

# Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

Проф., д.т.н. *Скотникова Маргарита Александровна*  
[Skotnikova@mail.ru](mailto:Skotnikova@mail.ru)

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Кафедра "Машиноведение и  
основы конструирования"  
ИММиТ САбПУ



x 1



x 100



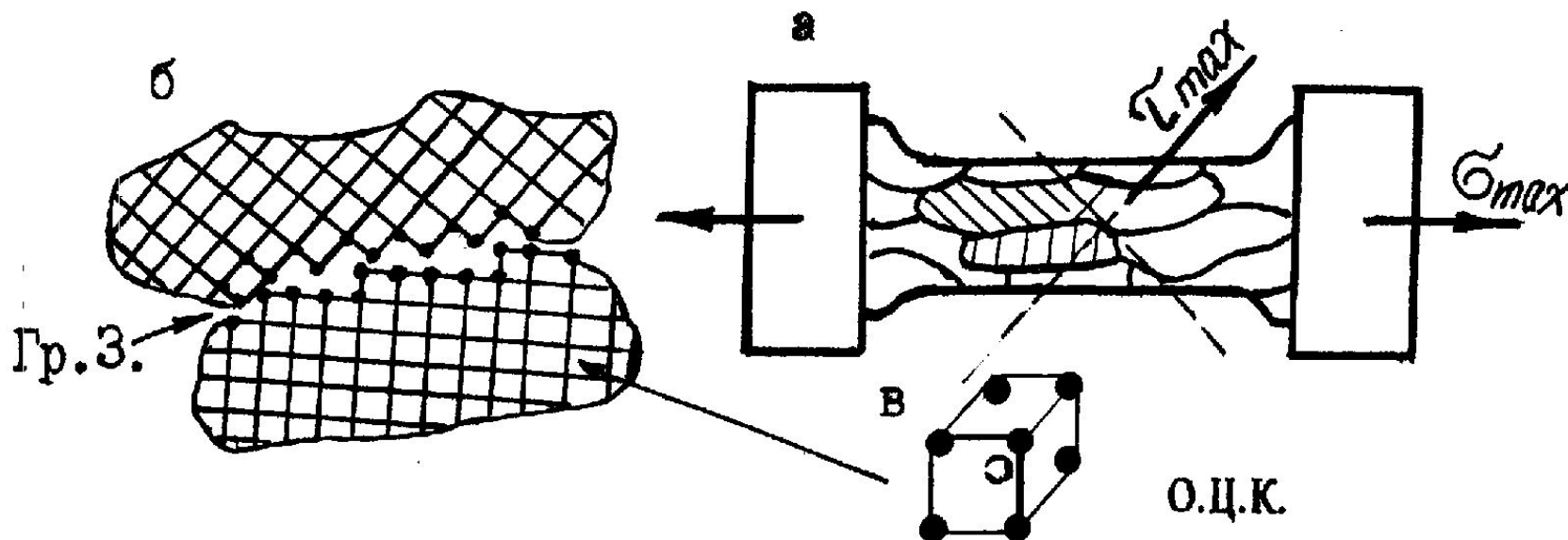
x 10000

# Тема 1. Общее понятие напряженно – деформированного состояния деталей машин из металлических материалов, применяемых в машиностроении.

## Содержание:

1. Современная классификация структурных уровней и методов исследования.
2. *Физические методы исследования.*
  - Растровая и просвечивающая электронная микроскопия; рентгеноструктурный и спектральный анализ; дилатометрические, калориметрические исследования.
  - Микродифракционный анализ строения кристаллической решетки фаз.
  - Анализ химического состава фаз и перераспределения легирующих элементов.
3. Идеальная и реальная кристаллическая структура металлов. Дефекты их кристаллического строения.
4. Диаграммы растяжения. Физическая сущность и значение основных характеристик механических свойств, определяемых по методу испытания образцов на растяжение.
5. Прочность металлов и сплавов как совокупная характеристика деформационного, структурного, фазового и твердорастворного упрочнения с учетом влияния структурных уровней

## 1.2. Современная классификация структурных уровней



- Общий вид детали (x 30 крат) Макроуровень
- Отдельное зерно (x 1000 крат) Микроуровень
- Атомно-кристаллическое строение (x 100000 крат) Субмикроуровень

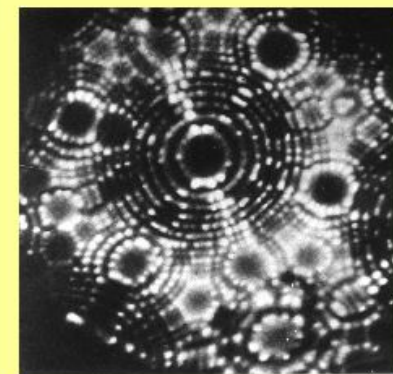
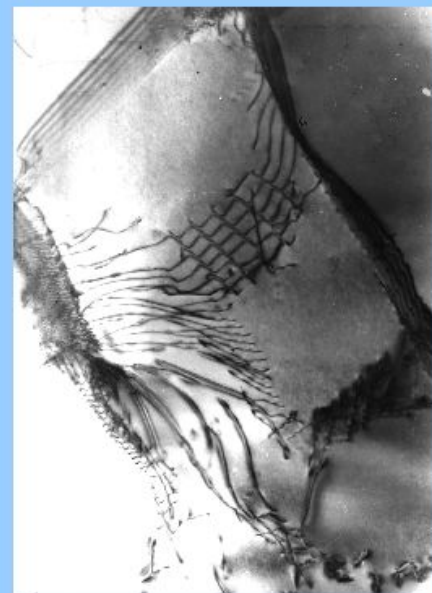
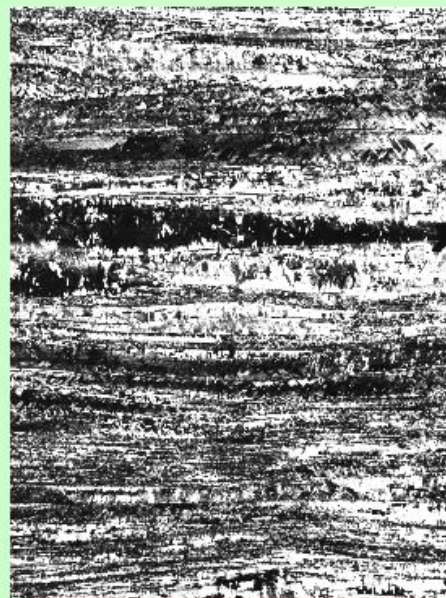
# СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Макро – уровень

Микро – уровень

Субмикро – уровень

Атомный – уровень



ПЭМ  
РЭМ  
МРСА

X 1

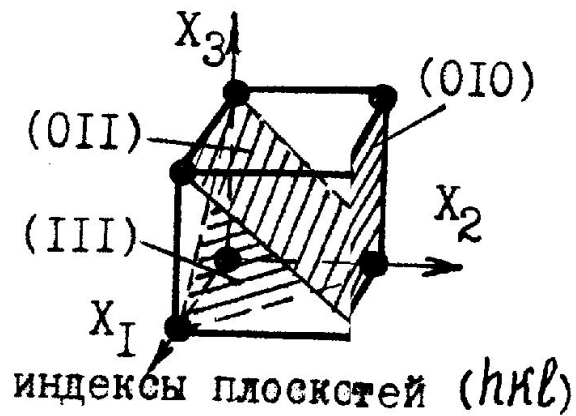
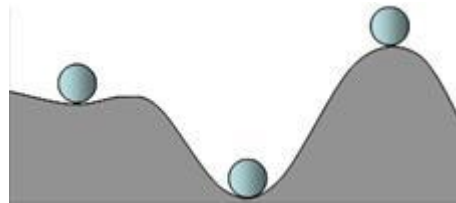
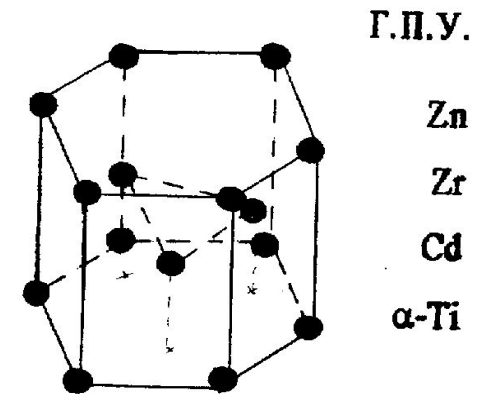
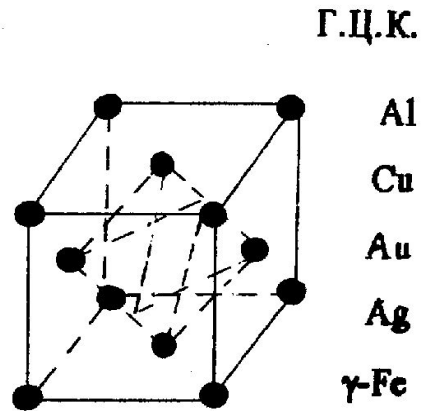
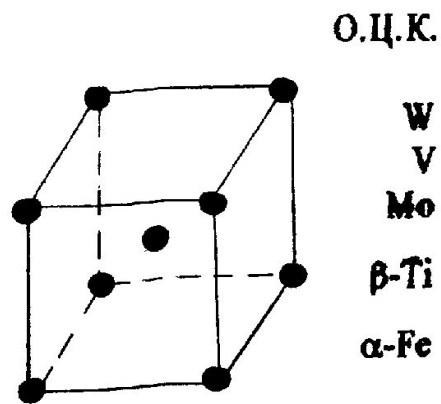


X 1000

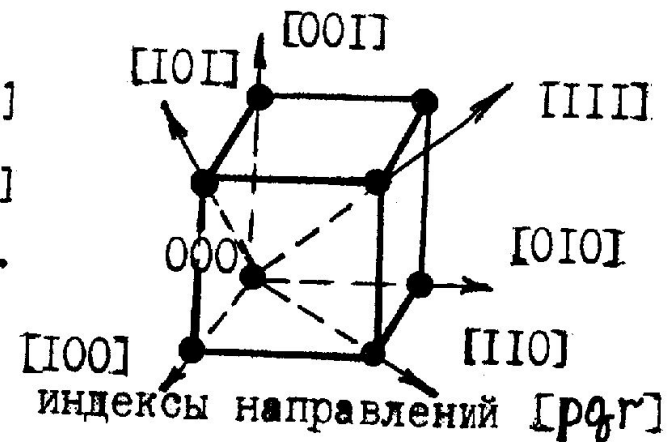


X 24000

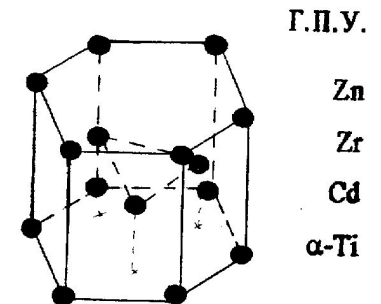
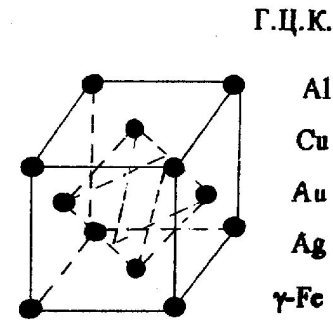
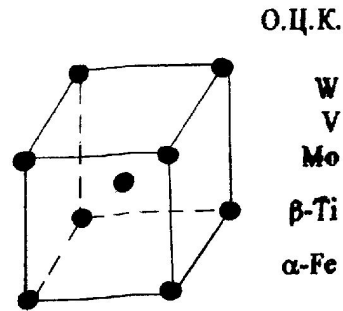
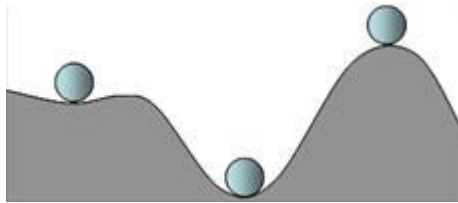
## 1.2. Идеальная кристаллическая структура металлов



$(100) \perp [110]$   
 $(111) \perp [111]$   
 .....



