12



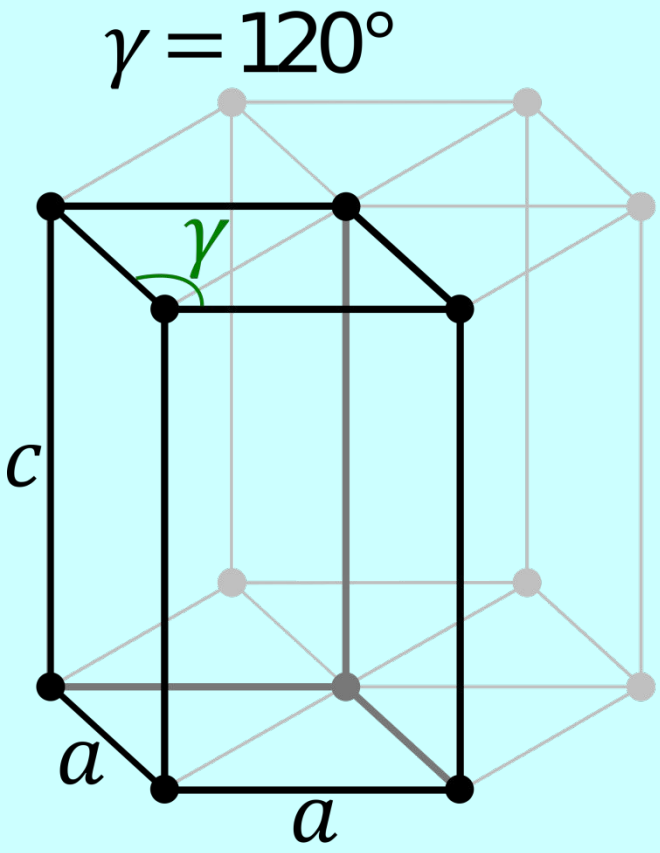
Гексагональная сингония

<u>призма</u>

с основанием

правильного

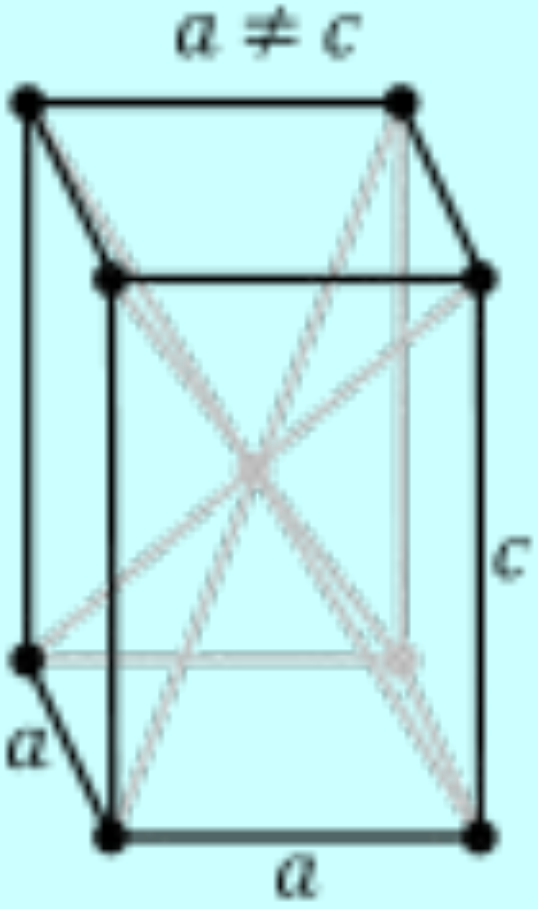
шестиугольника



Тетрагональная сингония

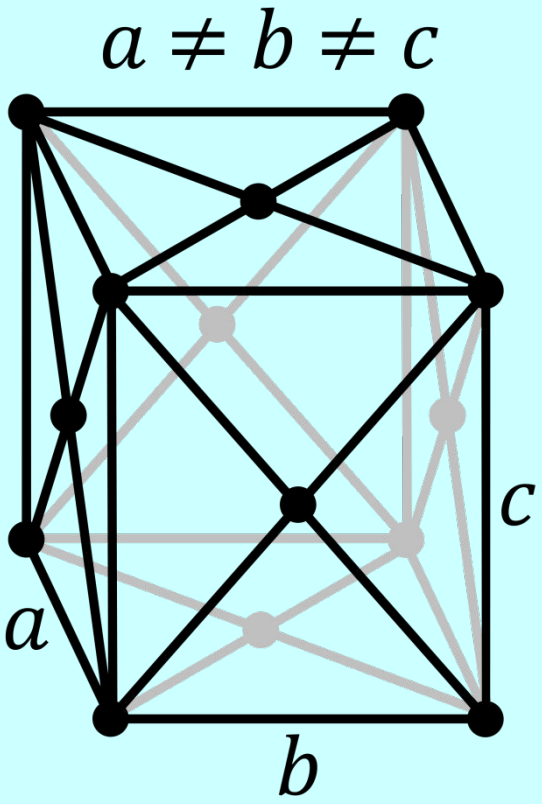
прямоугольный параллелепипед с квадратом в основании,