# 1.2. Идеальная кристаллическая структура металлов



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



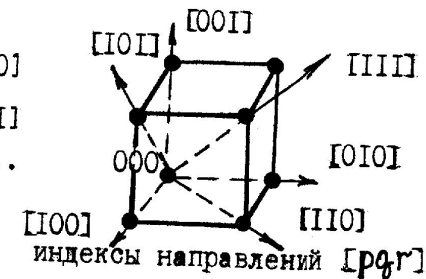
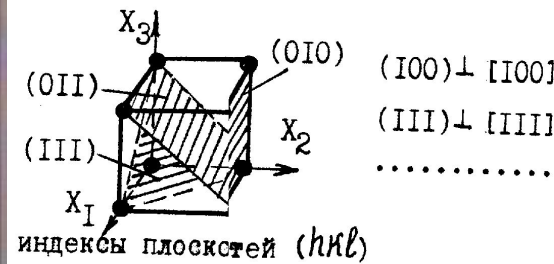
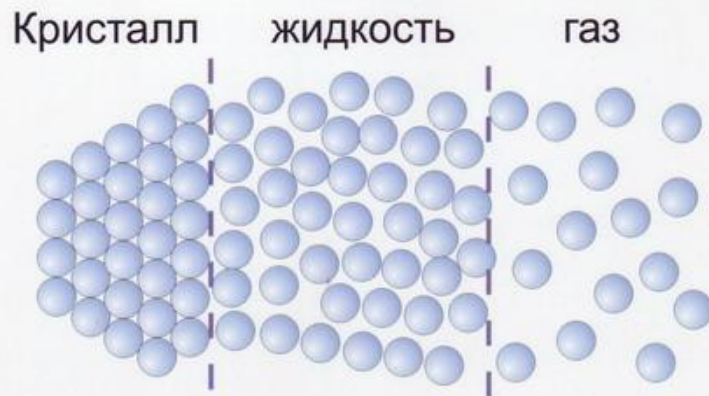
(а)



(б)



Схематическая модель расположения частиц в веществе



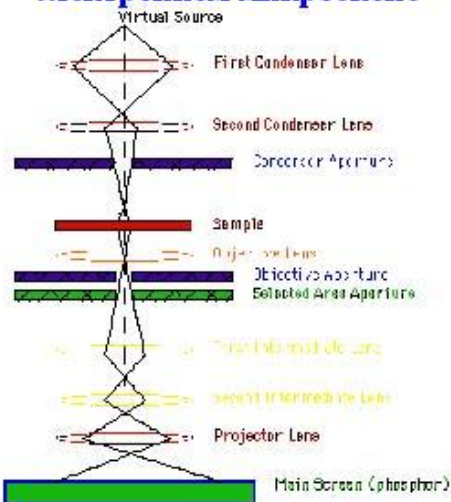
## Количественные характеристики кристаллической решётки

- **Период решетки ( $a, b, c$ )** – расстояние между центрами 2-ух соседних частиц (атомов, ионов).
- **Координационное число ( $K$ )** – число атомов, которые находятся на наиболее близком и равном расстоянии от любого атома решетки.
- **Базис решетки ( $B$ )** – количество атомов, приходящихся на 1 элементарную ячейку решетки.
- **Коэффициент компактности ( $\eta$ )** – отношение объема, занимаемого атомами, ко всему объему решетки
- **Размеры пор: октаэдрические ( $P_6$ ), тетраэдрические ( $P_4$ )**
- **Наиболее плотно-упакованные плоскости  $\{hkl\}$ .**

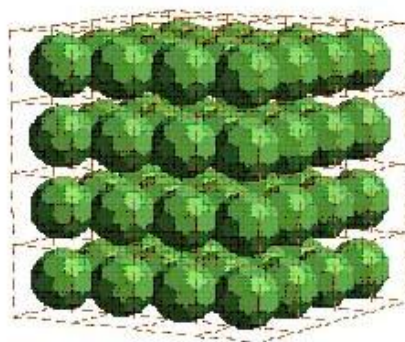
| № | Обозначение<br>$a, b, c$ | ГЦК<br>$a, b, c$                     | ОЦК<br>$a, b, c$           | ГПУ<br>$a, b, c$                          |
|---|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
| 1 |                          |                                      |                            |                                           |
| 2 | $K$                      | 12                                   | 8                          | 12                                        |
| 3 | $B$                      | 4<br>$1/8 \cdot 8 + 1/2 \cdot 6 = 4$ | 2<br>$1/8 \cdot 8 + 1 = 2$ | 6<br>$1/6 \cdot 12 + 1/2 \cdot 2 + 3 = 6$ |
| 4 | $\eta$                   | 74%                                  | 68%                        | 74%                                       |
|   | $P_6$                    | 0,41 r                               | 0,154 r                    | 0,41 r                                    |
| 5 | $P_4$                    | 0,225 r                              | 0,291 r                    | 0,225 r                                   |
| 6 | $\{hkl\}$                | $\{111\}, <110>$                     | $\{110\}, <111>$           | $\{0001\}, <11-20>$                       |

# ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРОСВЕЧИВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

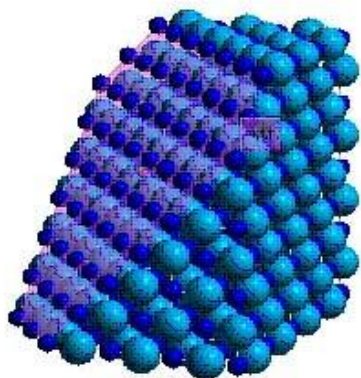
## Схема хода лучей в электронном микроскопе



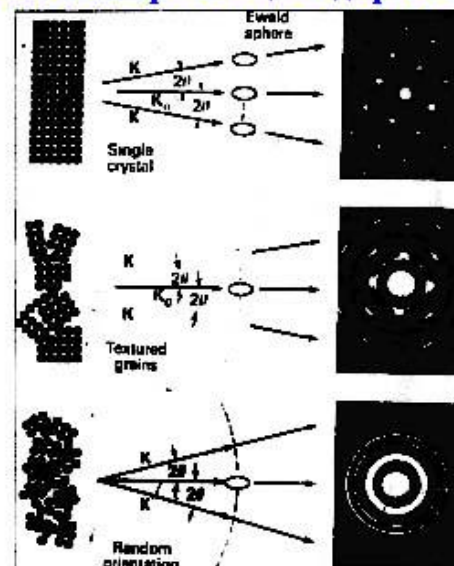
## Многогранники $\text{CaIn}$



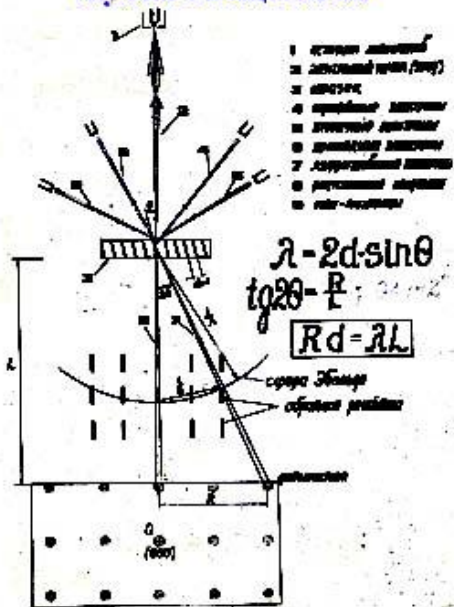
## (111) плоскость в $\text{NaCl}$



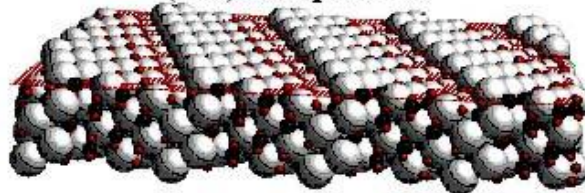
## Типы электрограмм материала с различной ориентацией дефектов



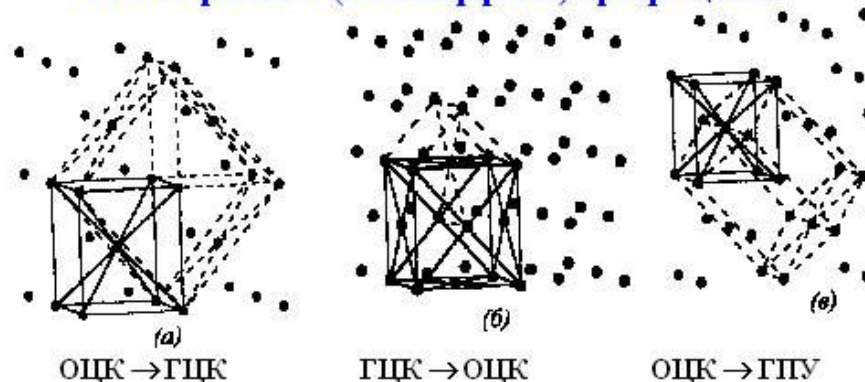
## Взаимодействие электронного пучка с веществом



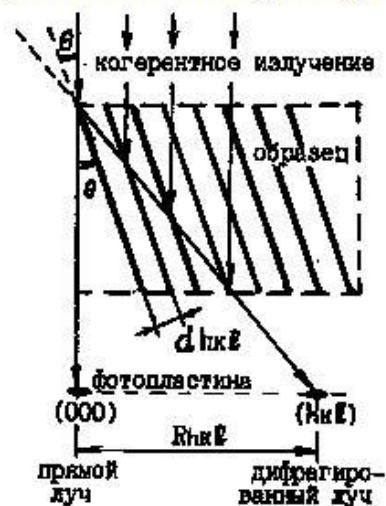
## (111) поверхность



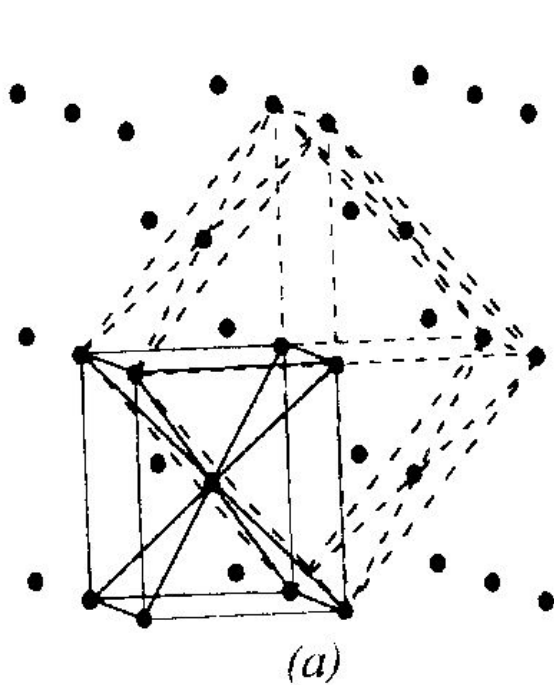
## Схемы фазовых (полиморфных) превращений



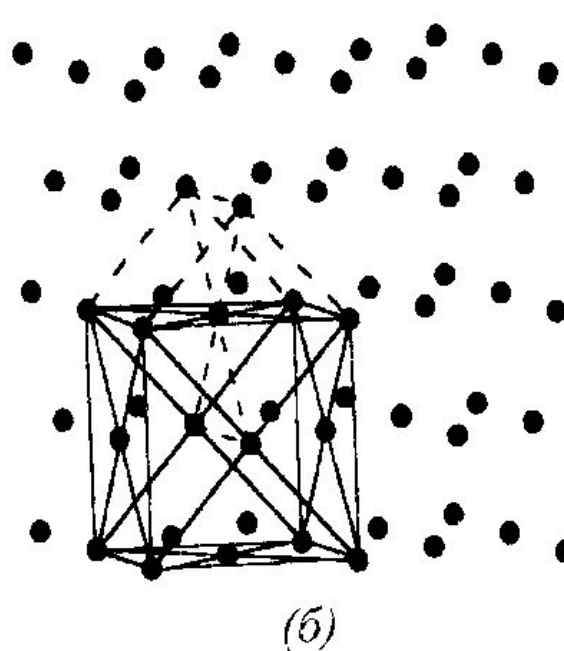
## Схема формирования рефлексов на электрограмме



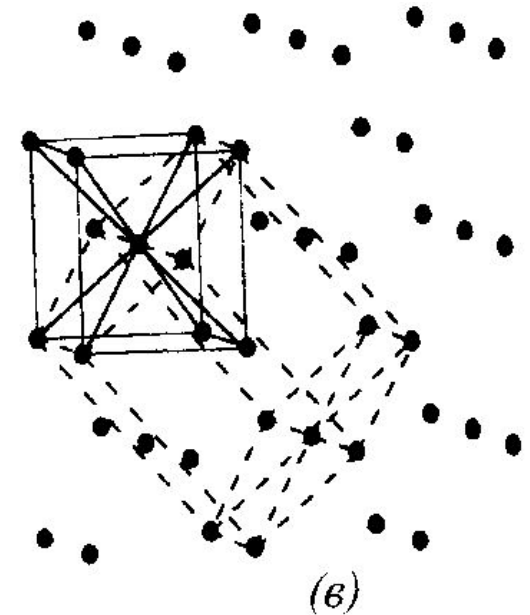
# Полиморфные превращения



ОЦК  $\rightarrow$  ГЦК



ГЦК  $\rightarrow$  ОЦК



ОЦК  $\rightarrow$  ГПУ

- 1 группа    ОЦК  $\rightarrow$  ГЦК    (Fe, Mn, Cd, La, Yb) ;
- 2 группа    ГПУ  $\rightarrow$  ОЦК    (Ti, Zr, Hf, Ta, Gd) ;
- 3 группа    ГПУ  $\rightarrow$  ГЦК    (Co, Tb, Sr) .

# Микродифракционная картина

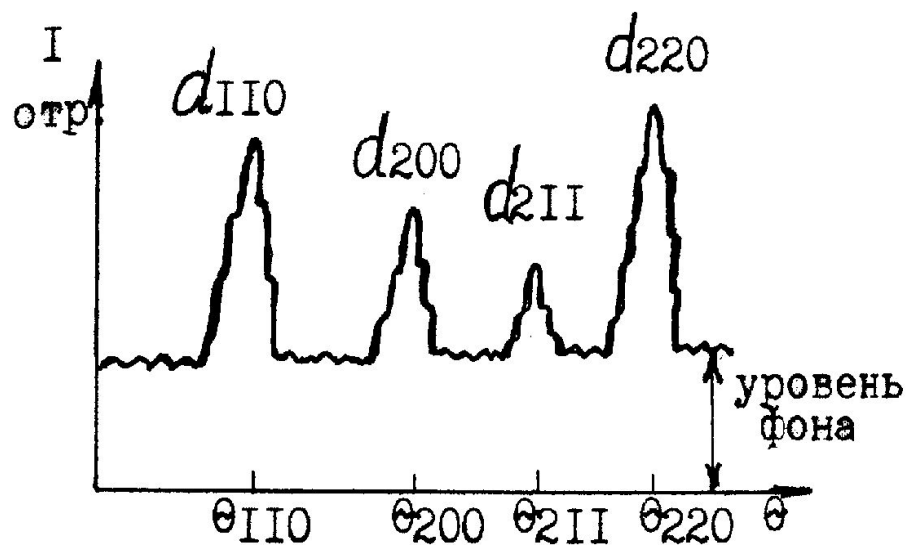
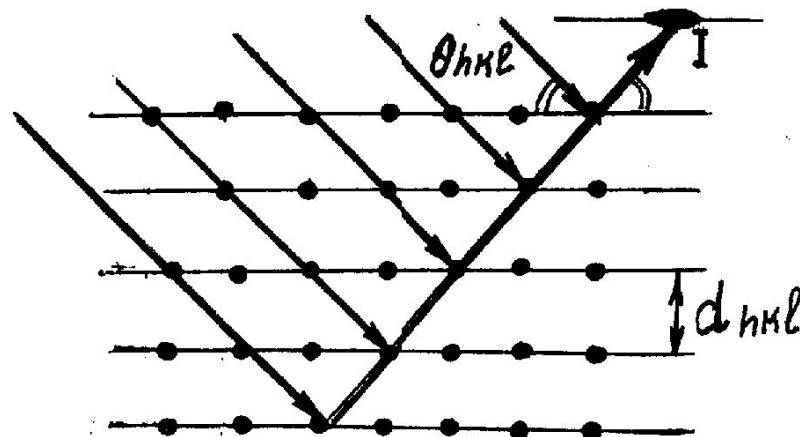


Когерентное  
излучение с

Рефлекс (отражение)  
на фотопластине  
длиной волны  $\lambda$

$$n\lambda = 2 \cdot d_{hkl} \sin \theta_{hkl}$$

Рис.5.



|                   |                         |              |                    |                    |
|-------------------|-------------------------|--------------|--------------------|--------------------|
| $\bar{2}22$       | $\bar{1}12$             | 002          | 112                | 222                |
| $\bar{2}20$       | $\bar{1}10$             | 000          | 110                | 220                |
| $\bar{2}2\bar{2}$ | $\bar{1}\bar{1}\bar{2}$ | 00 $\bar{2}$ | 1 $\bar{1}\bar{2}$ | 2 $\bar{2}\bar{2}$ |

# 1.3. Реальная структура металлов.

## Дефекты кристаллического строения

- **Классификация дефектов.**

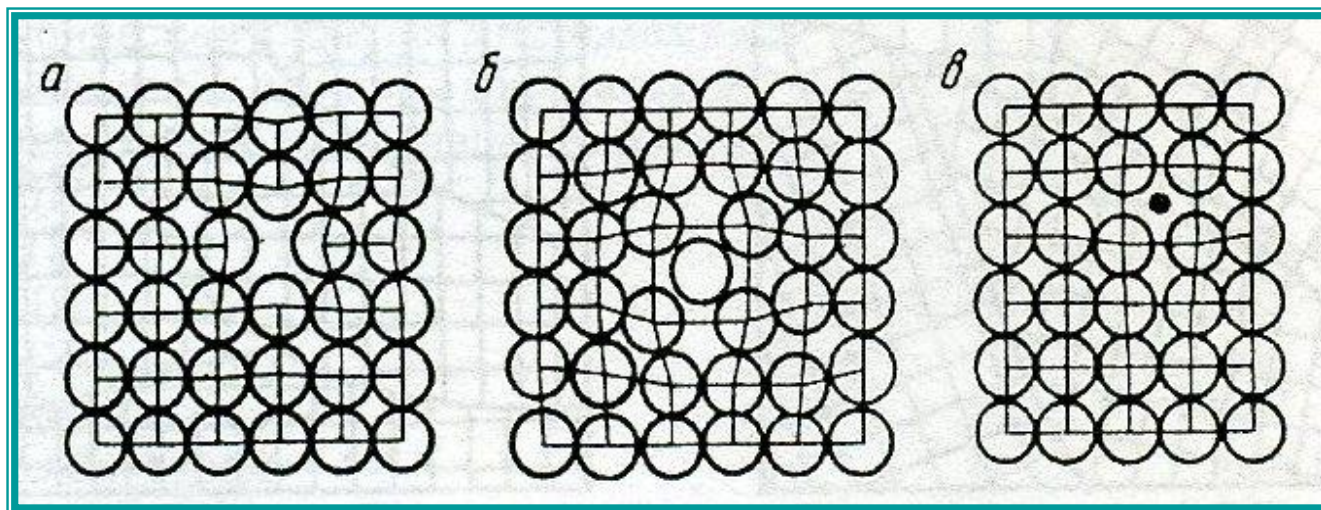
- 1. **Точечные** –
- вакансии, вакансионные комплексы, межузельные атомы, пары Френкеля (вакансия-межузельный атом), атомы замещения и др.
- 2. **Линейные** – дислокации (краевые, винтовые).
- 3. **Поверхностные** – границы зерен, блоков, двойников, фаз, дефекты упаковки.
- 4. **Объемные** –
- поры.