Все углы 90°



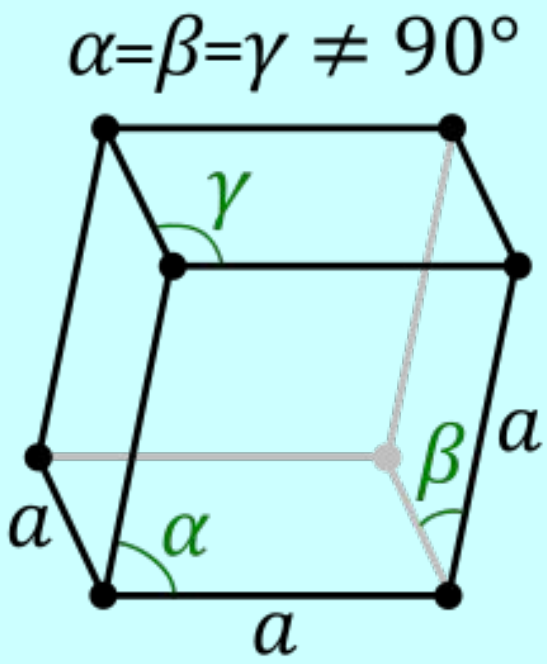
Ромбическая

прямоугольный параллелепипед



Ромбоэдрическая сингония

Все грани - ромбы



Моноклинная

призма

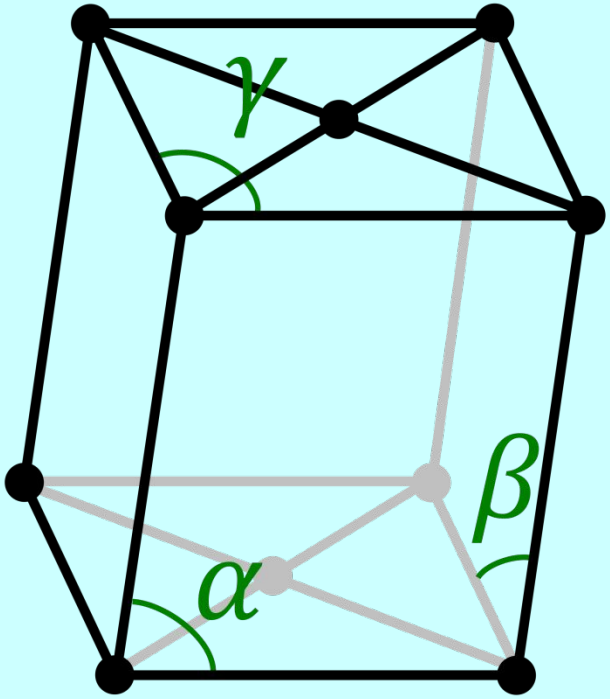
с параллелограммом

в основании

а ≠ в ≠ с

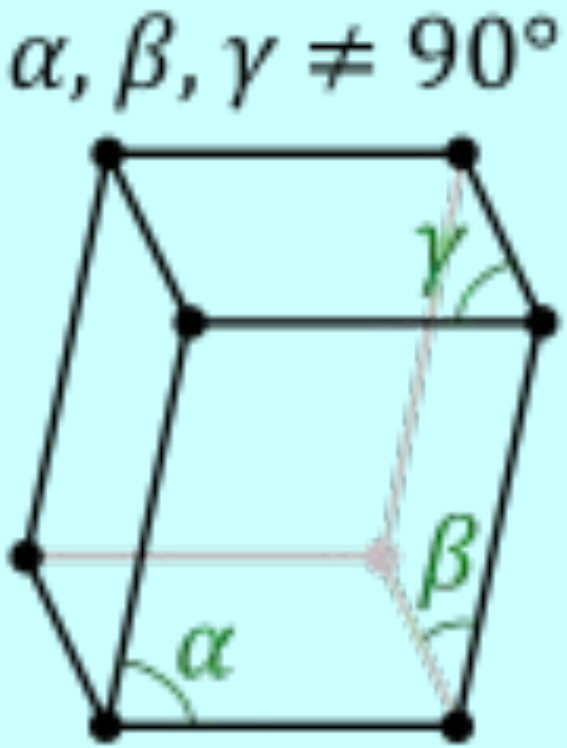
$$\beta \neq 90°$$

$$\alpha, \gamma = 90°$$

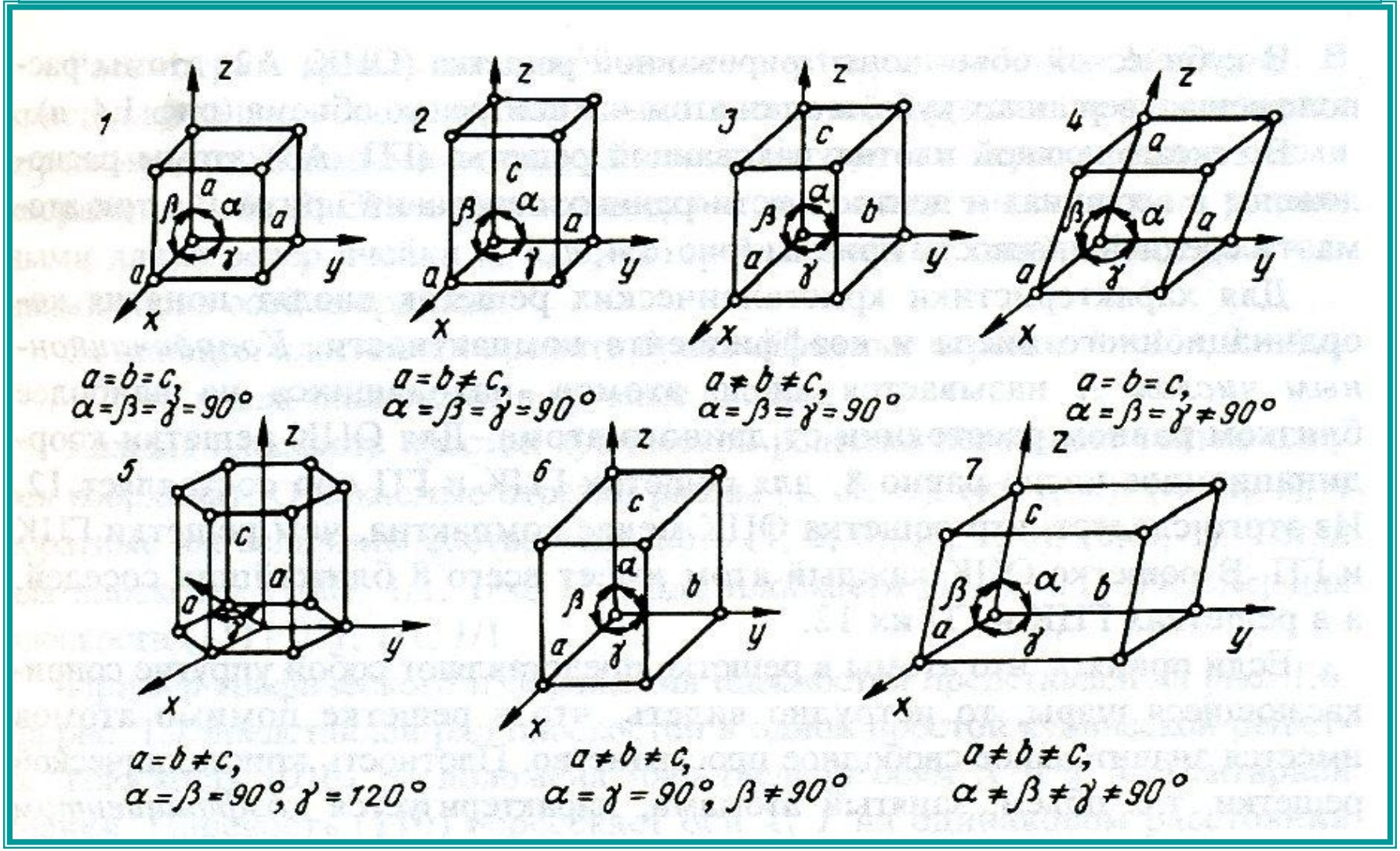


Триклинная

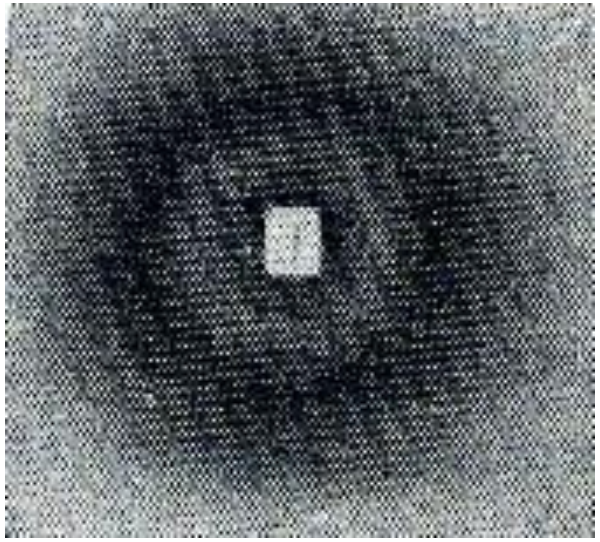
a ≠ в ≠ с



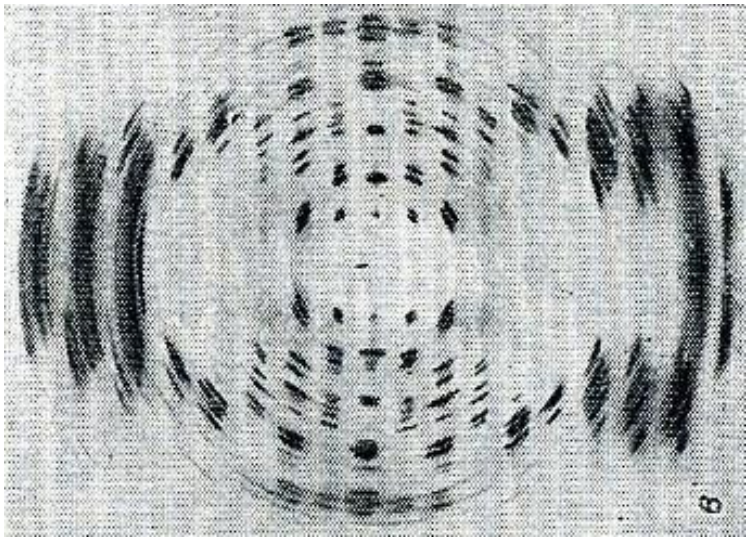
Другие типы кристаллических структур



Методы определения кристаллической структуры
Рентгеновская дифракция

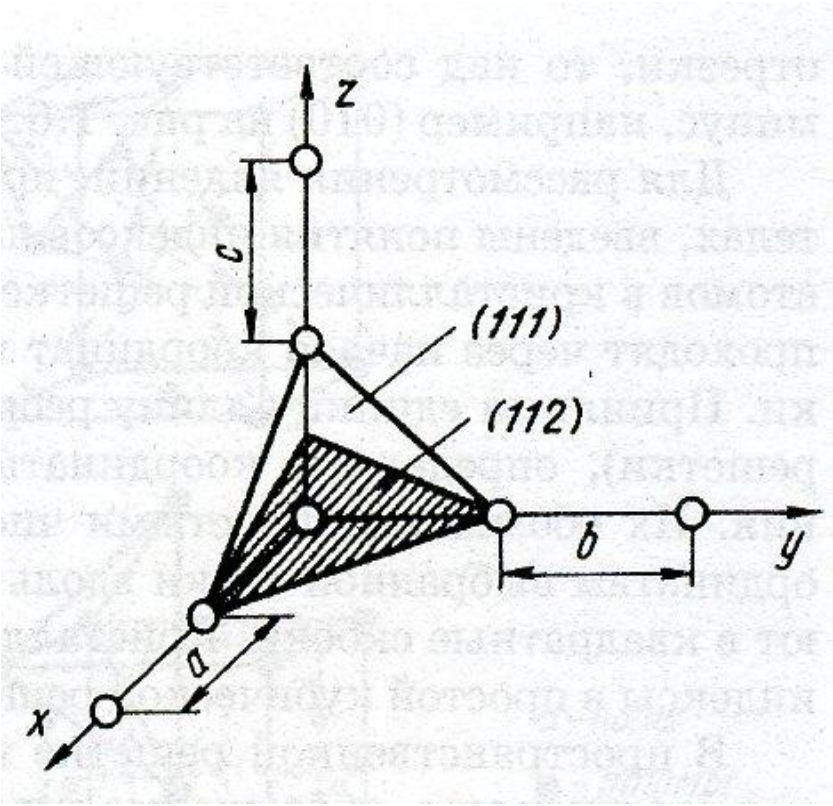


Аморфное
ацетат целлюлозы



Кристаллическое
ДНК

Индексы Миллера – отрезки, которые плоскость, отсекает внутри элементарной ячейки



Плоскость (111)

пересекает оси XYZ

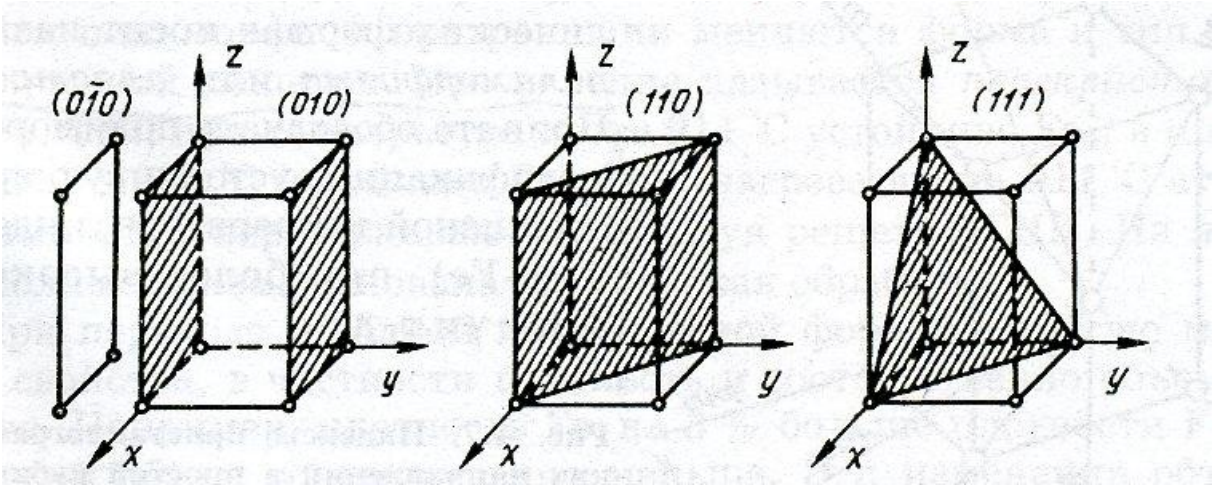
на расстояниях **1,1,1** единичных расстояний

Плоскость (112)

пересекает оси XYZ

на расстояниях **1,1,1/2** единичных расстояний

Пример графического изображения плоскостей

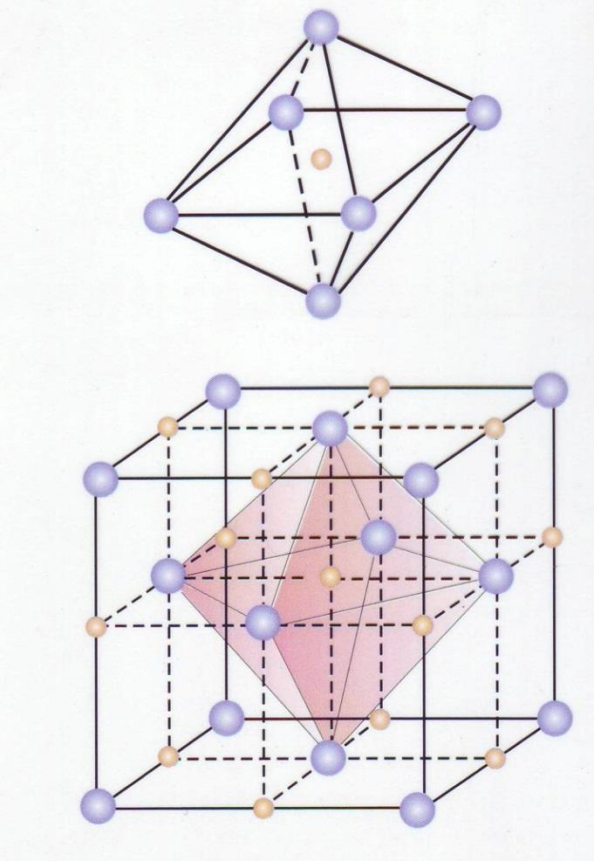


- В кристаллографии за индексы плоскостей принято брать **обратные значения** индексам Миллера
- Плоскости (010), (110), (111) и (0 $\bar{1}$ 0)

Поры в кристаллических структурах

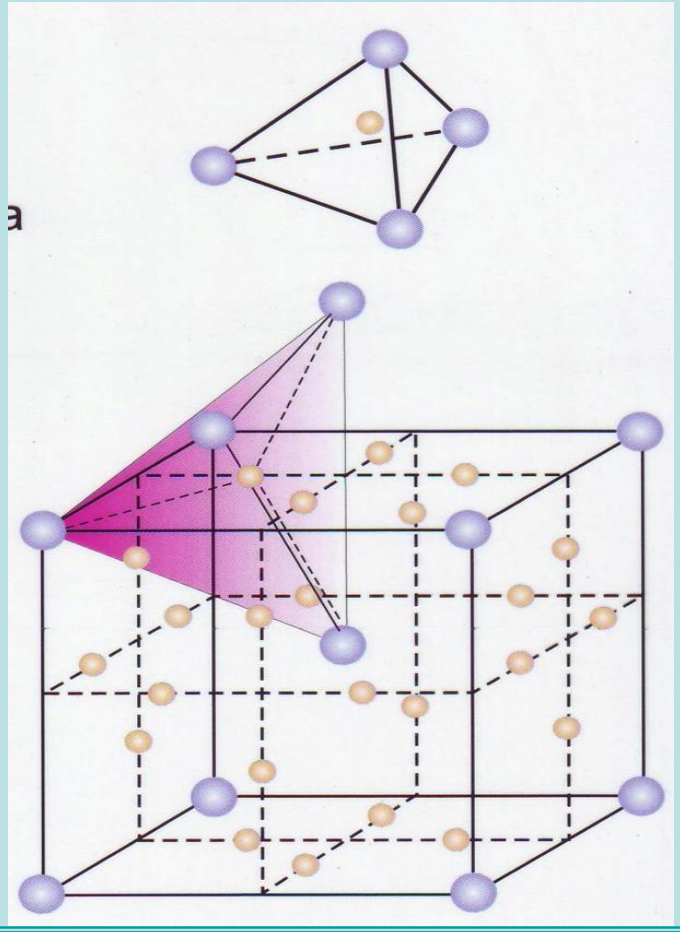
Октаэдрическая пора

В ГЦК -решетке



Поры в кристаллических структурах

Тетраэдрические поры в ОЦК решетке



Дефекты строения

кристаллических тел

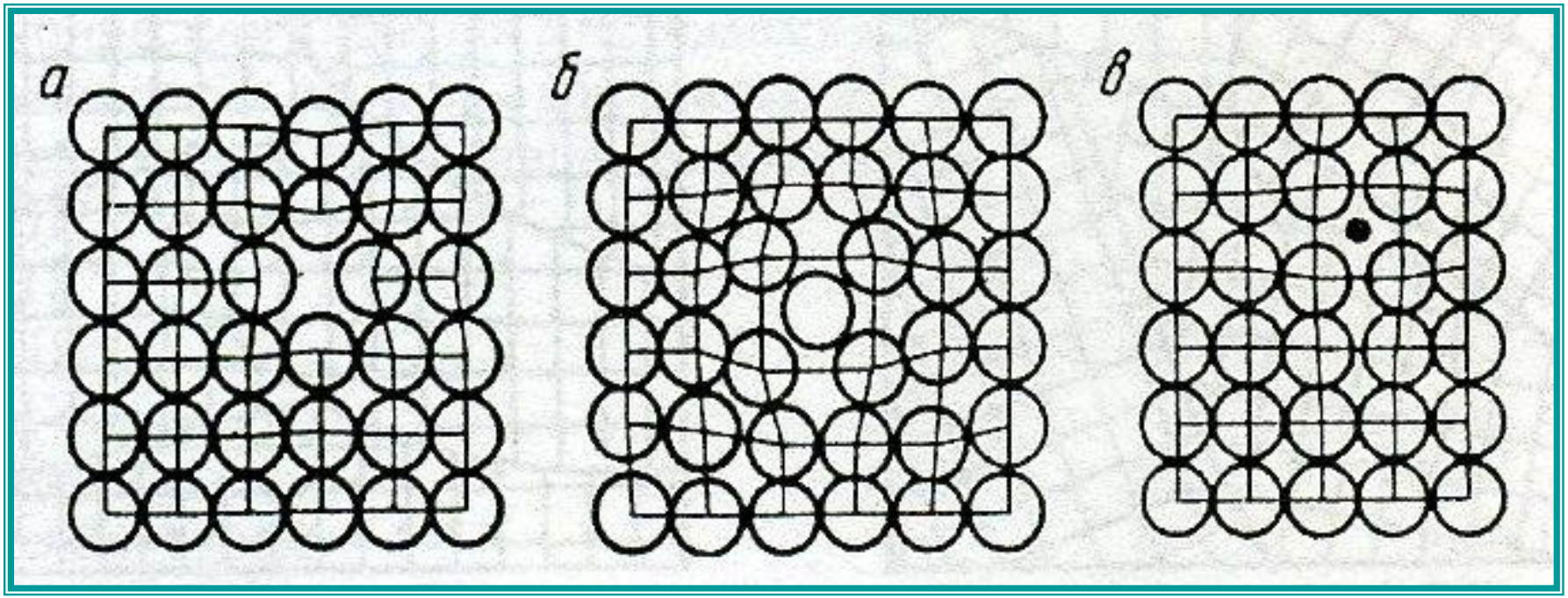
Точечные дефекты :

- вакансии (*дефекты Шоттки*)
- атомы, сместившиеся из узлов решетки в межузельные промежутки (*дефекты Френкеля)*
- атомы других элементов, находящиеся как в узлах, так и в междоузлиях решетки – (*примесные атомы*)

Точечные дефекты в кристаллической решетке: **а) вакансия**

б) дефект смещения

в) дефект внедрения



Линейные дефекты

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух направлениях, но значительную протяженность в третьем измерении.

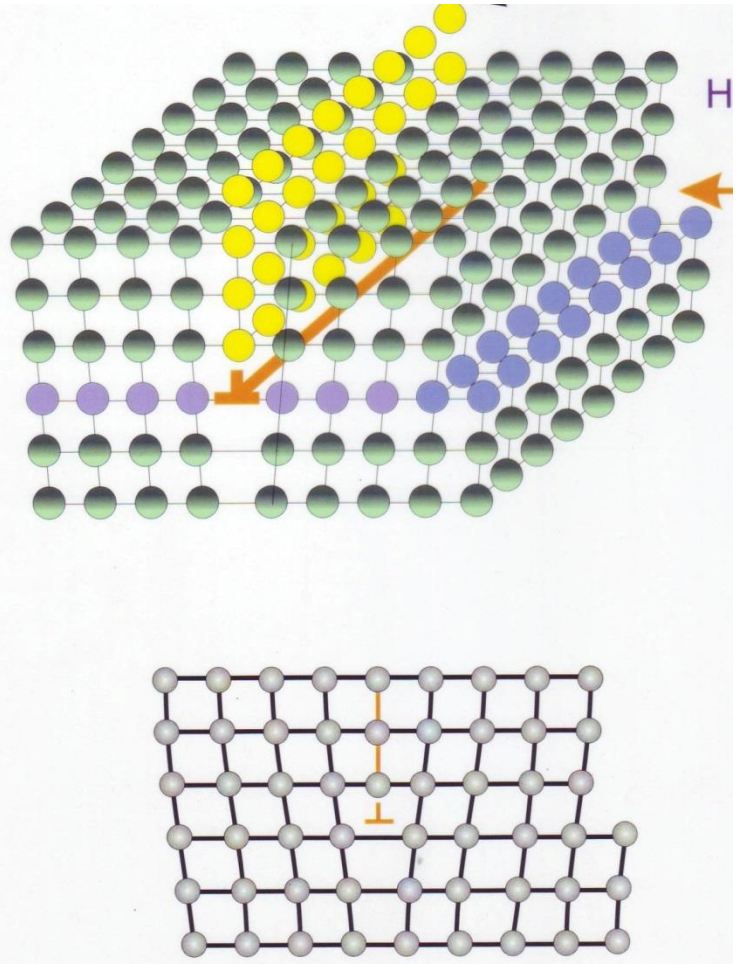
Дислокация

(лат. dislocation - смещение)

Обозначение - ⊤ или ⊥

Дислокации обнаружены с помощью электронного микроскопа

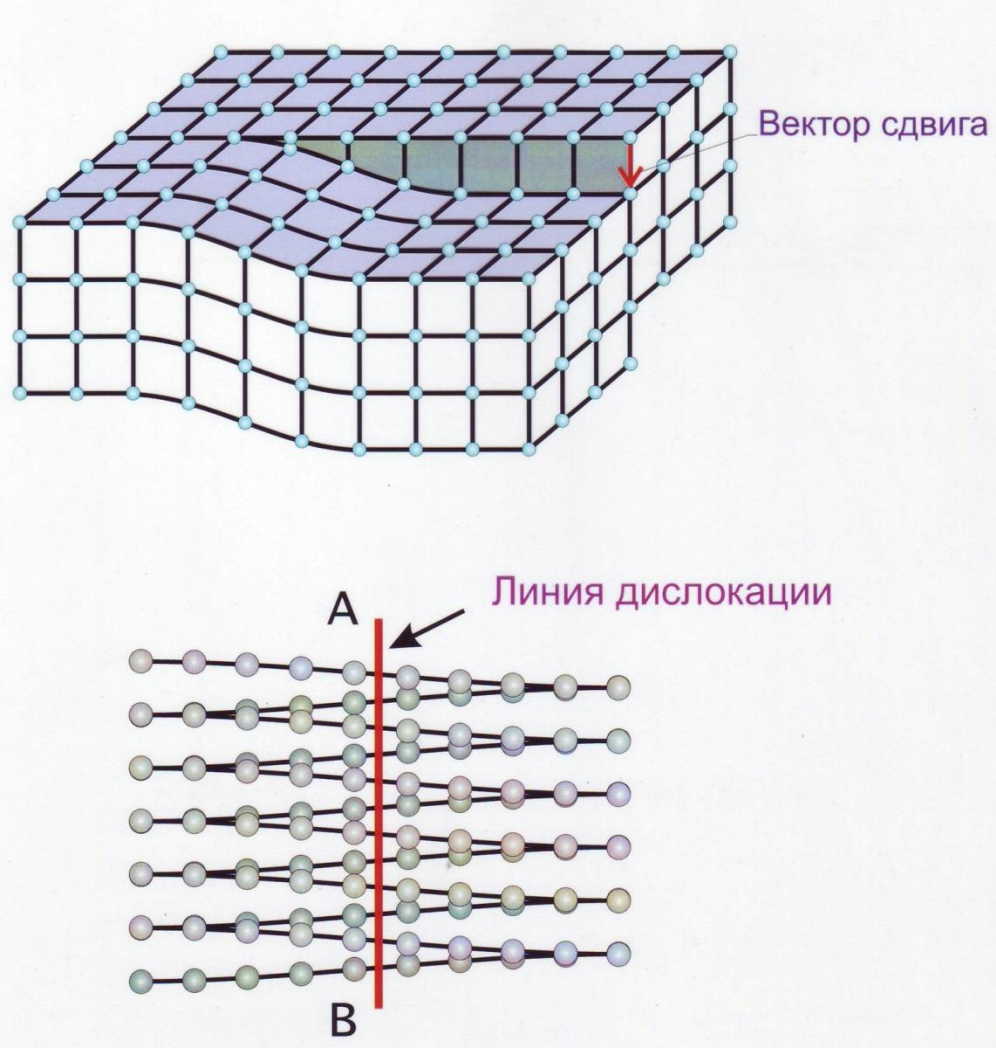
Краевая дислокация



Для краевой дислокации характерно наличие одной «лишней» полуплоскости

Нижний ее край – линия дислокации

Винтовая дислокация

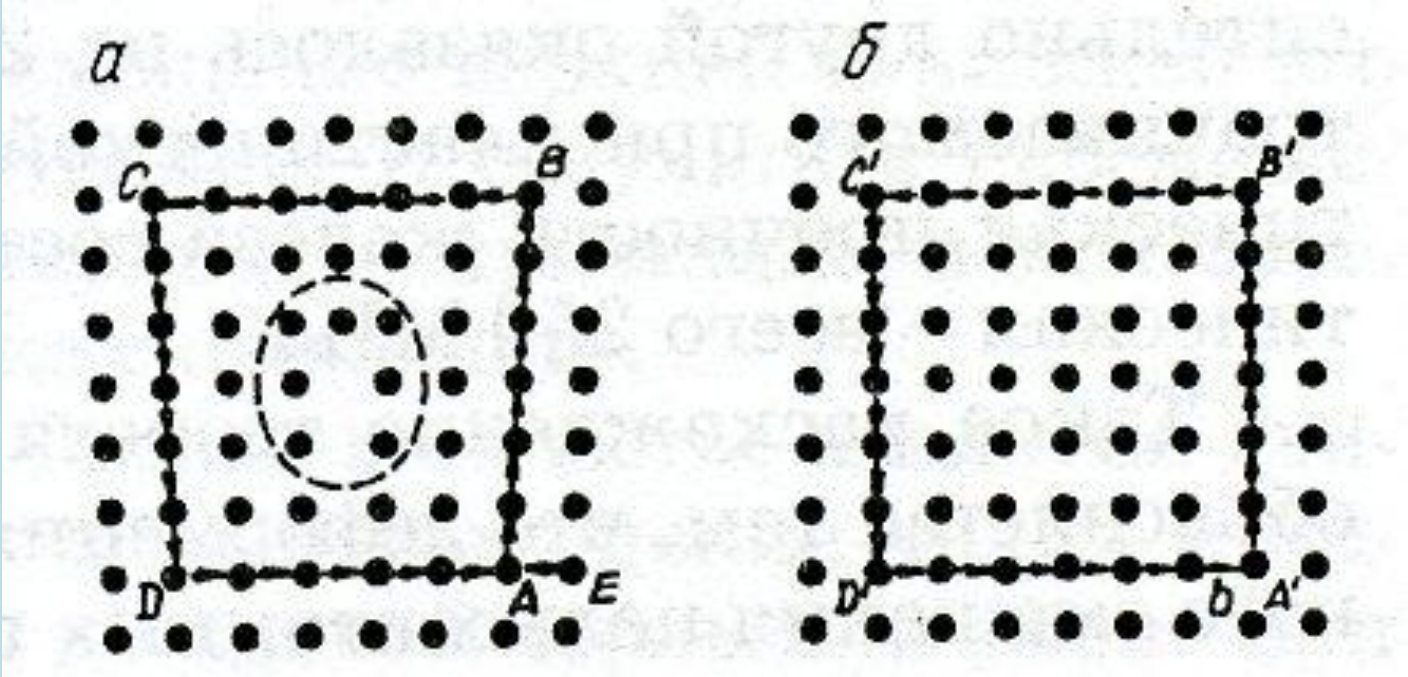


Возникают путем сдвига атомных слоев по плоскости **Q,**

AB – линия дислокации

Количественная характеристика искажений структуры кристаллов

Вектор Бюргерса



Вектор Бюргерса может быть получен, если, переходя от узла к узлу, обвести замкнутый контур в кристалле, заключив дислокацию внутрь контура

Участок BC состоит из шести отрезков, а участок DA из пяти.

Разница BC – DA = *b*, *где*

b – величина *вектора Бюргерса*

Вектор Бюргерса **краевой дислокации** равен межатомному расстоянию и **перпендикулярен** линии дислокации.

Вектор Бюргерса **винтовой дислокации** равен межатомному расстоянию и **параллелен** линии дислокации

Металлы делятся на группы

- Легкие металлы (Mg, Al, Be, Ti) плотность менее 5 г/см^3
- Тяжелые металлы (Pb, Mo, Ag, Au, Pt, W, Ir, Os) плотность более 10 г/см^3
- Легкоплавкие (Sn, Pb, Zn) Тпл=232,327,410°C
- Тугоплавкие (W, Mo, Nb, Ta) Тпл =выше 1536° C
- Благородные (Au, Ag, Pt)
- Урановые (актиноиды)
- Редкоземельные
- Щелочные (Na, K, Li, Ca)

Прочность материалов

Единицы измерения

σ = 1Па = 1Н/м^2 (Паскаль) 1 Н= 0,0981кг

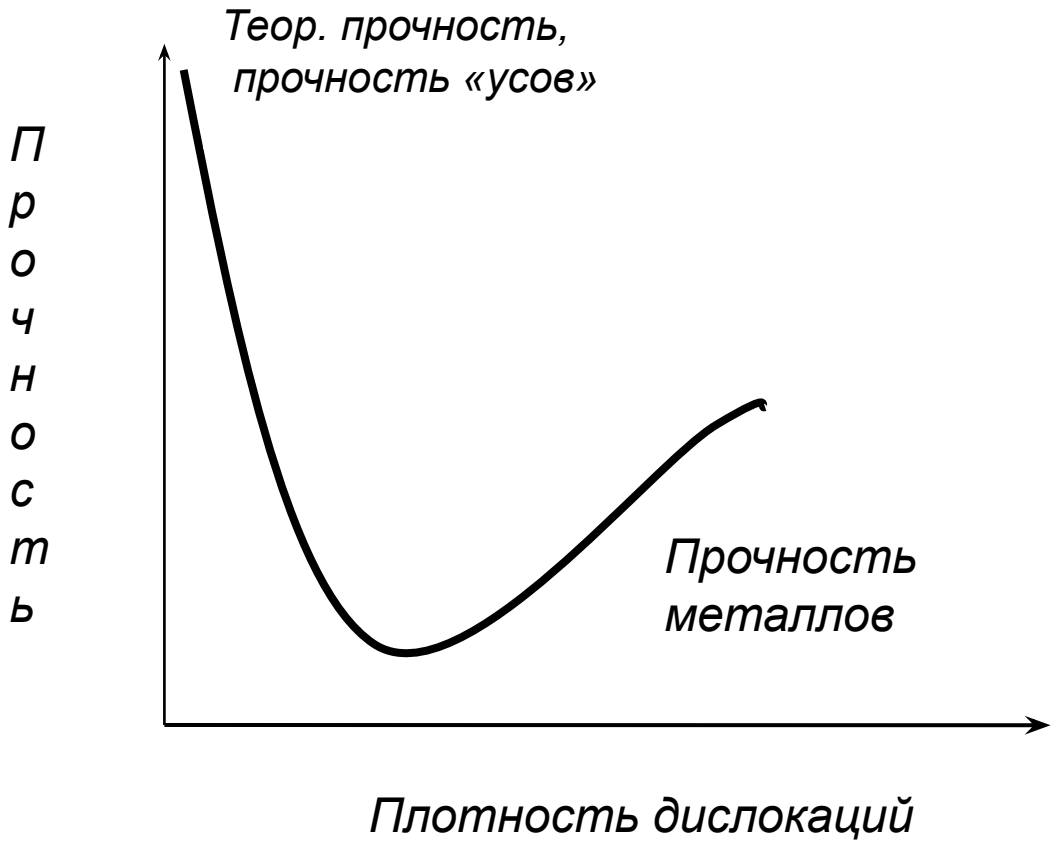
10^6 МПа (мега - Паскаль)

10^9 ГПа (гига - Паскаль)

Прочность

	Теоретическая	Реальная
Железо	13 000 МПа	350 МПа
Графит	125 000 МПа	2500 МПа
Полиэтилен	25 000 МПа	50 МПа

Влияние дефектности кристалла на его прочность



Деформация материалов

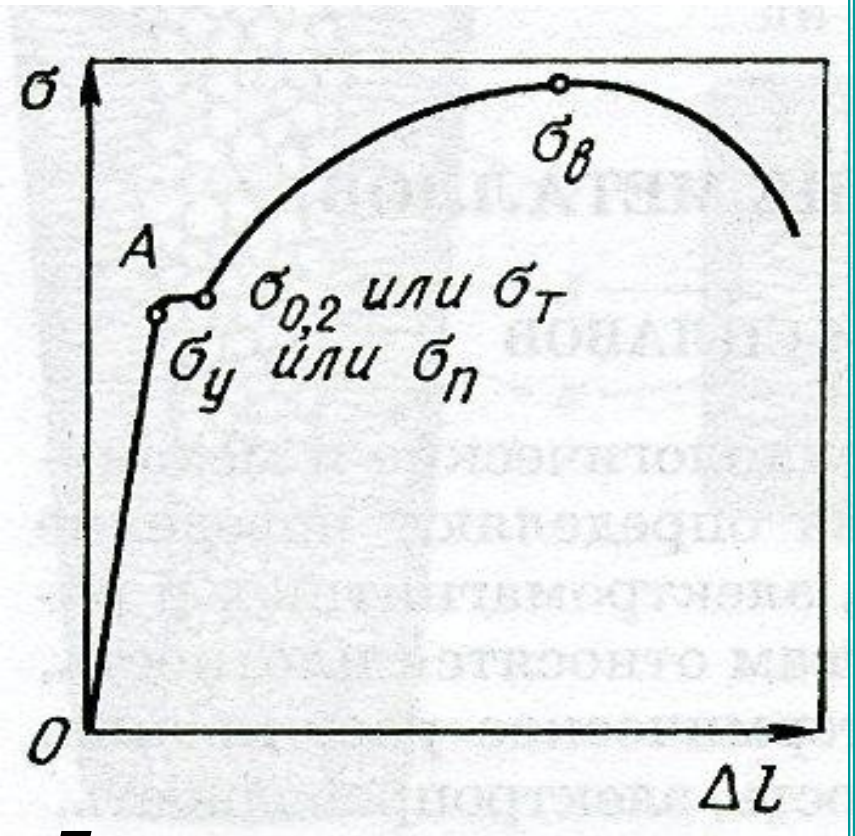


Диаграмма растяжения

Упругая деформация исчезает после снятия нагрузки.