**Точечные дефекты в кристаллической решетке:**

а) вакансия

б) элемент замещения

в) элемент внедрения

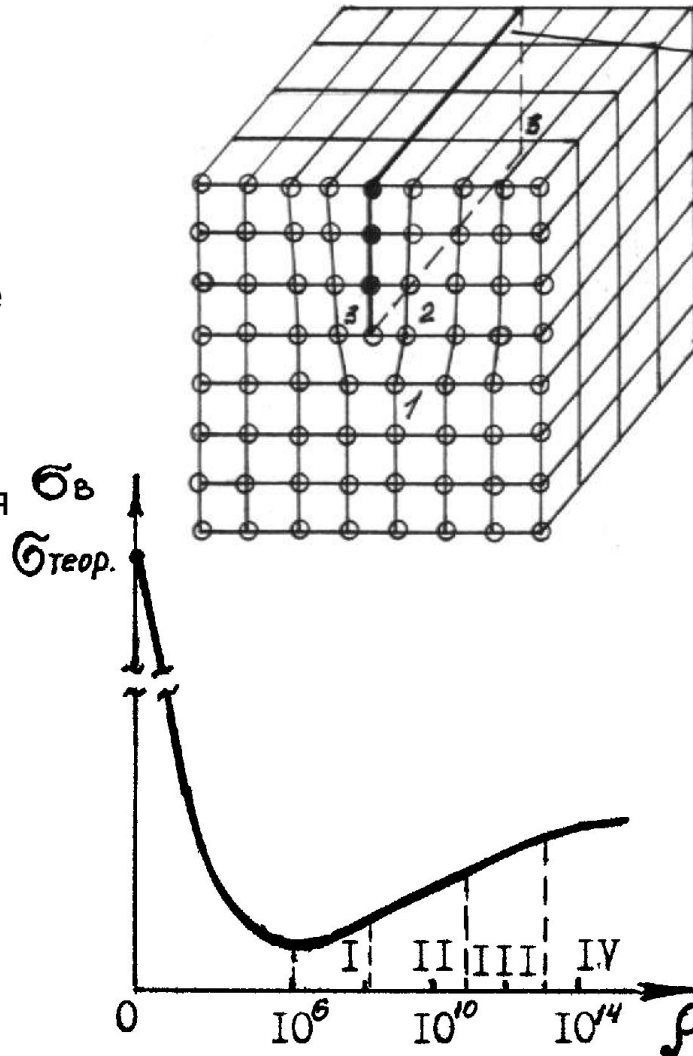


# Реальная структура металлов.

## Дислокации в кристалле

- **Классификация дефектов.**

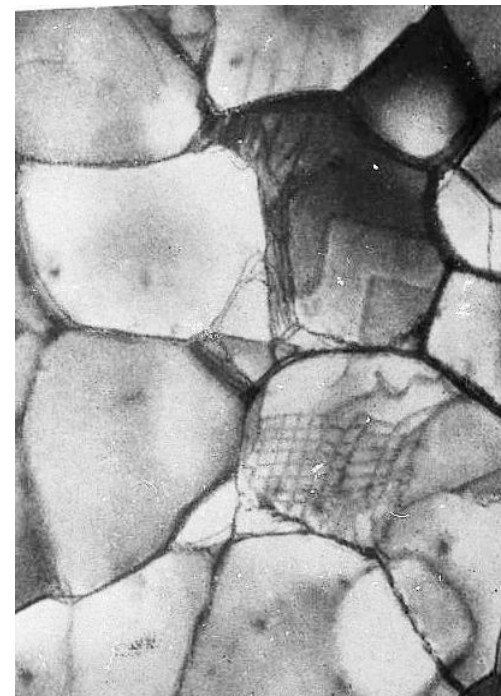
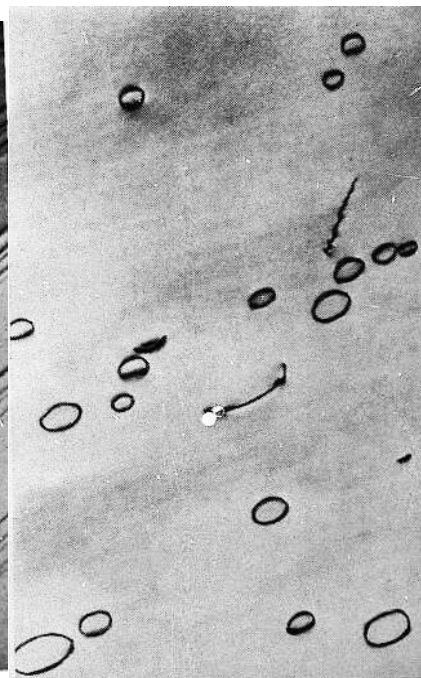
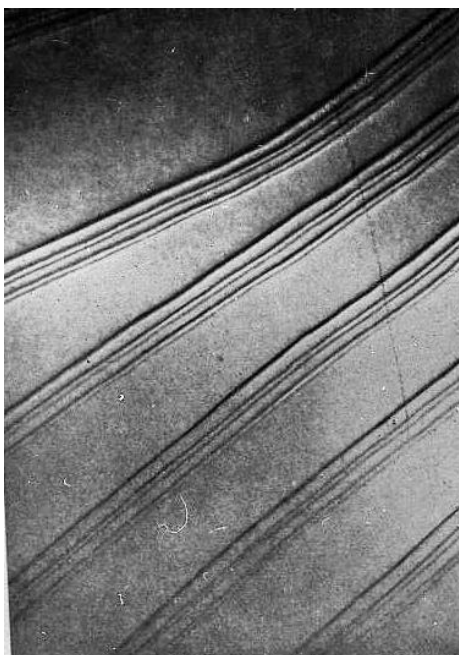
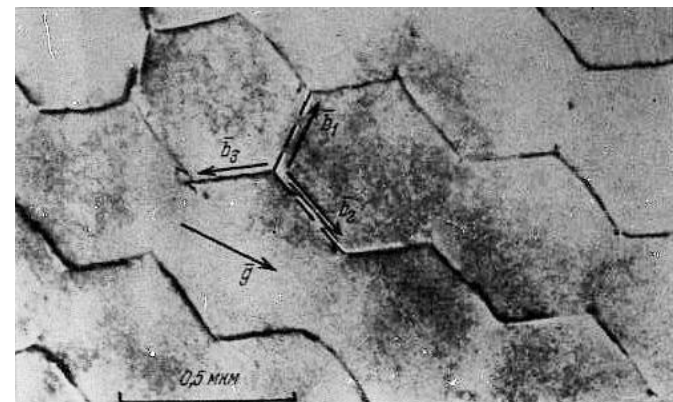
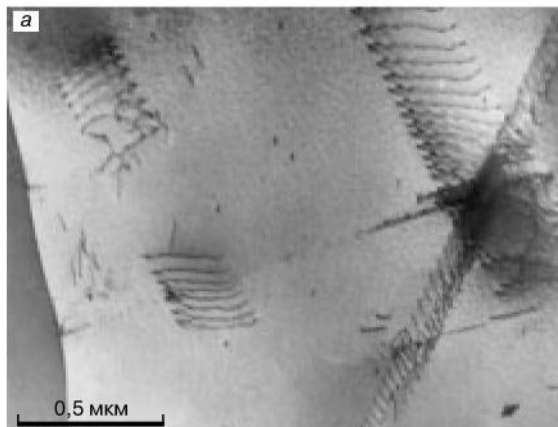
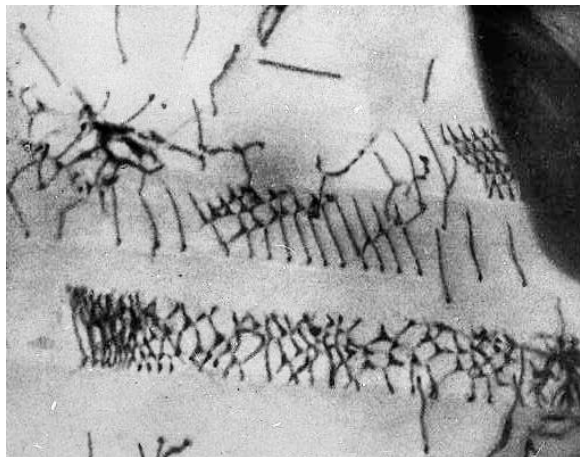
- 1. **Точечные** – вакансии, вакансионные комплексы, межузельные атомы, пары Френкеля (вакансия-межузельный атом), атомы замещения и др.
- 2. **Линейные** – дислокации (краевые, винтовые).
- 3. **Поверхностные** – границы зерен, блоков, двойников, фаз, дефекты упаковки.
- 4. **Объемные** – поры.



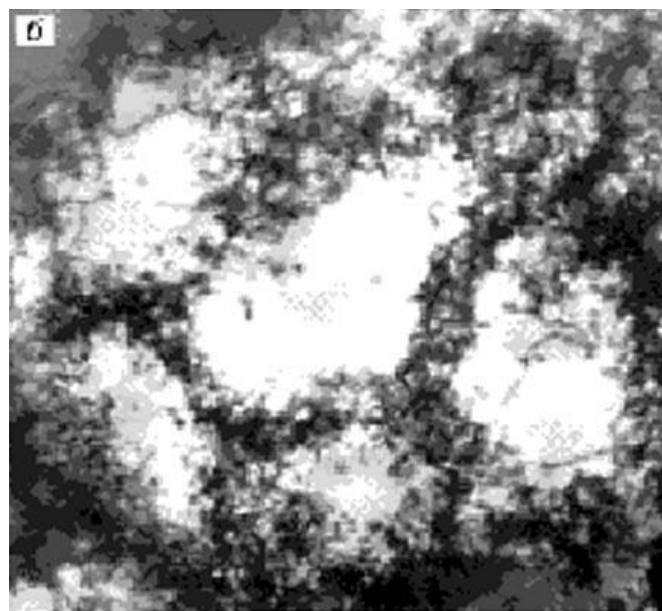
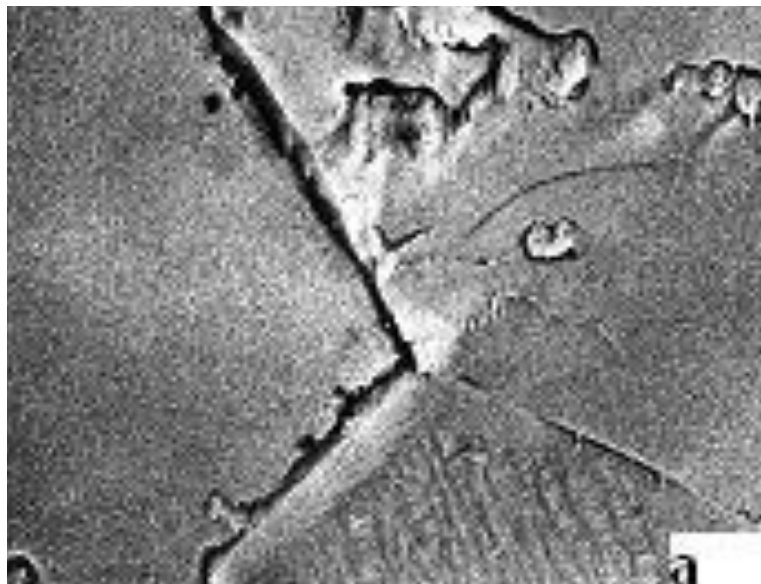
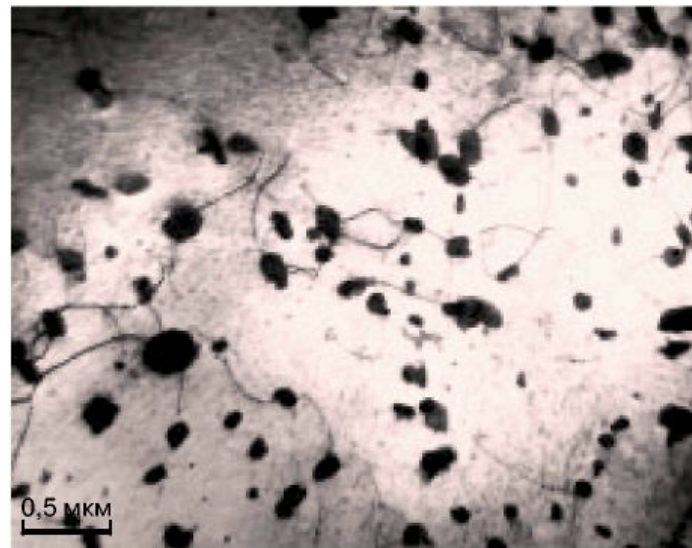
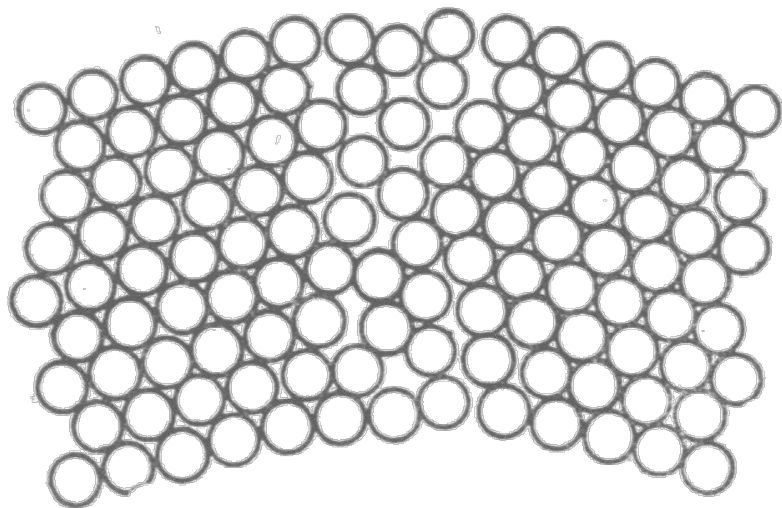
- **Плотность дислокаций**

- I)  $\rho_{\perp} = 10^6 \text{ см}^{-2}$  - хаотическое распределение дислокаций в отожженном металле,  $\epsilon = 0\%$ ;
- II)  $\rho_{\perp} = 10^8 \text{ см}^{-2}$  - дислокационные "жгуты", клубки, сплетения,  $\epsilon = 5\%$ ;
- III)  $\rho_{\perp} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$  - дислокационная ячеистая структура с размером ячеек  $1 \text{ мкм}$  и разворотом  $\epsilon = 0,1-1 \text{ град.}$ ,  $\epsilon = 10-20\%$
- IV)  $\rho_{\perp} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$  - дислокационная ячеистая структура с увеличением угла разворота вплоть до образования трещины.

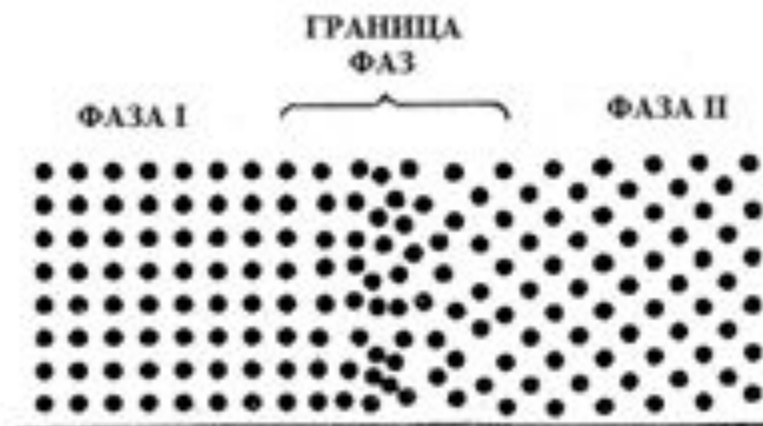
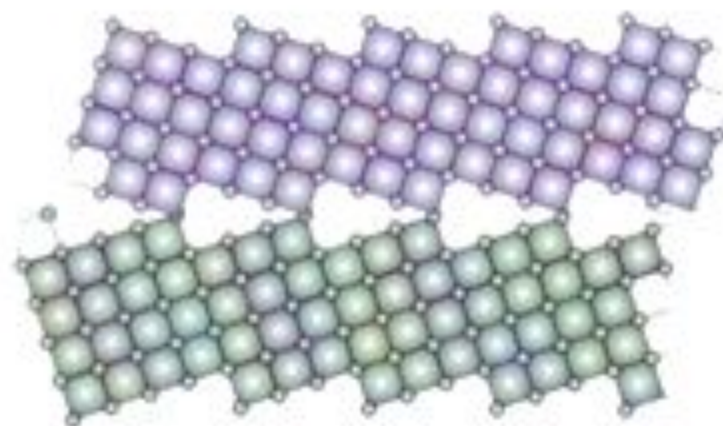
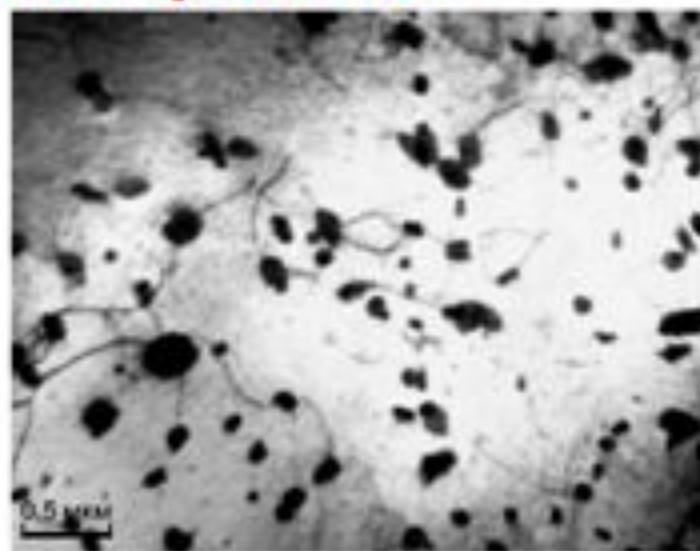
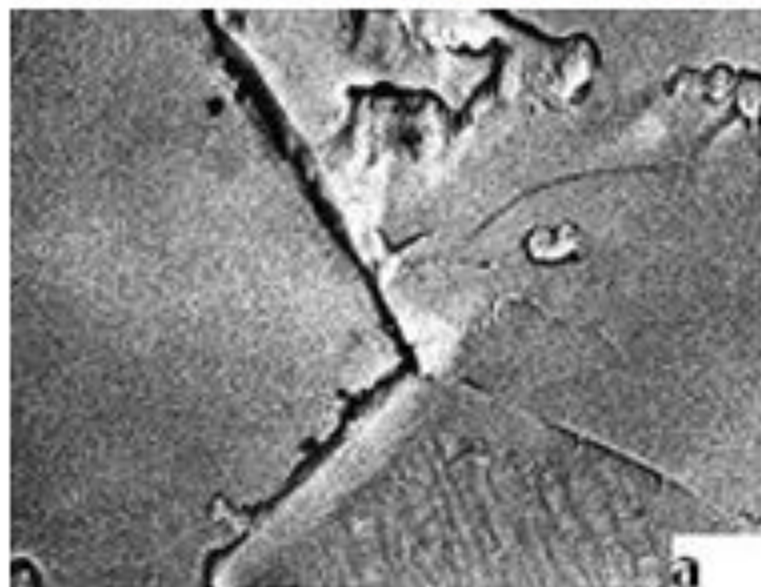
# Дислокации в кристалле



# Поверхностный дефект кристаллического строения



# Поверхностный дефект кристаллического строения

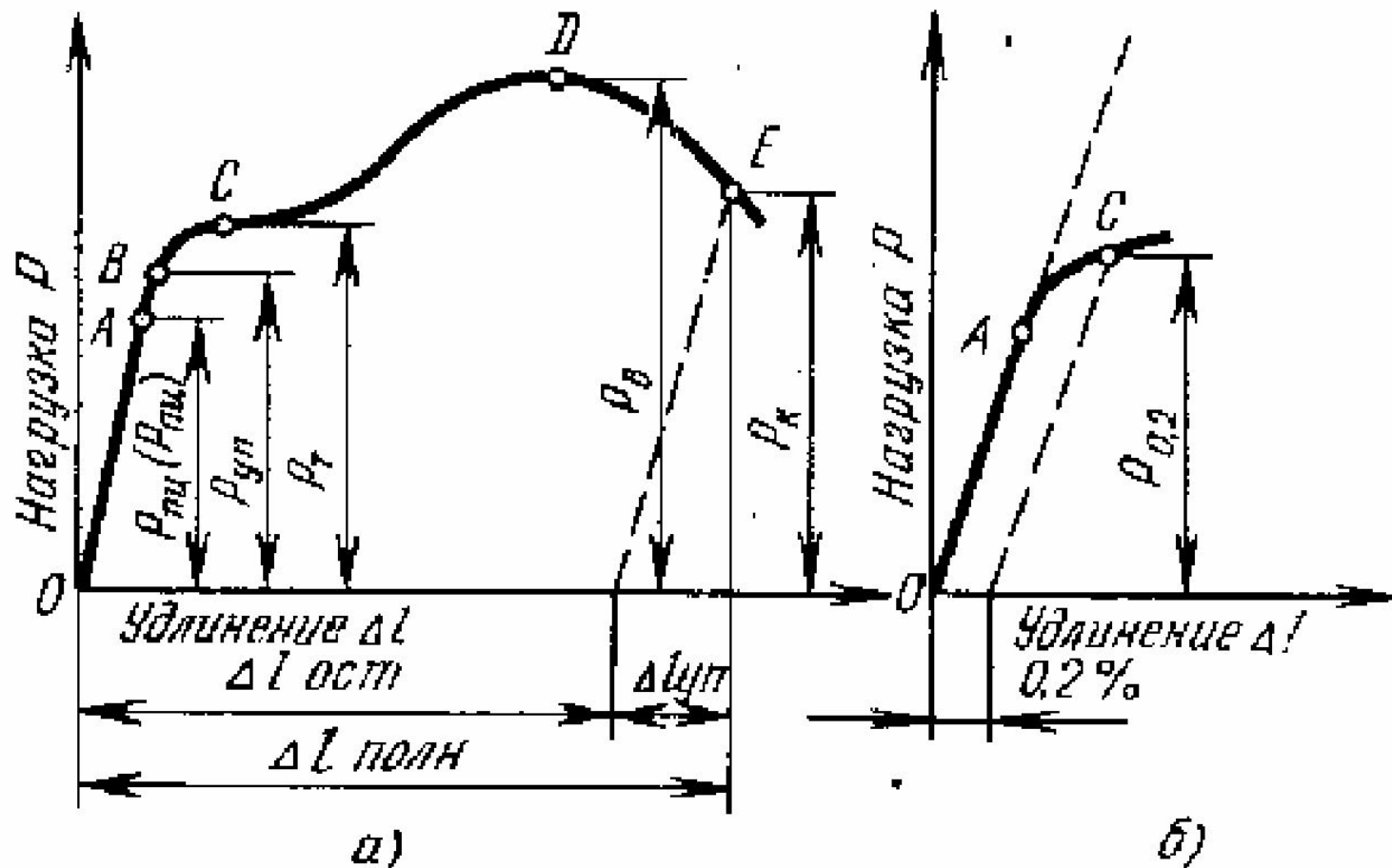


# Объемный дефект кристаллического строения



- Поры в сплаве на основе меди после высокоскоростном нагружении,
- x 13000 (a); x 82000 (б).

## 1.5. Физическая сущность параметров кратковременных механических свойств, получаемых из диаграммы растяжения



## 1.5. Прочность металлов и сплавов как совокупная характеристика влияния структурных уровней.

- **На макро-уровне** – на механические свойства влияет масштабный фактор
- **На микро-уровне** – на механические свойства влияет размер зерна.

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + K / (D_{\text{зерна}})^{1/2}$$

**На субмикро-уровне – на механические свойства влияет размер зерна.**

- влияние легирования
- влияние второй фазы
- дислокационное упрочнение
- влияние границ раздела

$$\sigma_{\text{reop}} = (\mathbf{E} \cdot \mathbf{S}_n / \mathbf{a})^{1/2}$$

|                |   |                          |   |                                       |   |                              |   |                             |   |                                           |   |                                         |
|----------------|---|--------------------------|---|---------------------------------------|---|------------------------------|---|-----------------------------|---|-------------------------------------------|---|-----------------------------------------|
| $\sigma_{0,2}$ | = | $\sigma_0$               | + | $\sigma_1$                            | + | $\sigma_2$                   | + | $\sigma_3$                  | + | $\sigma_4$                                | + | $\sigma_5$                              |
|                |   | сила трения<br>решетки и |   | твердое<br>растворное упрочне-<br>ние |   | дислокационное<br>упрочнение |   | дисперсионное<br>упрочнение |   | упрочнение<br>более угловыми<br>границами |   | упрочнение<br>малоугловыми<br>границами |

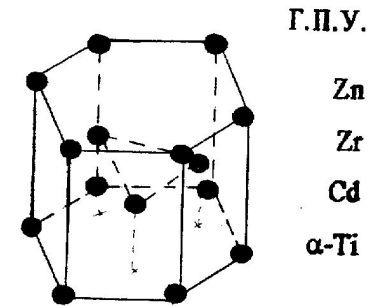
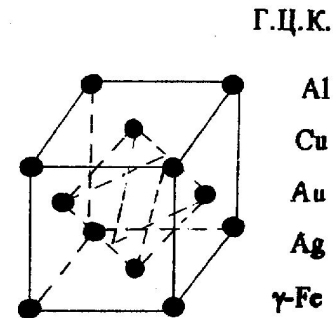
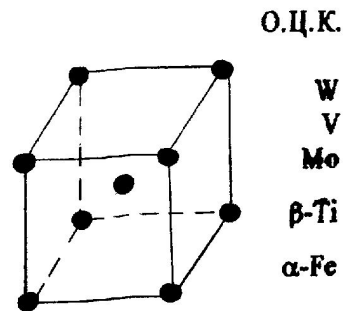
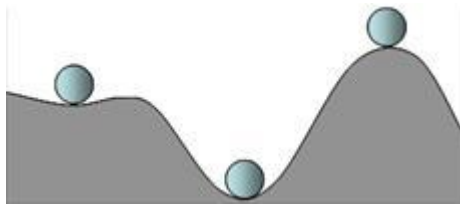
# Теоретическая прочность