Остаточная (пластическая) деформация сохраняется после снятия нагрузки.

$\sigma_в$ – временное сопротивление

$\sigma_т$ - предел текучести

$\sigma_у$ – предел упругости

$$\sigma = \varepsilon E$$

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \; ; \quad \Delta L = L_к - L_0$$

E *- модуль упругости (модуль Юнга)*

Твердость материалов

По Бриннелю – *вдавливание в тело шарика диаметром D под действием постояноой нагрузки P и измерении диаметра отпечатка d*

Число твердости по Бриннелю (НВ) – величина нагрузки *P*, деленной на диаметр отпечатка *d*

Твердость по Бриннелю

Метод заключается во вдавливании стального шарика диаметром D в поверхность образца под действием нагрузки P, приложенной в течении определенного времени. После снятия нагрузки измеряют диаметр отпечатка d, остающийся на поверхности образца.

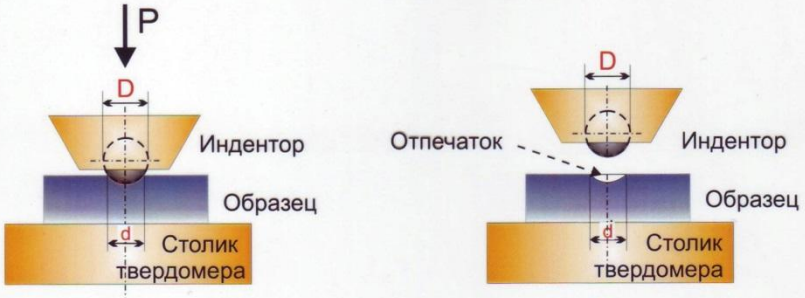


Схема определения твердости по Бринеллю

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 (HB) - отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка $F_{отп}$:

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

Твердость материалов

По Роквеллу –*вдавливание алмазного конуса или шарика. Измеряется двумя последовательными нагружениями.*

Первое нагружение $P_0 = 100$ *Н*

Второе нагружение - три шкалы

шкала *C* $P_1 = 1400$ *Н*, твердость *HRC*

шкала *A* $P_1 = 500$ *Н*, твердость *HRA*

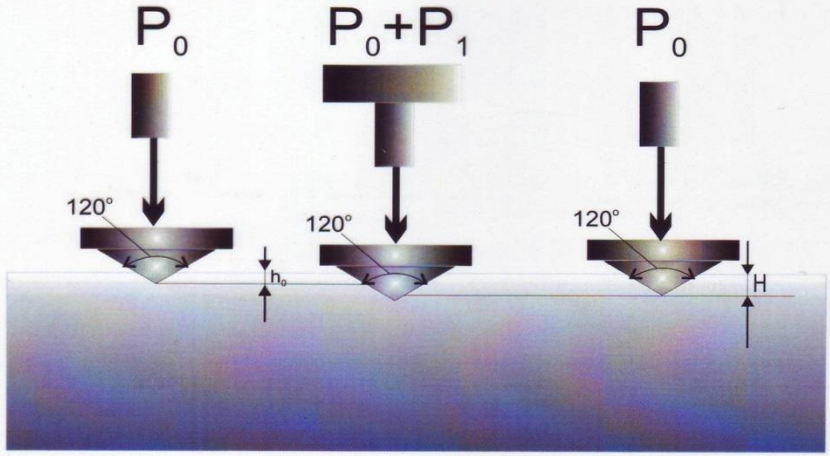
шкала *B* $P_1 = 900$ *Н*, твердость *HRB*

Твердость по Роквеллу

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

P_0 - предварительная нагрузка (100 Н),

P_1 - основная нагрузка.



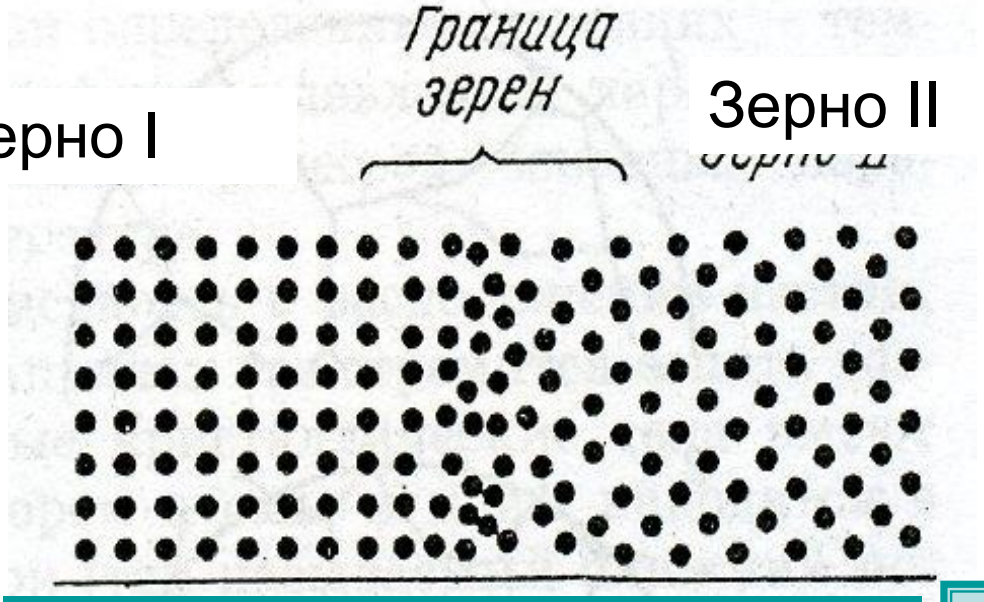
Единица твердости по Роквеллу (HR) - безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм.

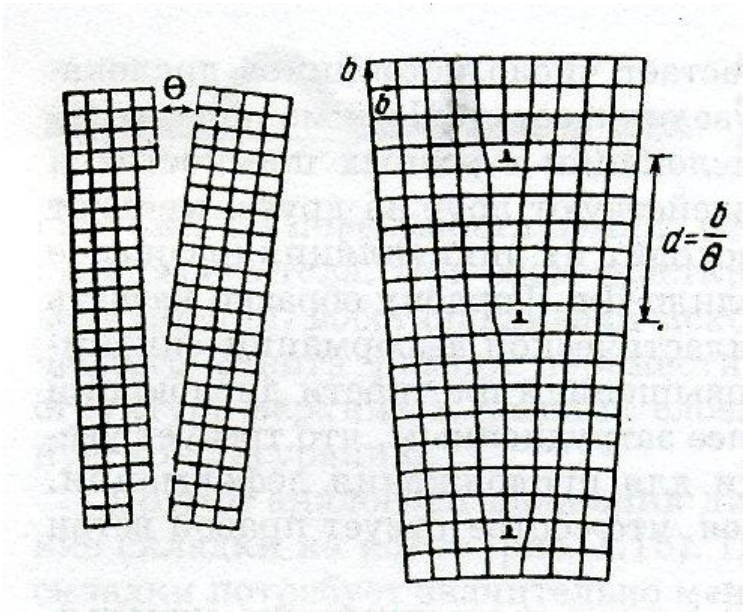
Обозначения твердости	Индентор (наконечник)	Шкала индикатора	Основная нагрузка	Расчетная формула
HRC HRA	алмазный конус	C A	1400 Н 500 Н	$100-\frac{H-h_0}{0,002}$
HRB	стальной шарик	B	900 Н	$130-\frac{H-h_0}{0,002}$

Строение металлов и сплавов

- Поликристаллический сплав состоит из зерен
- В соседних зернах кристаллиты имеют разную ориентацию
- Границы зерен - переходный слой размером 1 – 5 нм
- Каждое зерно состоит из субзерен или блоков
- Субзерно – часть кристалла относительно правильного строения

Строение зерен и блоков



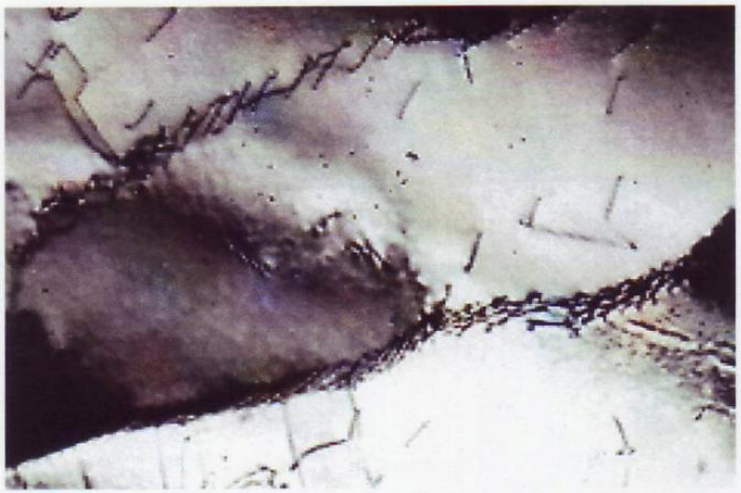


Зерна с различной ориентацией и граница между ними
Размер 30 – 0.1 мкм

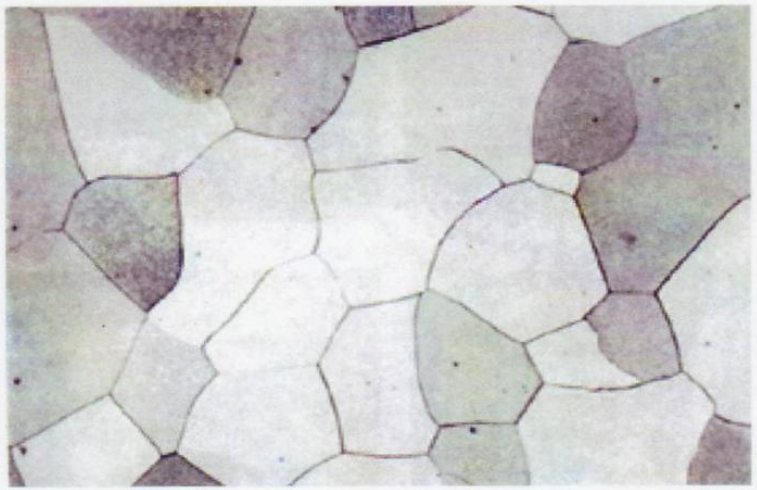
Блоки повернуты
Угол Θ = 5” - 50 ‘
Размер 0.1 мкм