Пути повышения прочности металлов

$$\sigma_{\text{теор}} = (E \times S_n / a)^{1/2}$$

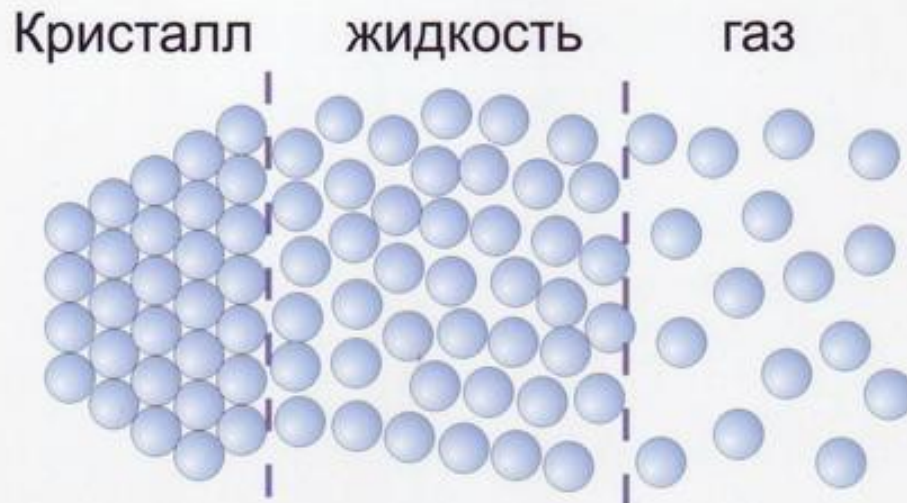


# Упрочнение, обусловленное силой трения решетки в монокристалле. Напряжение Пайерлса.



| Me                    | W  | Mo   | Ni | α- Fe | Cu | Au  | Al  |
|-----------------------|----|------|----|-------|----|-----|-----|
| τ <sub>кр</sub> , МПа | 38 | 30,5 | 23 | 21,5  | 12 | 8,0 | 6,8 |

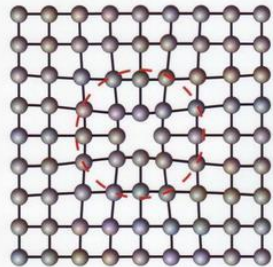
Схематическая модель расположения частиц в веществе



$$\sigma_0 = \tau_{кр} = 2,5 \cdot 10^{-4} G$$

# Твёрдорастворное упрочнение

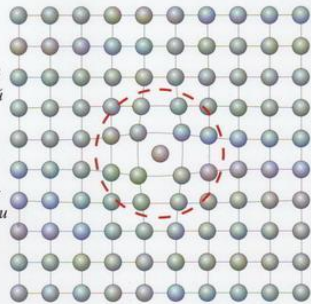
## Точечные дефекты



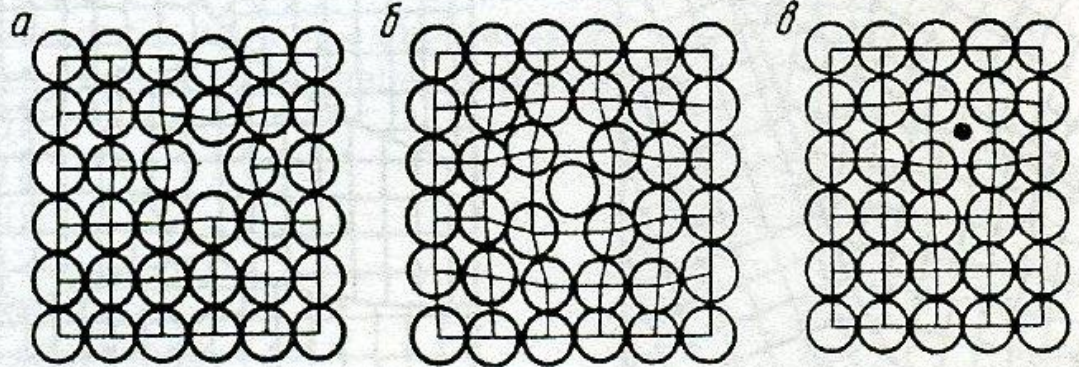
*Вакансия* - это узел кристаллической решетки незанятый атомом или ионом.

*Межузельный атом* - атом, расположенный в межузельном пространстве кристаллической решетки.

Образование вакансии или межузельного атома приводит к локальному искажению решетки кристалла.

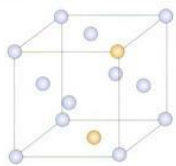


**Точечные дефекты в кристаллической решетке:** а) вакансия; б) элемент замещения; в) элемент внедрения



## Твердые растворы замещения

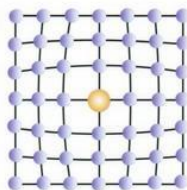
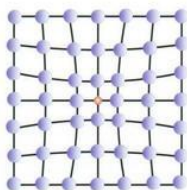
Растворы такого типа образуются путем замены атомов металла - растворителя в его кристаллической решетке атомами растворенного элемента



— Атом растворителя

— Атом растворенного элемента

Искажения кристаллической решетки в твердых растворах замещения

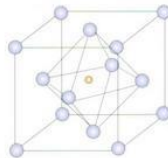


Атом растворяемого элемента меньше атома растворителя

Атом растворяемого элемента больше атома растворителя

## Твердые растворы внедрения

Растворы такого типа образуются путем размещения атомов растворяемого элемента в порах решетки растворителя

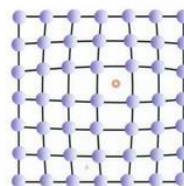


— Атом растворителя

— Атом растворенного элемента

Твердые растворы внедрения образуются в случае, когда радиус атома растворенного элемента невелик. Например, при растворении в железе атомов углерода, азота или водорода.

Искажения кристаллической решетки в твердых растворах внедрения



# Значения величин коэффициентов упрочнения для ряда легирующих элементов в железе

|       |   |    |    |    |    |    |    |    |    |     |      |
|-------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|
| Me    | V | Mo | Ni | Cr | Mn | Cu | Al | Ti | Si | P   | C, N |
| $K_i$ | 3 | 11 | 30 | 31 | 33 | 39 | 60 | 82 | 86 | 690 | 4670 |

$$\Delta = (d_{Fe} - d_{Me}) / d_{Me}$$

$$\sigma_1 = \sum (K_i \cdot C_i)$$

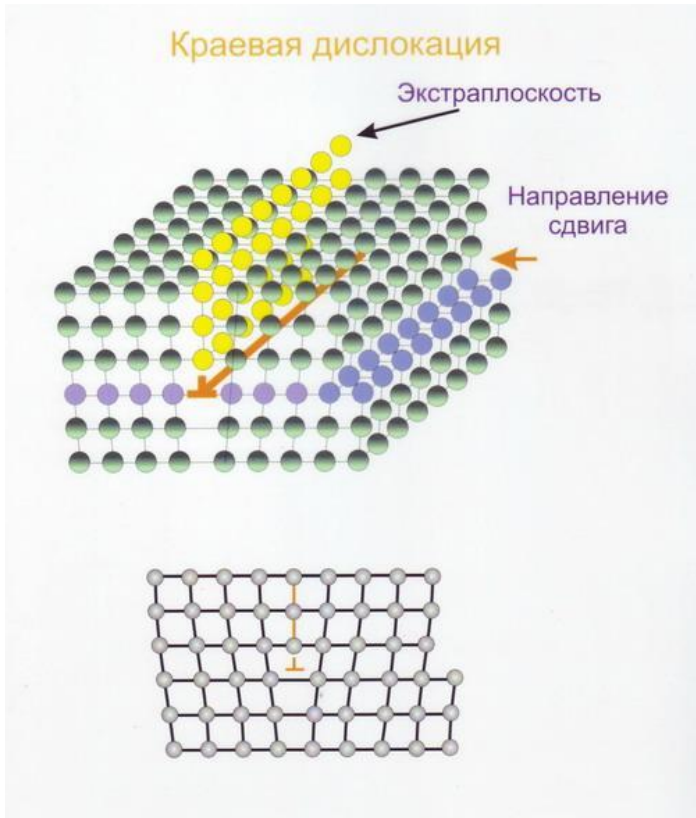
где,  $\Delta$  – величина размерного несоответствия атомов металлов в твёрдом растворе,

$d$  – диаметр атома металла,

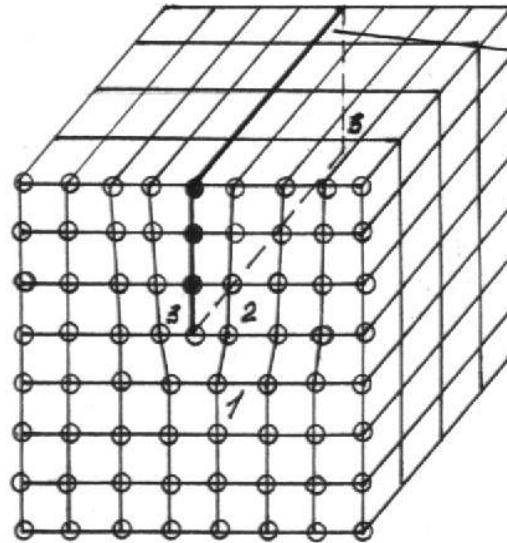
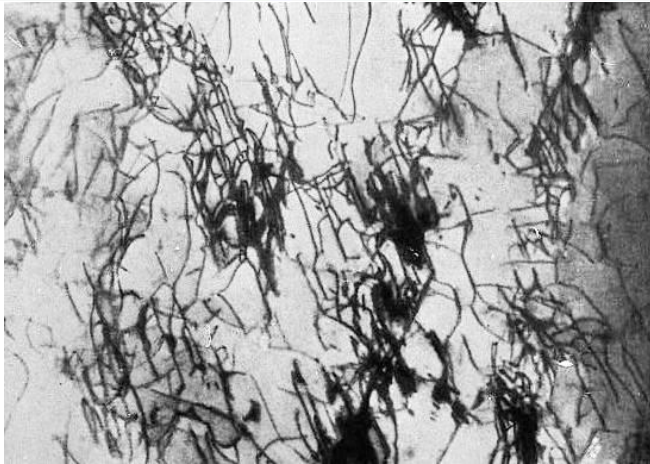
$K_i$  – коэффициент упрочнения сплава  $i$  – ым легирующим элементом,  
пропорциональный величине его размерного несоответствия  $\Delta_i$ ;

$C_i$  – концентрация содержания в сплаве  $i$ -го легирующего элемента.