Строение металлов и сплавов

Структура железа

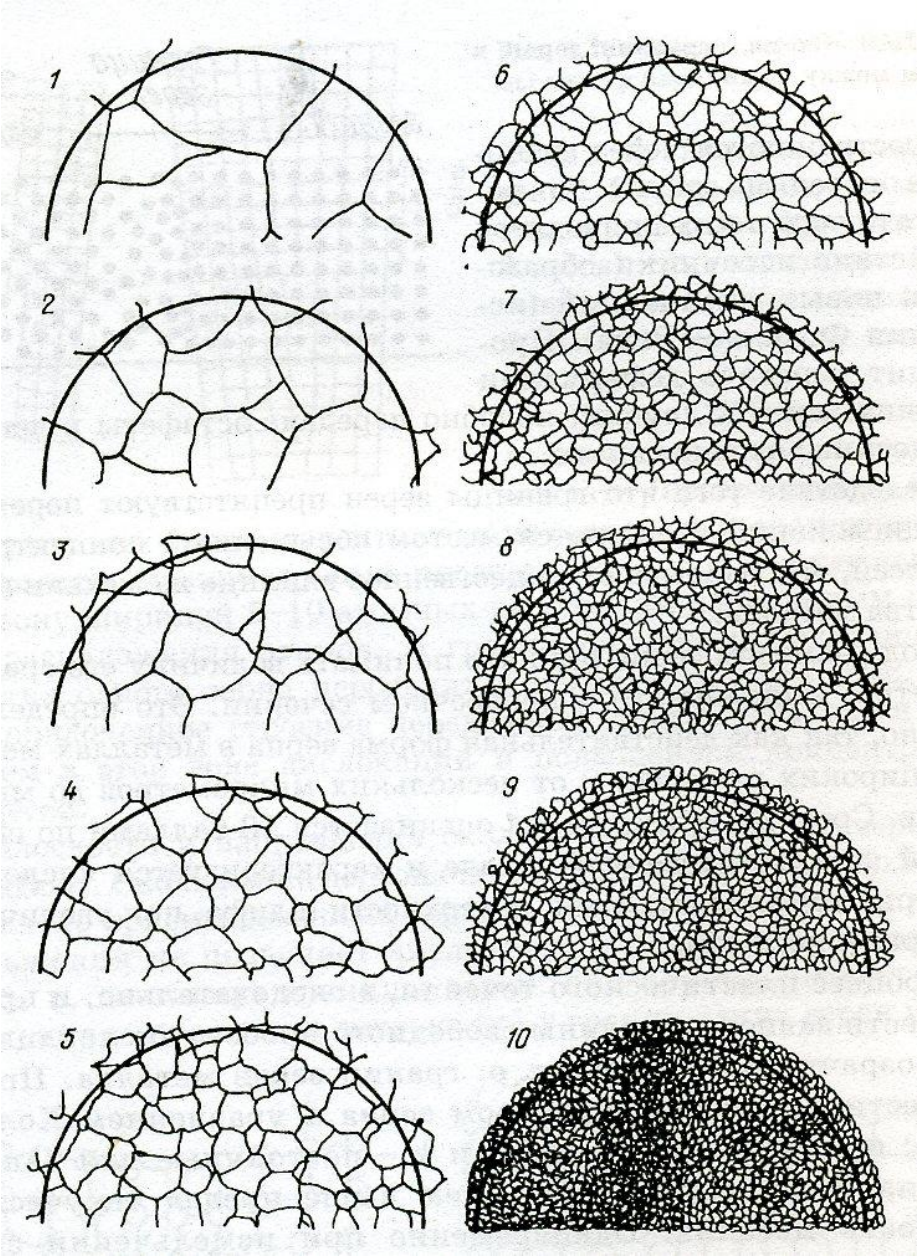


x 10000



x 250

Малоугловые и большеугловые границы в Fe_{α}



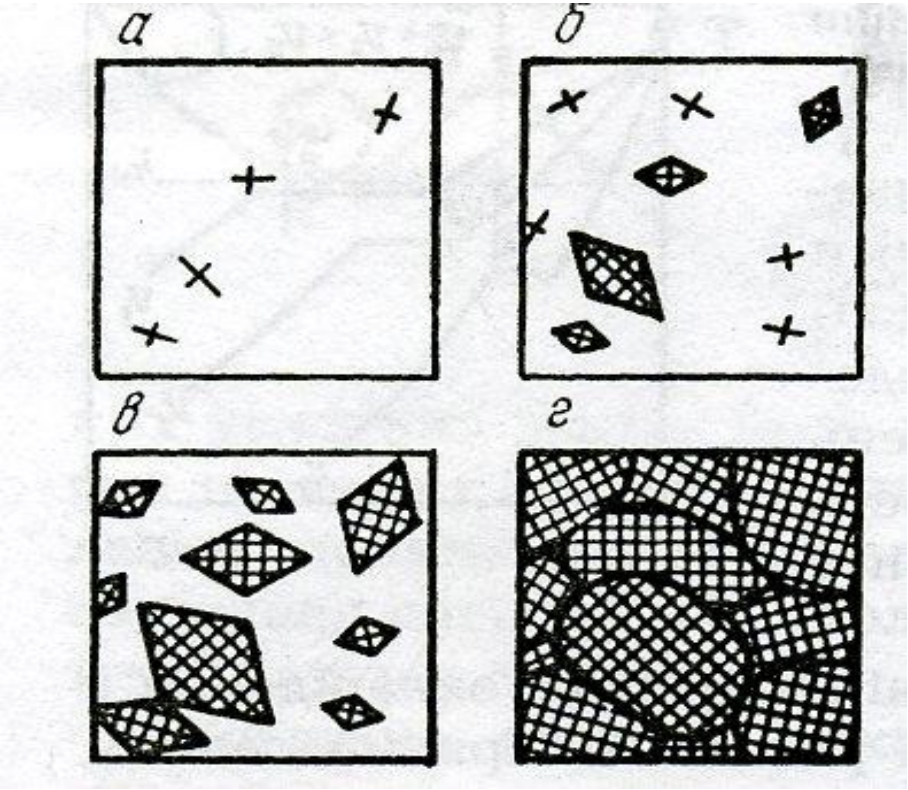
Шкалы для определения величины зерна

Плавление и кристаллизация

- По мере повышения температуры увеличивается подвижность атомов
- Атомы вырываются из узлов решетки
- Образуется жидкая фаза

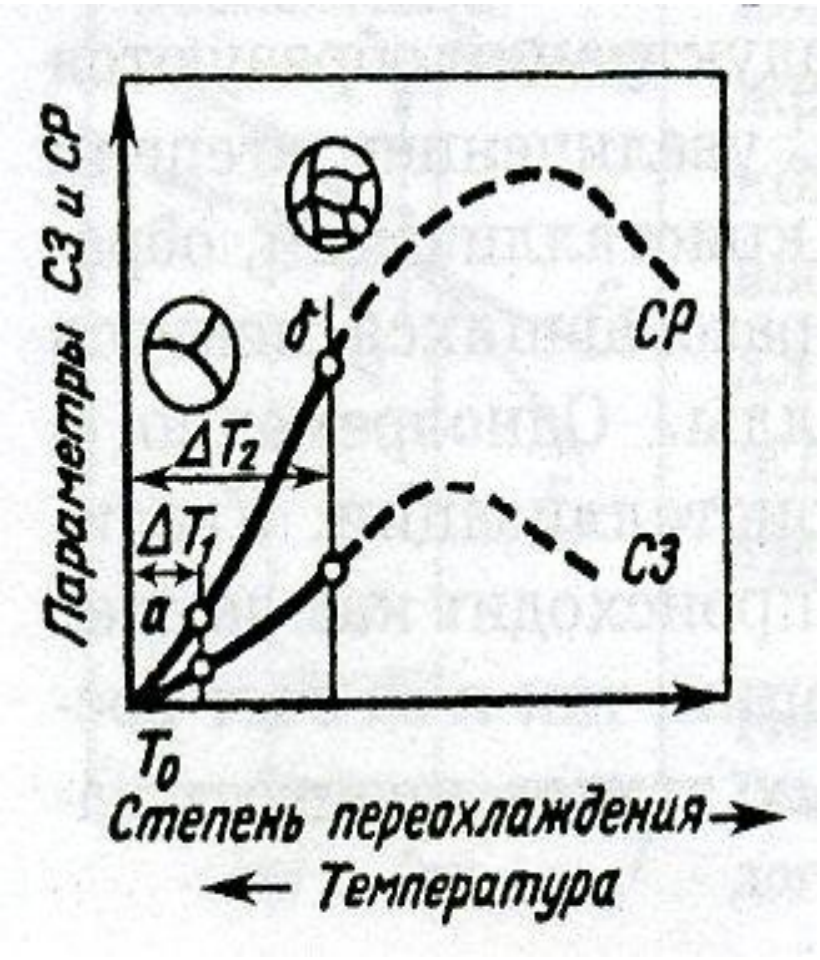
Вещество	***T пл. ^{0}C***
Ртуть (Hg)	- 39
Олово (Sn)	232
Алюминий (Al)	660
Железо (Fe)	1536
Вольфрам (W)	3410

Механизм кристаллизации



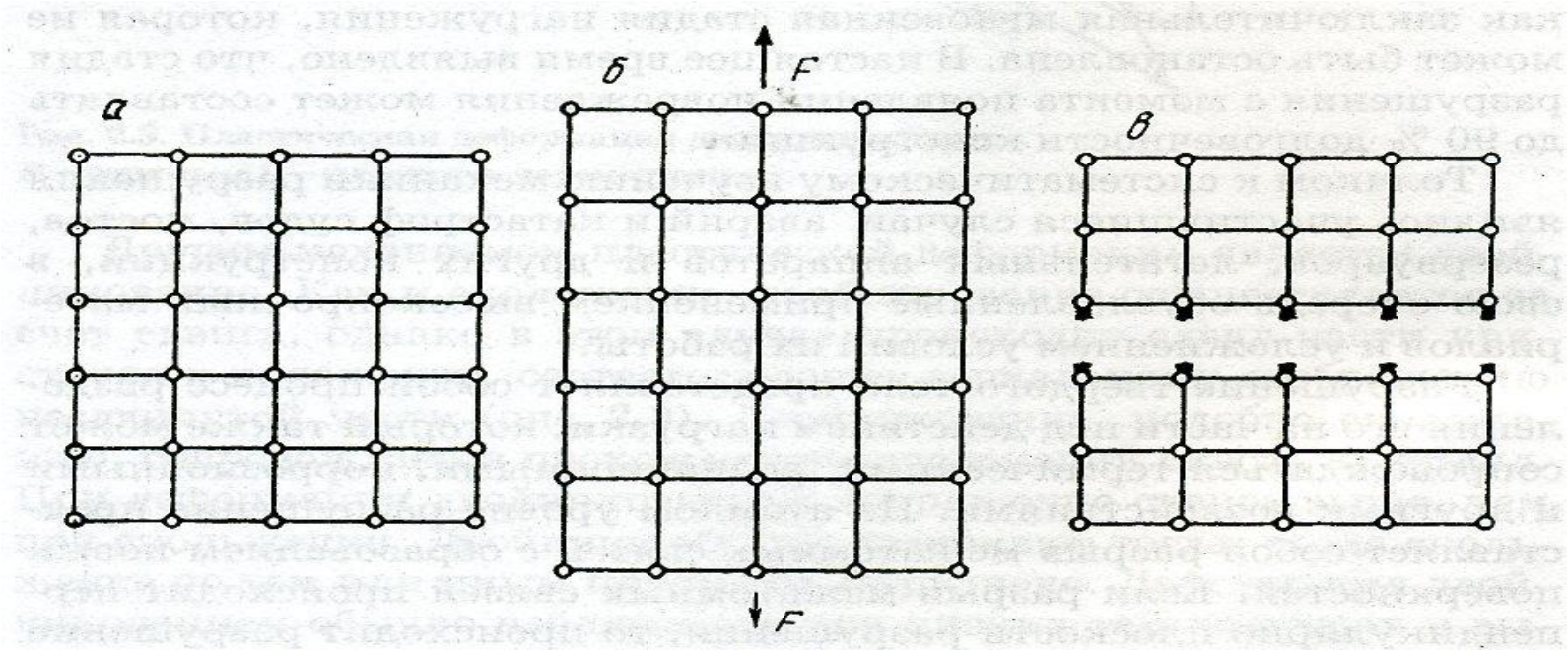
1. Зарождение центров кристаллизации
2. Увеличение концентрации центров
3. Рост кристаллов из этих центров

Механизм кристаллизации



- Скорость кристаллизации определяется скоростью охлаждения
- Если Δ Т = 0 равновесный процесс, кристаллы максимального размера
- Если Δ Т> 10^6 ºС/с высокая скорость охлаждения металл аморфный

Деформация и разрушение материалов



а) исходное состояние

б) – упругая деформация

в) – хрупкое разрушение

Разрушение материалов

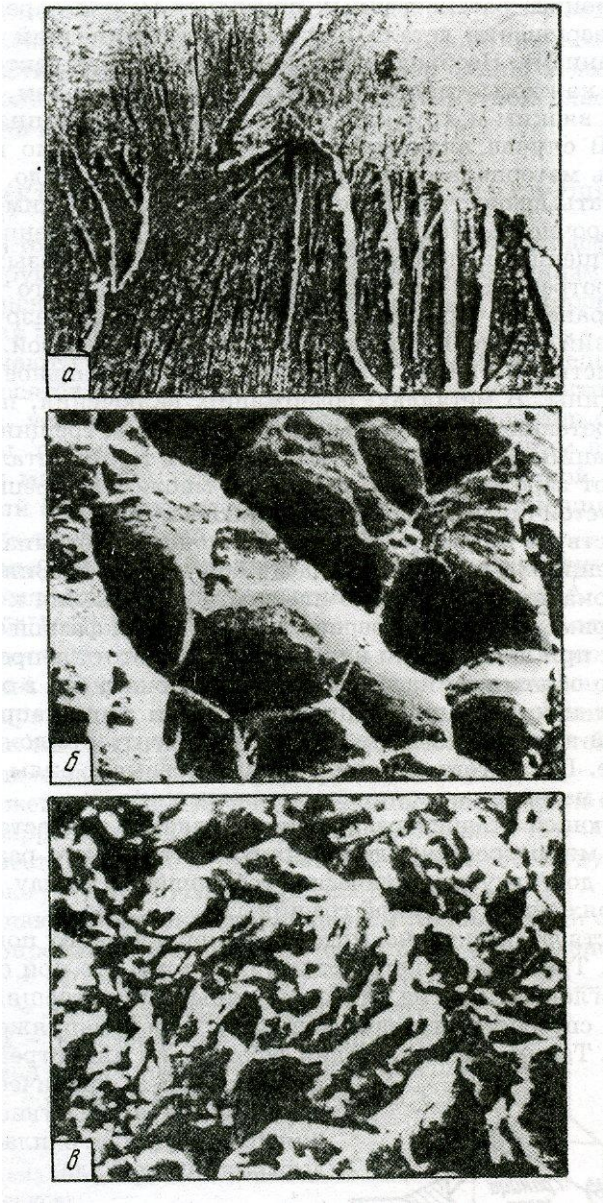
Разрушение – процесс кинетический. Зависит от времени, нагрузки, температуры, структуры

Теория разрушения *С.Н.Журкова:*

- разрыв химической связи
- образование субмикротрещин (нанометры)
- рост концентрации субмикротрещин
- образование магистральной трещины