# Дислокационное упрочнение



$$\sigma_4 = \alpha \cdot m \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2}$$



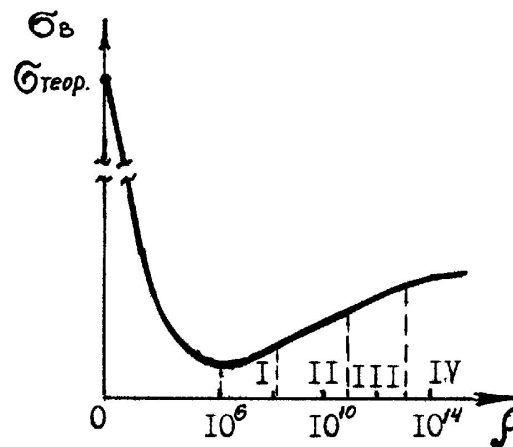
## Плотность дислокаций

I)  $\rho_{\perp} = 10^6 \text{ см}^{-2}$  - хаотическое распределение дислокаций в отожженном металле,  $\varepsilon = 0\%$ ;

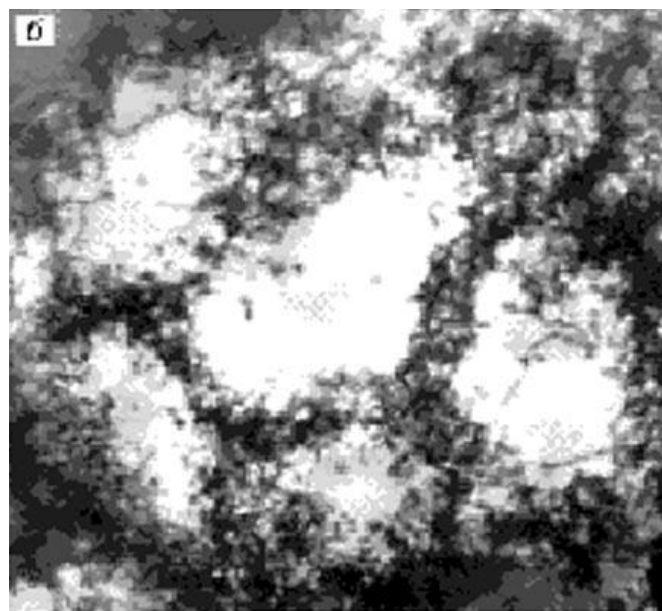
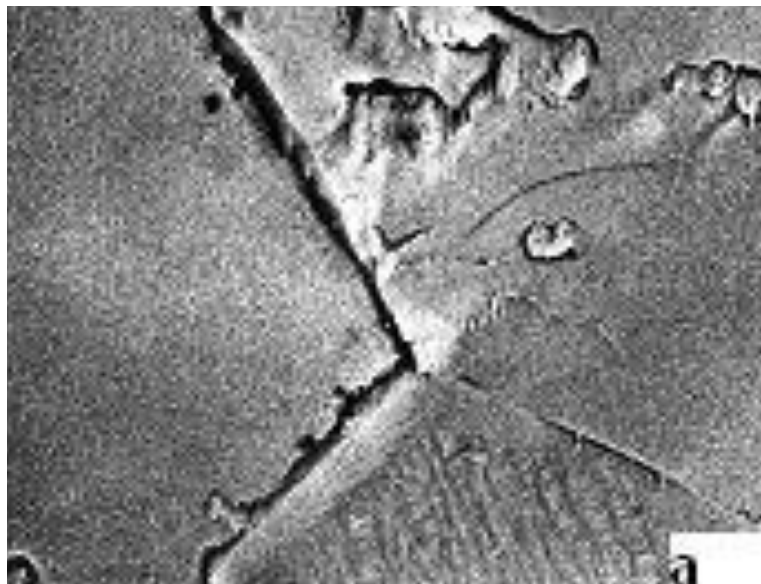
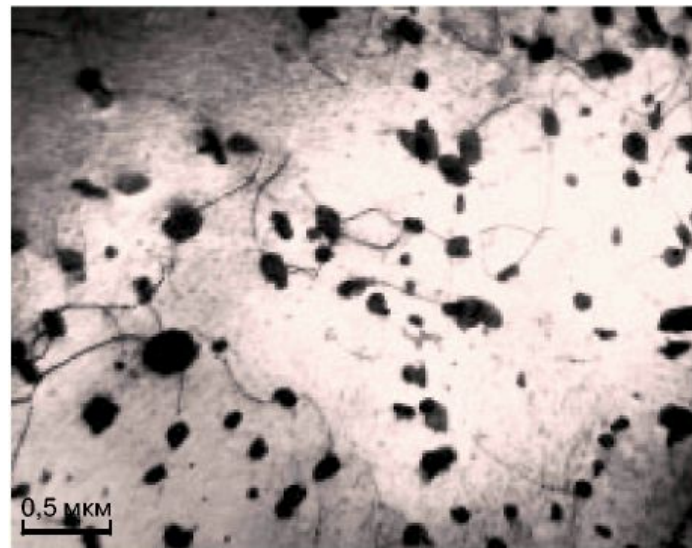
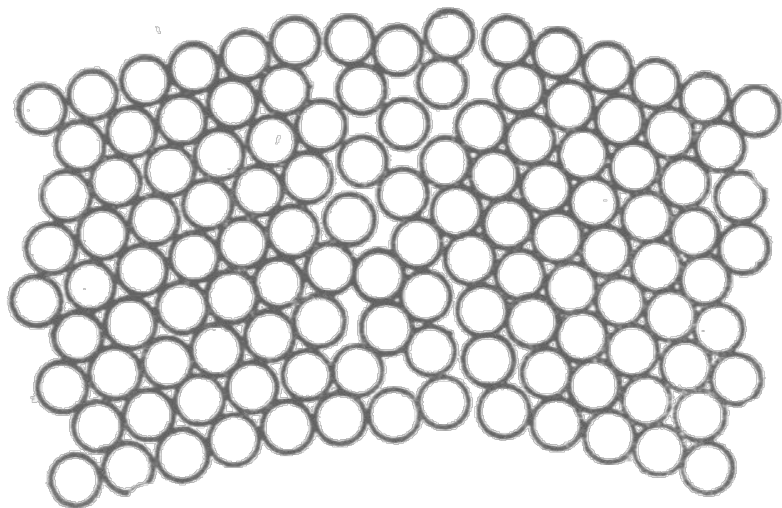
II)  $\rho_{\perp} = 10^8 \text{ см}^{-2}$  - дислокационные "жгуты", клубки, сплетения,  $\varepsilon = 5\%$ ;

III)  $\rho_{\perp} = 10^{11} \text{ см}^{-2}$  - дислокационная ячеистая структура с размером ячеек 1 мкм и разворотом  $\varepsilon = 0,1-1$  град.,  $\varepsilon = 10-20\%$

IV)  $\rho_{\perp} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$  - дислокационная ячеистая структура с увеличением угла разворота вплоть до образования трещины.



# Поверхностные дефекты кристаллического строения



# Субзёренное упрочнение

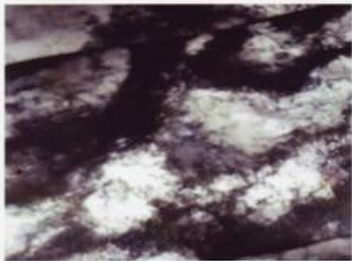
## ПОЛИГОНИЗАЦИЯ

Схема полигонизации

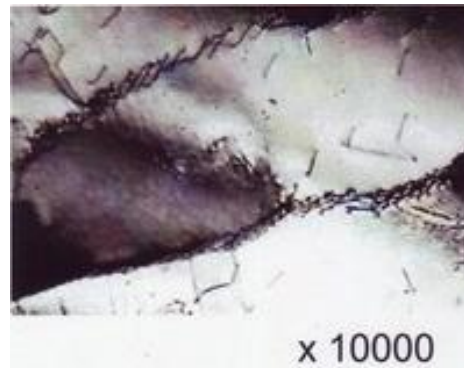
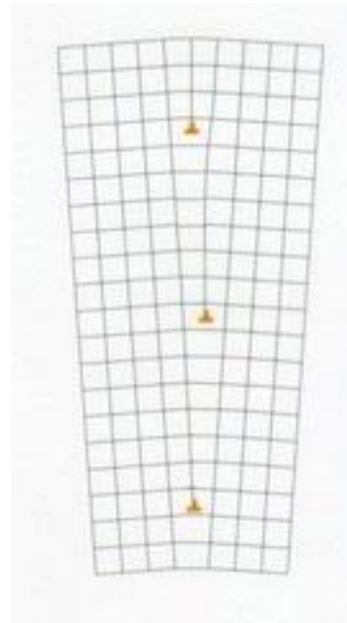
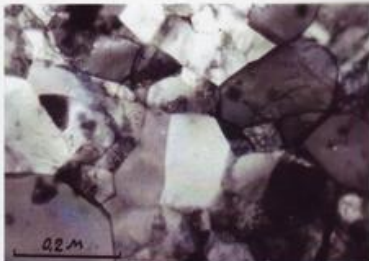


Изменение структуры при нагреве

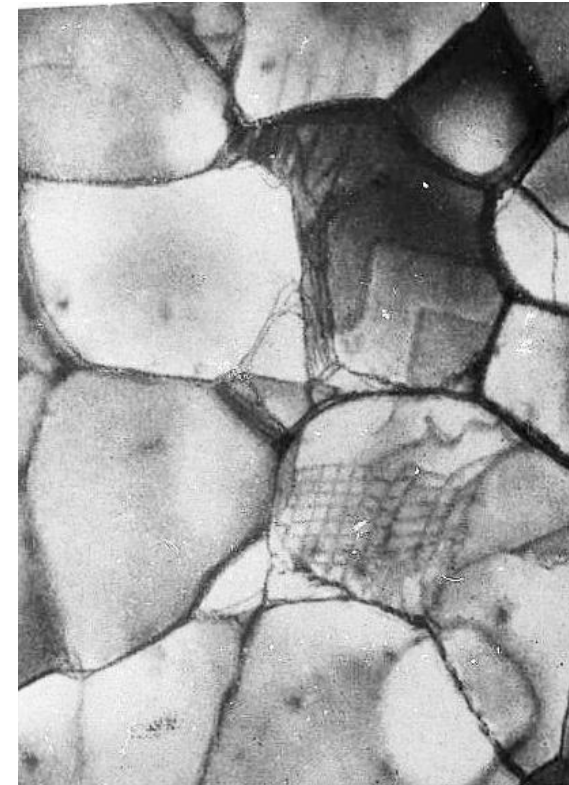
Структура после  
холодной деформации



Структура после  
полигонизации

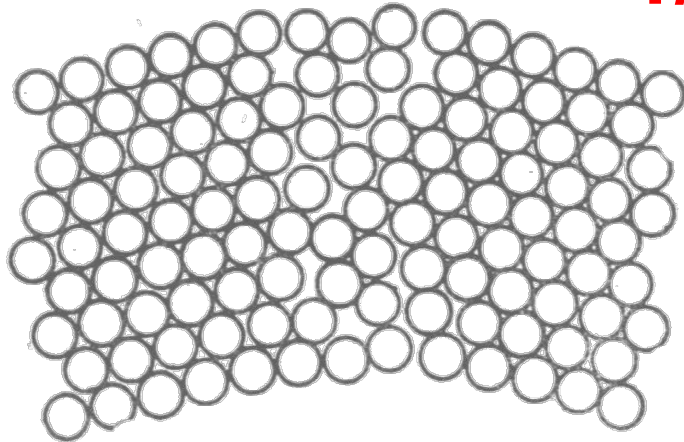


$$\sigma_5 = K_c \cdot d^{-m}$$

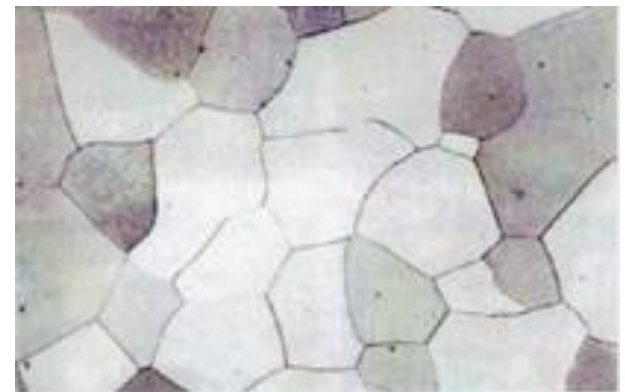
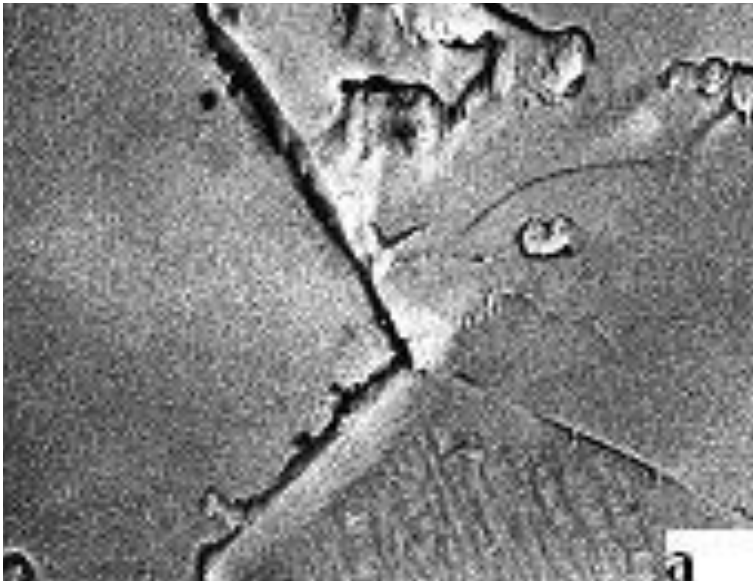