Хрупкое разрушение - плоскость разрушения перпендикулярна нормальным напряжениям

Вязкое разрушение происходит путем сдвига под действием касательных напряжений



Разрушение материалов

а) – хрупкий излом
б) – вязкий излом
в) – квазихрупкий излом

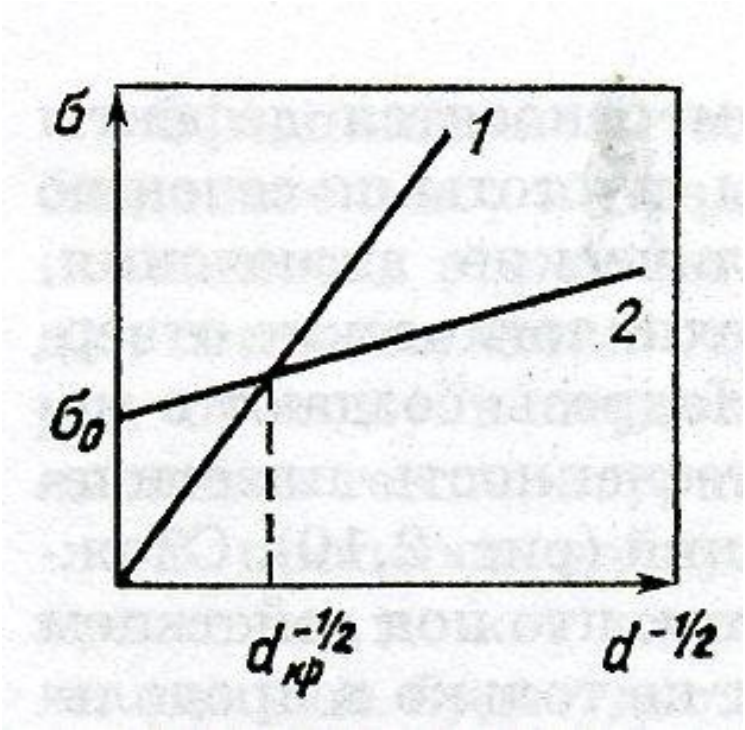
Факторы, влияющие на характер разрушения материалов

Температура

Температура вязко-упругого перехода или температура хрупкости $T_{хр}$ - ***температура, при которой предел текучести равен разрушающему напряжению***

Хладоломкость - ***способность материала хрупко разрушаться при пониженных температурах***

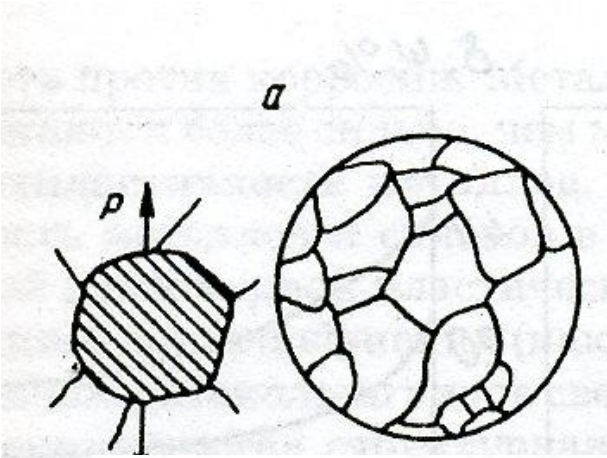
Внутренние факторы, влияющие на характер разрушения материалов

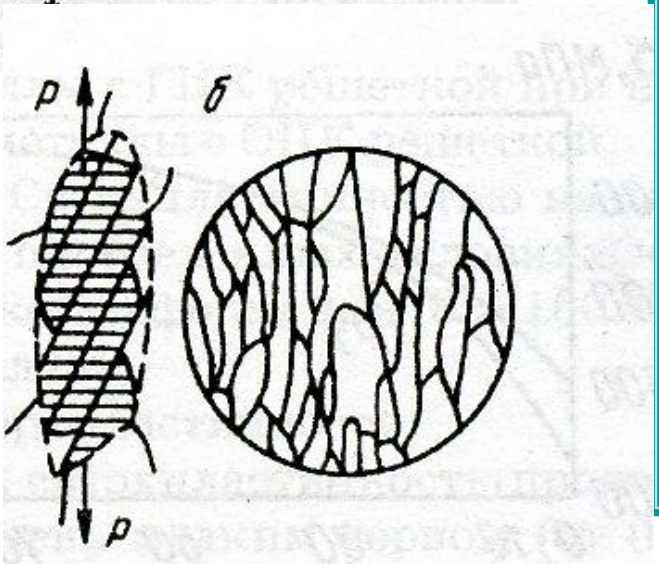


- кристаллическое строение - ОЦК
- размер зерна

Зависимость разрушающего напряжения (1) и предела текучести (2) от размера зерна

Факторы, влияющие на характер разрушения материалов



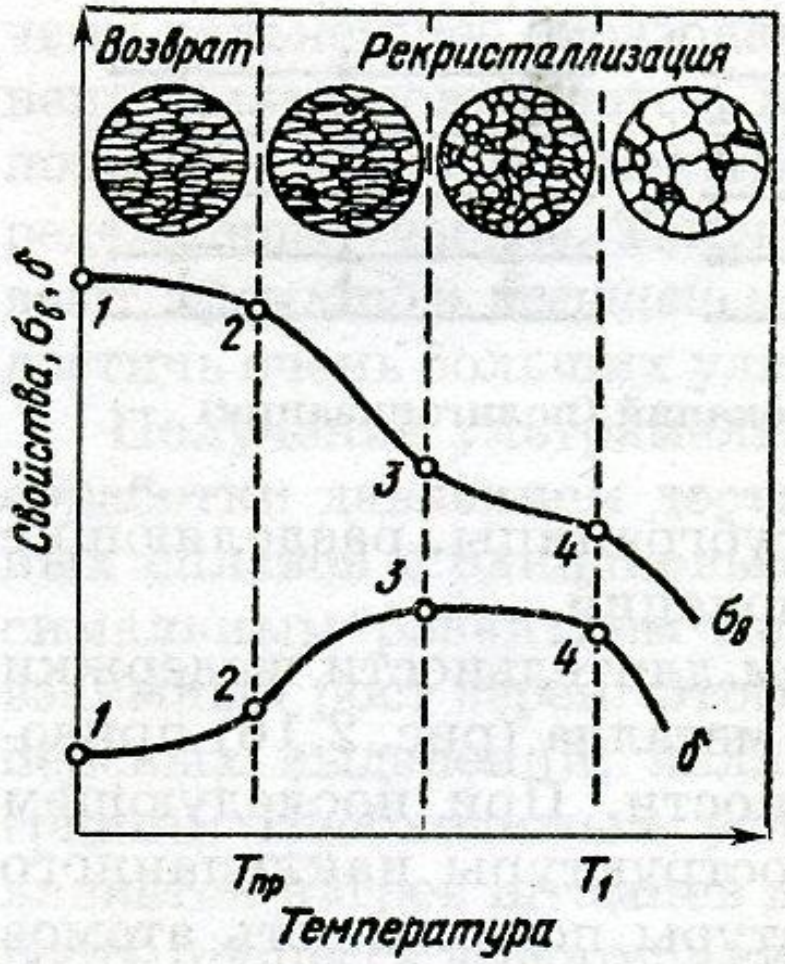


Упрочнение металлов под действием пластической деформации - **наклеп**

Зерна меняют свою форму и ориентацию

Текстура – ***преимущественная ориентация***

Факторы, влияющие на характер разрушения материалов



- **Возврат –** ***уменьшение искажений кристаллической решетки***
- **Рекристаллизация –** ***образование новых равноосных зерен***

Температурные режимы обработки металлов

Металл	Плавление	Рекристаллизация	Рекристаллизационный отжиг	Горячая обработка давлением
Молибден	2620	900	1400–1600	2000–1400
Титан	1672	500	650–750	1150–800
Железо	1536	450	650–750	1300–800
Медь	1083	270	500–600	900–650
Алюминий	660	100	350–400	500–400
Свинец	327	–30	–	–
Олово	232	–70	–	–

Строение и свойства сплавов

- *Сплав - сложное вещество, состоящее из нескольких элементов*
- *Фаза – однородная часть сплава (состав, свойства, структура – одинаковы)*
- *Компоненты сплава образуют:*

  - механические смеси

  - химические соединения

  - твердые растворы

Строение и свойства сплавов

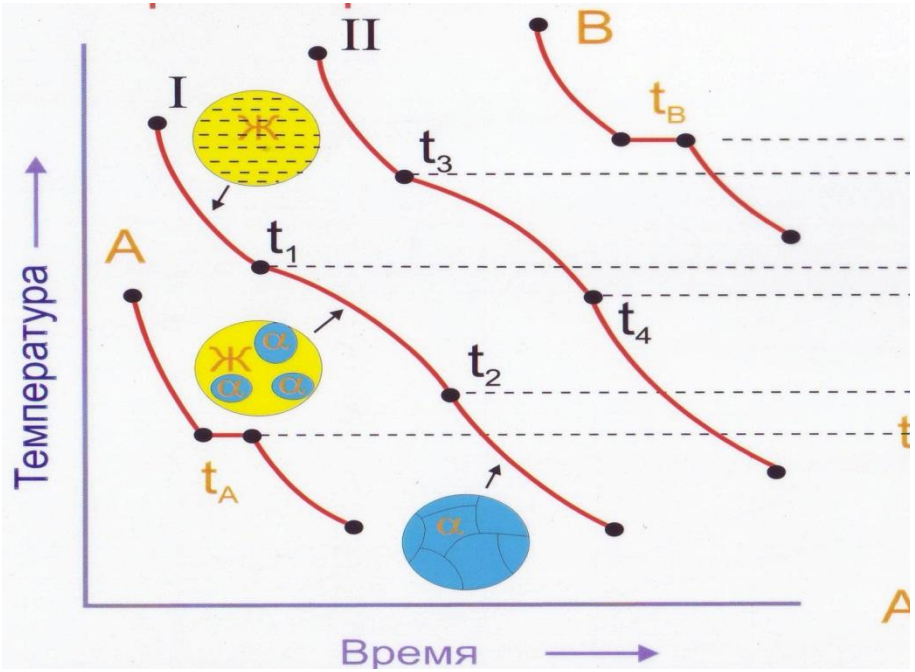
Форма частиц второй фазы:

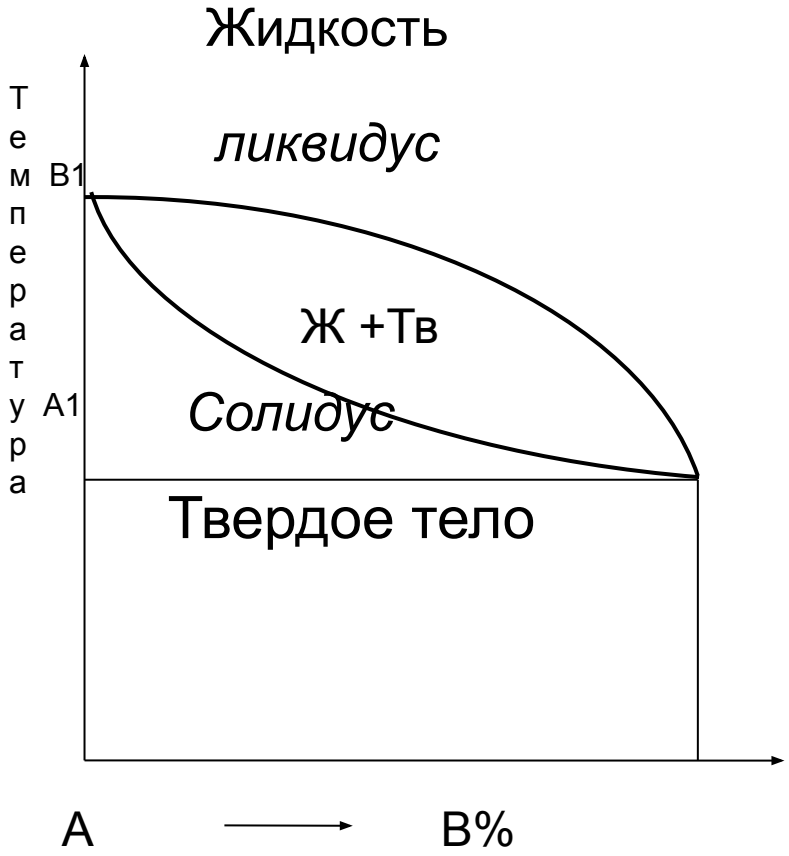
а) карбиды инструментальных сталях

б) пластинчатый графит в сером чугуне

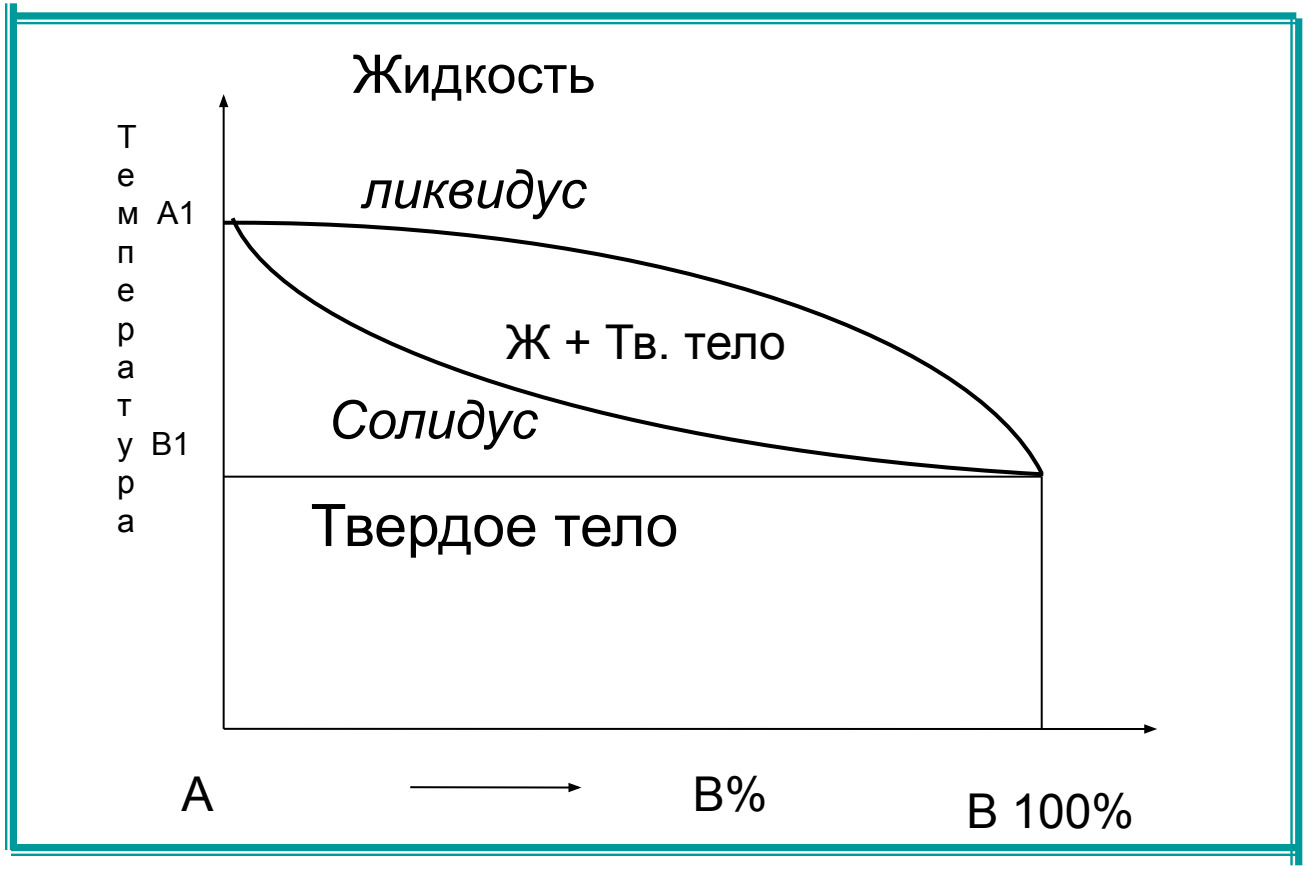
в) пластинчатый перлит

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

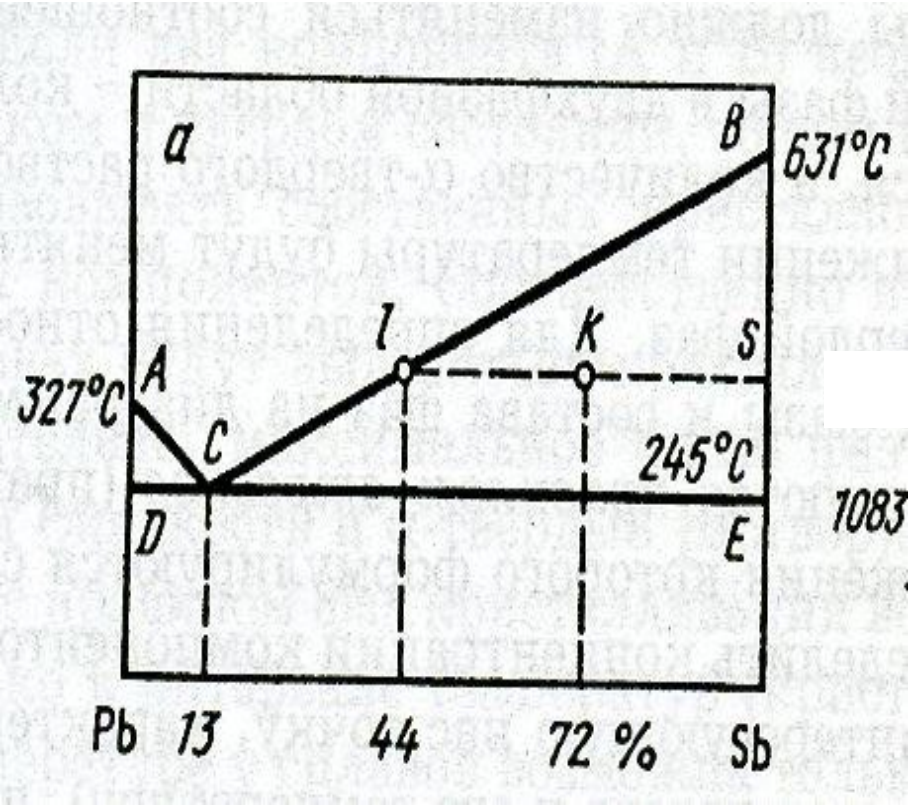




Построение диаграммы состояния
Вещества ***А*** и ***В*** неограниченно растворимы



Вещество А не растворимо в веществе В в твердом состоянии



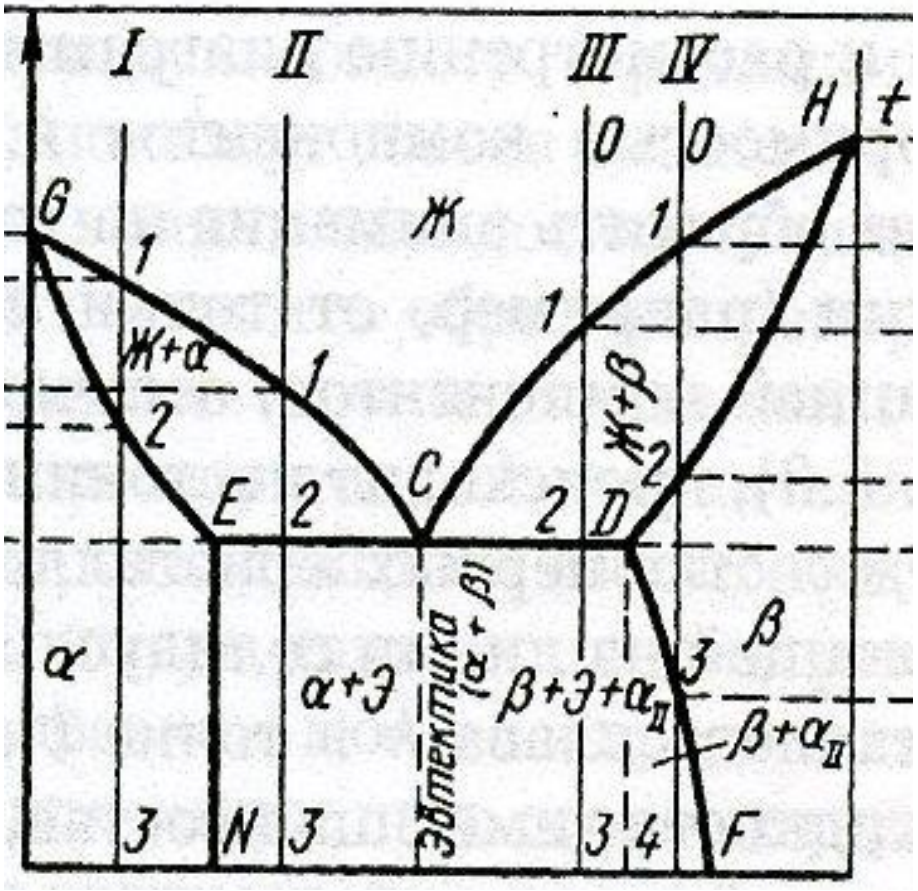
Соотношение фаз в (•) ***K***

$$Q_s \times s\,k = Q_l \times l\,k$$

$$Q_s / Q_l = lk/sk$$

$$Q_s / Q_{l+s} = lk/ls$$

Ограниченная растворимость компонентов в твердом состоянии



GCH – ликвидус

GECDH – солидус

C – эвтектика - механическая смесь двух видов кристаллов

A B

Железо и его свойства

Химически чистое железо Fe

- *Плотность 7,86 г/см^3*
- *$T_{пл}$ = 1536 ºС*
- *Прочность $\sigma_в$ = 50 МПа*
- *Удлинение δ = 50%*
- *ГЦК (**γ** –железо) 910 ≤ T ≤ 1393 ºС*
- *ОЦК (**α** –железо) T < 910; T > 1393 ºС*
- *Хим соединение с углеродом* ***Fe_3C***

Феррит *– твердый раствор внедрения углерода в α – железе*

Аустенит *- твердый раствор внедрения углерода в γ – железе*

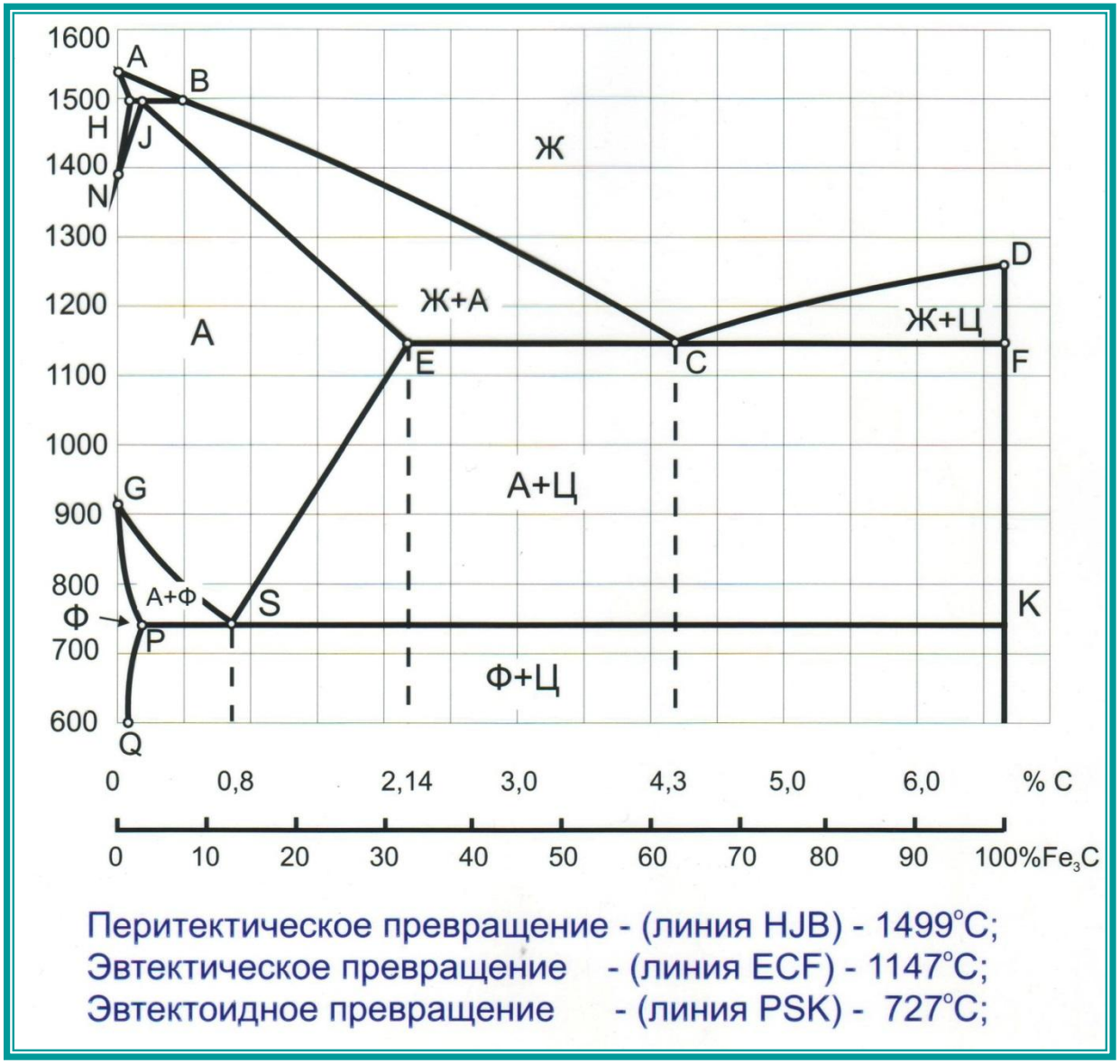
Цементит *– химическое соединение (карбид железа)* Fe_3C

Мартенсит *– пересыщенный раствор углерода в α – железе*

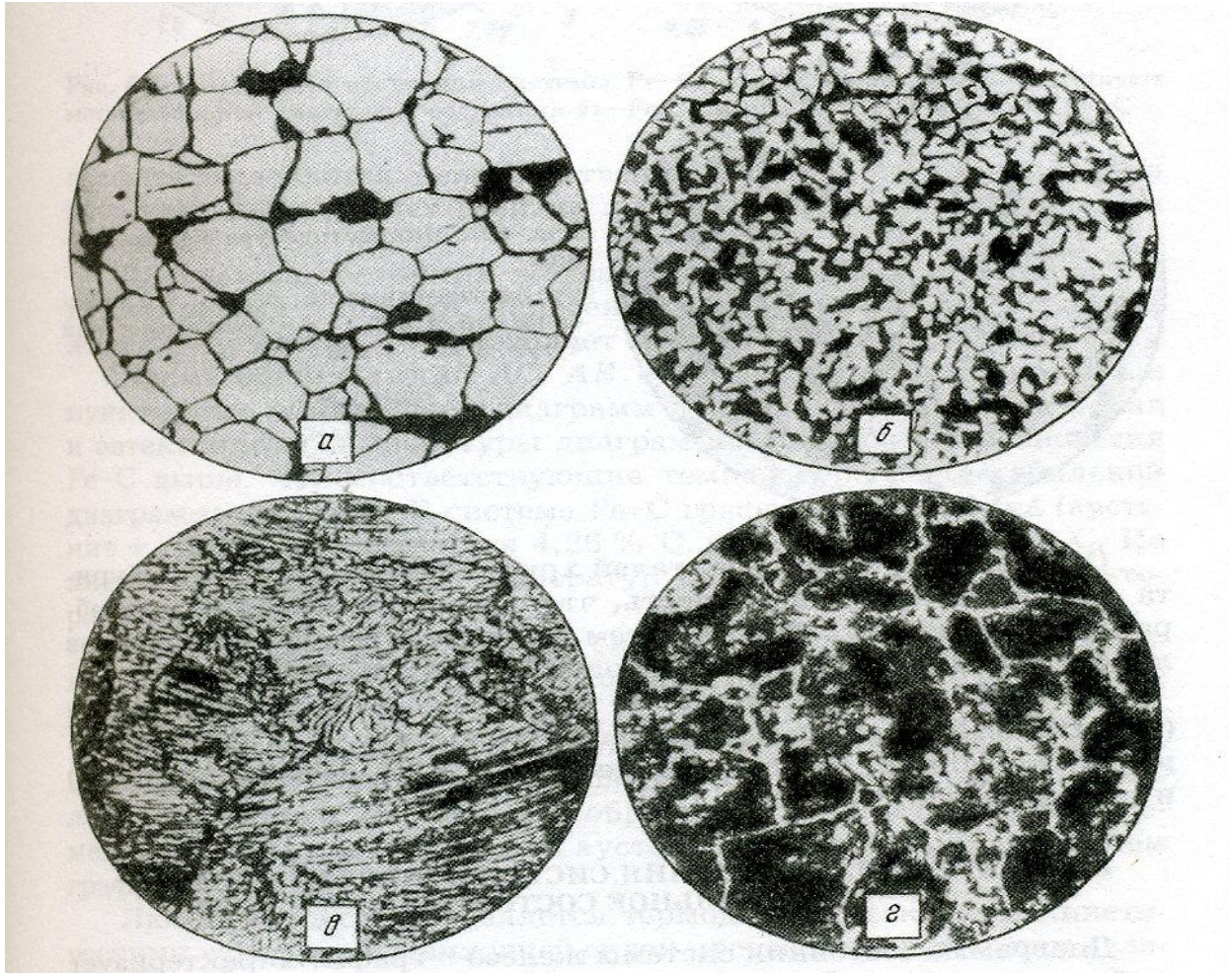
Перлит *- механическая смесь феррита и цементита (0,8%С)*

Ледебурит *- механическая смесь аустенита и цементита (4,3%С)*

Диаграмма состояний железо - цементит



Микроструктура сталей с различным содержанием углерода



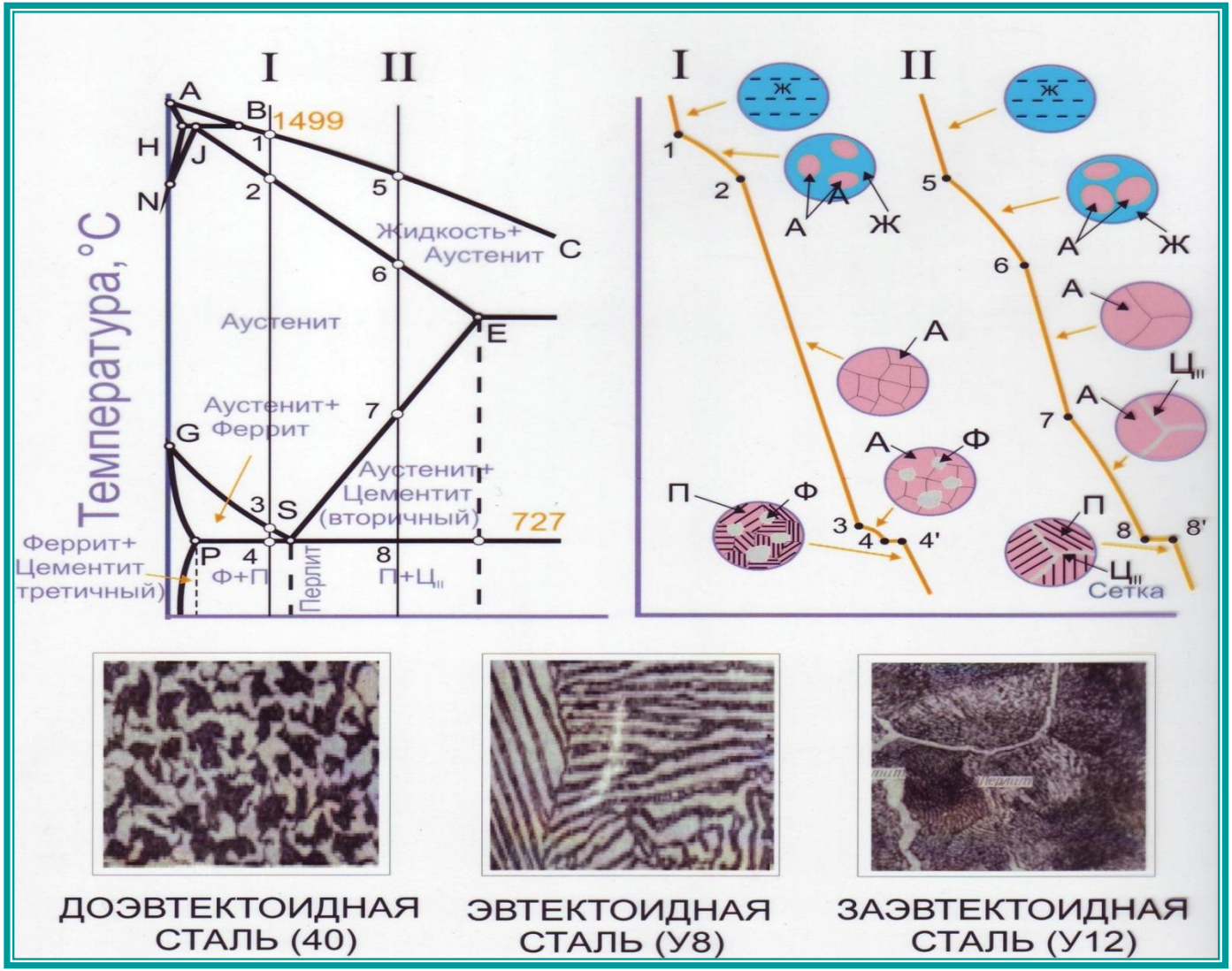
а) – 0,1%

б) – 0,4%

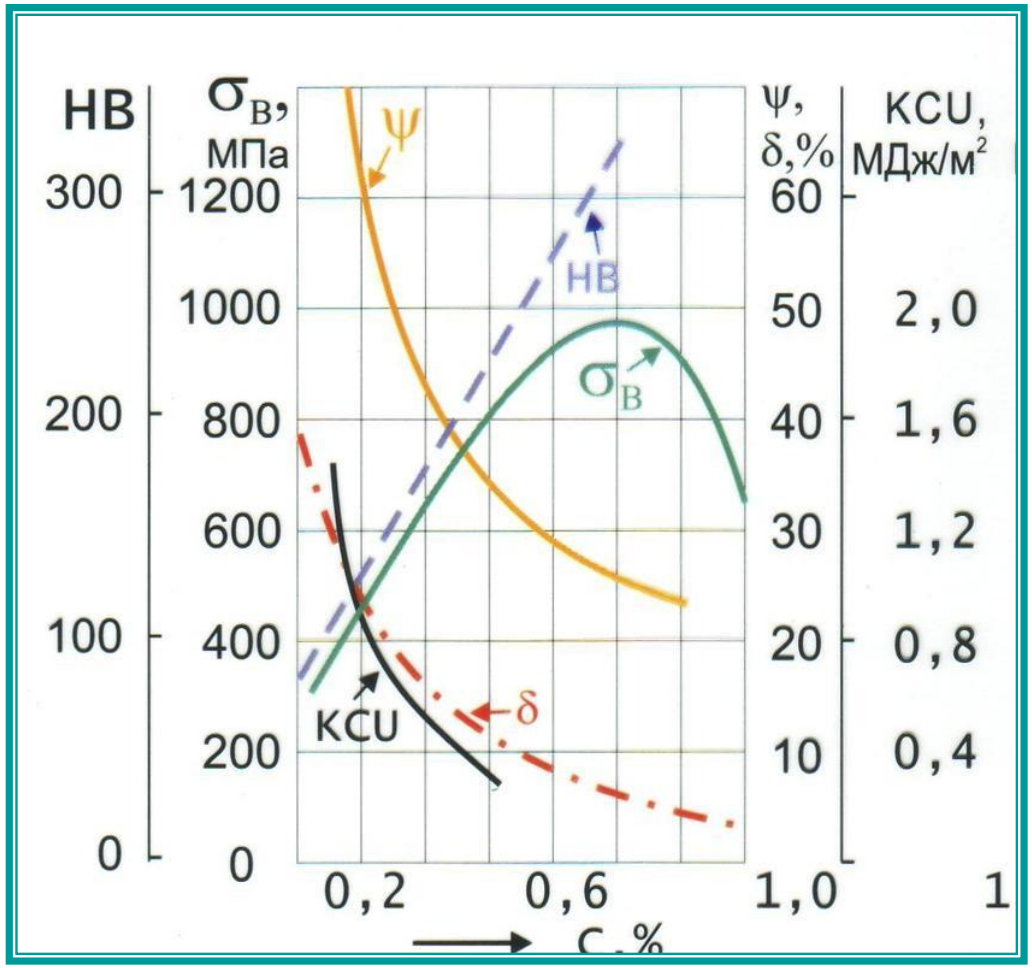
в) – 0,8%

г) – 1,2%

Превращения в сталях при охлаждении



Влияние углерода на свойства сталей



HB – твердость по Бриннелю

$\sigma_в$ – временное сопротивление

δ – относительное удлинение

ψ -относительное сужение

KCU – ударная вязкость

Классификация чугунов

- **Чугуны – сплавы железа с углеродом, содержание углерода более 2,14%**
- **Белые** – углерод связан в цементит Fe_3C
- **Серые** – углерод находится в виде графита

Серые чугуны подразделяются

по форме включений графита на:

серые, ковкие и высокопрочные

По структуре металлической основы на:

перлитные (C=0,8%),

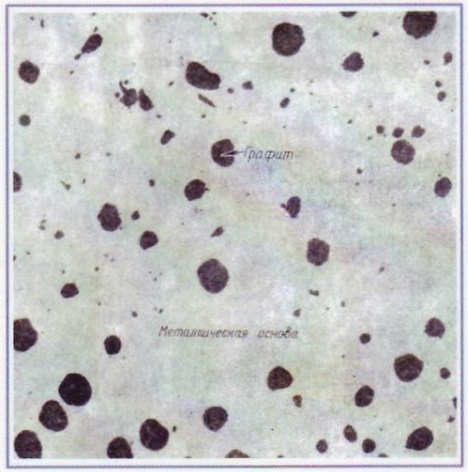
феррито-перлитные (C <0,8%),

ферритные (C <0,02%)

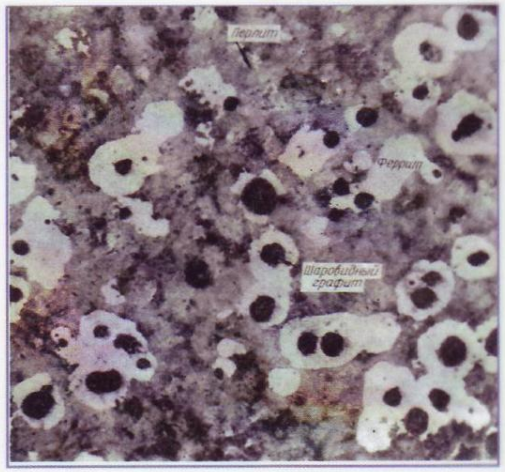
Микроструктура серых чугунов

Высокопрочные чугуны

Нетравленый шлиф



Феррито- перлитная основа



Включения графита имеют шаровидную форму

Получают модификацией магнием и церием

Маркировка сталей

- В России и на территории СНГ принята буквенно-цифровая система обозначения марок сталей и сплавов.
- **Стали обыкновенного качества маркируют Ст0…..Ст3….Ст6,** где «Ст» означает сталь, а цифры–порядковый номер марки стали.

Углеродистые конструкционные качественные стали обозначают двухзначным числом, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента (например, 05; 08; 10; 15; 20; 25...80; 85).

Углеродистые инструментальные стали обозначают буквой **"У"** и следующей за ней цифрой, указывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента (например, У7; У8; У9; У10; У11; У12; У13).

Легированные стали

Легированные стали

Основные легирующие элементы:

А-азот, **Б**-ниобий, **В**-вольфрам,

Г-марганец, **Д**-медь, **Е**-селен, **К**-кобальт,

М-молибден, **Н**-никель, **П**-фосфор, **Р**-бор,

С-кремний, **Т**-титан, **Ф**-ванадий, **Х**-хром,

Ц-цирконий, **Ч**-редкоземельные элементы**,**

Ю-алюминий.

Маркировка легированных сталей

Цифры после буквы показывают примерное количество того или иного элемента, **округленное до целого числа**.

При среднем содержании легирующего элемента **до 1,5 %** цифру за буквенным индексом не приводят.

Содержание углерода указывается **в начале марки в сотых** (конструкционные легированные стали) или **десятых (**инструментальные стали) долях процента

конструкционная **45**ХН2МФА

инструментальная (штамповая) – **4**Х5МФС

Если содержание углерода в инструментальных легированных сталях **1% и более**, то цифру в начале марки иногда вообще не ставят (например, **Х**, **ХВГ**).

Буква **"А"** в конце марки, то сталь **высококачественная** (30ХГС**А**).

Буква **"А"** стоит в середине марки - сталь **легирована азотом** (16Г2**А**Ф).

Буква **"А"** начале марки –сталь **автоматная** повышенной обрабатываемости (**А**35Г2).

Виды термической обработки

Закалка – термическая обработка , в результате которой образуется неравновесная структура.

Сплав нагревается **выше температуры** фазового превращения в твердом состоянии, после чего **быстро охлаждают**, чтобы предотвратить равновесное превращение.

Сплавы закаливают для упрочнения.

Прочность возрастает либо в результате мартенситного фазового перехода, либо вследствие понижения температуры эвтектоидной реакции, приводящих к измельчению зерна.

Отпуск – термическая обработка, в результате которой в предварительно закаленных сплавах происходят фазовые превращения, приближающие их структуры к равновесной.

Сочетание закалки с отпуском приводит к повышению прочности, твердости.

При отпуске происходит частичный распад пересыщенного твердого раствора.

Отжиг – термическая обработка, в результате которой металлы или сплавы приобретают структуру, близкую к равновесной.

Отжиг вызывает **разупрочнение** сплавов, повышением пластичности, снятием остаточных напряжений.