# Зернограничное упрочнение

$$\sigma_3 = K_y \cdot D^{-1/2}$$

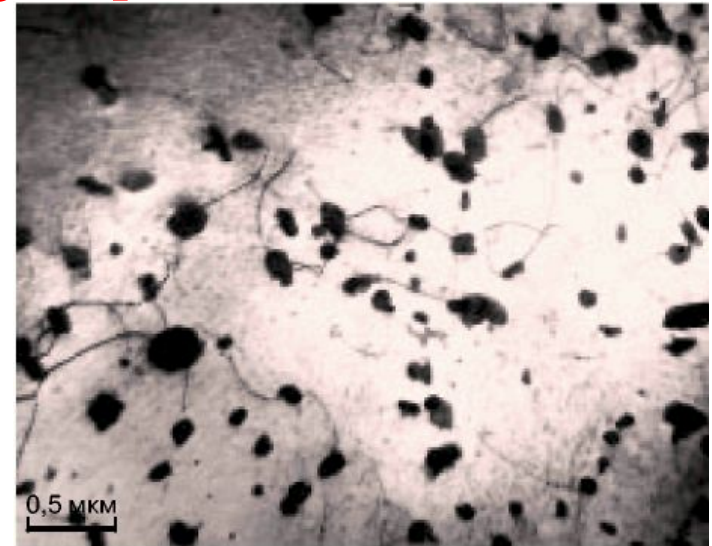
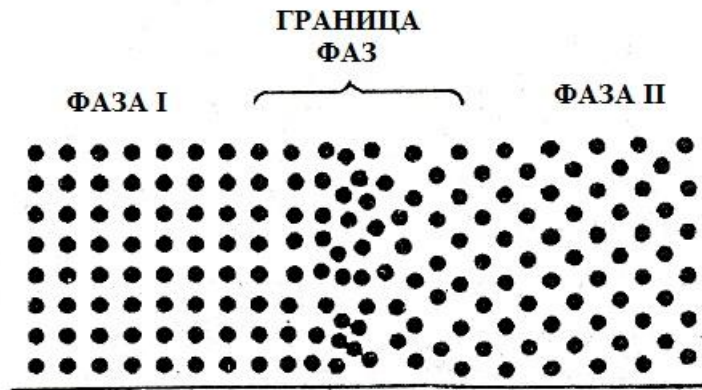


$$\sigma_3 = K_y \cdot D^{-1/2}$$



x 250

# Дисперсионное упрочнение



$$\sigma_2 = 0,8 G \cdot b / \lambda$$

## Жаропрочные аустенитные стали с карбидным упрочнением

Эти стали предназначены для работы при 650-750°C и высоких напряжениях

| Марка стали           | Содержание, % |           |       |         |           |           |                                       |
|-----------------------|---------------|-----------|-------|---------|-----------|-----------|---------------------------------------|
|                       | C             | Cr        | Ni    | Mn      | Mo        | V         | другие                                |
| 45X14H14B2M (Зи69)    | 0,4-0,5       | 13-15     | 13-15 | -       | 0,25-0,4  | -         | W 2,0-2,7                             |
| 31X19H9MBBT (Зи572)   | 0,28-0,35     | 18-20     | 8-10  | -       | 1,0-1,5   | -         | W 1,0-1,5<br>Ti 0,2-0,5<br>Nb 0,2-0,5 |
| 37X12H8Г8МФБ (Зи481)  | 0,34-0,40     | 11,5-13,5 | 7-8   | 7,5-9,5 | 1,1-1,4   | 1,25-1,35 | Nb 0,25-0,45<br>Si 0,9-1,4            |
| 40X15H7Г7Ф2МС (Зи388) | 0,38-0,47     | 14-16     | 6-8   | 6-8     | 0,65-0,95 | 1,5-1,9   |                                       |

Термическая обработка: **закалка** и **старение**.

Основные упрочняющие фазы:

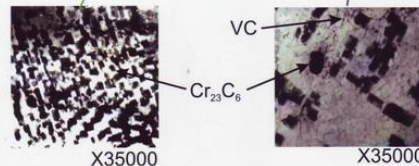
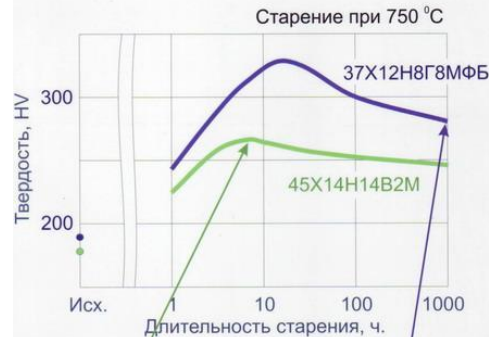
в сталях 45X14H14B2M и 31X19H9MBBT -  $Me_3C_6$ ;

в сталях 37X12H8Г8МФБ и 40X15H7Г7Ф2МС -  $Me_3C_6$  и VС

Микроструктура стали 37X12H8Г8МФБ



## Старение жаропрочных аустенитных сталей с карбидным упрочнением



## Жаростойкие стали

Под **жаростойкими** (окалиностойкими) понимают стали, устойчивые к газовой коррозии при высоких температурах.

Основные легирующие элементы, повышающие жаростойкость - **хром, кремний и алюминий**.

Хром и алюминий образуют защитные пленки из  $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO \cdot Cr_2O_3$ ,  $FeO \cdot Al_2O_3$ , а кремний - из  $2FeO \cdot SiO_2$ .

Различают две основных группы сталей:

1. Высокохромистые стали, имеющие **ферритную** структуру: **08X17T**, **15X25T**, **15X28**, **05X25Ю5** и др. Термическая обработка: **нормализация с нагревом до 760 - 800°C**.
2. Хромоникелевые стали с **аустенитной** структурой: **08X18H9T**, **20X23H18**, **20X25H20C2** и др. Термическая обработка: **закалка от 1100 - 1150°C с охлаждением в воде, масле или на воздухе**.

# Механизмы упрочнения стали и сплавов

| № | Механизм упрочнения                                                 | Формула для расчета                                                                                                  | Обозначения                                                                                                     | Параметры для расчета               |                 | Вклад в упрочнение                                |                                                                   |
|---|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|   |                                                                     |                                                                                                                      |                                                                                                                 | Fe                                  | Ti              | Fe (спл.)                                         | Ti (спл.)                                                         |
| 1 | Теоретическая прочность                                             | $\sigma_{теор} = (E \cdot S_n / a)^{1/2}$                                                                            | E - модуль Юнга<br>$S_n$ - поверхностная энергия, н/см<br>a - равновесное межатомное расстояние, см             | 20000<br>0                          | 4380<br>0       | 27000<br>0                                        |                                                                   |
| 2 | Упрочнение обусловленное силой трения решетки (П-Н) в монокристалле | $\sigma_0 = 2,5 \cdot 10^{-4} G$                                                                                     | G - модуль Сдвига, МПа                                                                                          | 84000                               | 4000<br>0       | 16,8<br>(30)                                      | 24                                                                |
| 3 | Твердорастворное упрочнение                                         | $\sigma_1 = \sum K_i \cdot C_i$                                                                                      | $K_i$ - коэфф упрочнения i-го элемента<br>$C_i$ - концентрация i-го элемента                                    | см. табл.                           |                 | (115)                                             | замещ 200<br>внедр 320                                            |
| 4 | Дислокационное упрочнение (затухает в процессе деформации)          | $\sigma_2 = \alpha \cdot M_0 \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2}$<br>$\sigma = 1/2 \pi \cdot G b^2 \rho^{1/2}$          | $\alpha$ - коэффициент<br>$M_0$ - ориентационный множитель<br>b-вектор Бюргерс<br>$\rho$ - плотность дислокаций | 0,5<br>2,75<br>0,2510 <sup>-7</sup> | 0,2<br><br>2,95 | (140)                                             | 2,3<br>( $\rho=10^8$ ) отпуск<br>73<br>( $\rho=10^{11}$ ) закалка |
| 5 | Дисперсионное упрочнение частицами                                  | $\sigma_3 = 0,84 M_0 \cdot G \cdot b / 2\pi \cdot K_d \cdot \ln(\lambda/2b)$<br>$\sigma_3 = 0,8 G \cdot b / \lambda$ | $K_d$ - коэфф., учитывающий тип дислокаций<br>$\lambda$ - расстояние между частицами                            | 1,25<br><br>9мкм                    |                 | 9,8<br>$\cdot 10^2 / \lambda \cdot \ln(2\lambda)$ | 1,6<br>( $\lambda=9\text{мкм}$ )                                  |

# Механизмы упрочнения стали и сплавов

|   |                           |                                                                                                                                 |                                                                           |                                             |         |                                                                           |
|---|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------|
| 6 | Зернограничное упрочнение | $\sigma_4 = K_y \cdot D^{-1/2}$<br>где<br>$K_y = 0,1 \cdot G \cdot b^{1/2}$<br>$K_y = (6\pi \cdot S_n \cdot G / (1-\mu))^{1/2}$ | $K_y$ - коэфф. упрочнения<br>$D$ - размер зерна<br>$\mu$ - коэфф Пуассона | $20 \text{ н/мм}^{3/2}$<br><br>50 мкм       | 195     | закалка<br>22 (D=10)<br>15 (D=20)<br>отжиг<br>10 (D=50)<br>6 (D=120)<br>) |
| 7 | Субструктурное упрочнение | $\sigma_5 = K_s \cdot d^{-m}$<br>$m = 0,5 \dots 1,0$<br>$\sigma_5 = \alpha \cdot G \cdot b \cdot (\omega/bd)^{1/2}$             | $K_s$ - коэфф. учитывающий субструктуру<br>$d$ - размер субзерна          | 0,13 н/мм<br>$m = 1$<br>$d = 1 \text{ мкм}$ | 0,148/d | 80 (d=3)<br><br>136 (d=1)                                                 |

# Контрольные вопросы по Теме 1.

1. На каком структурном уровне изучают: строение отдельного атома; дефекты кристаллического строения; размер зерна; внешний вид изделия.
2. С помощью какого метода (оборудования) исследуют: тип кристаллической решетки металла; величину межплоскостных расстояний; излом разрушенного образца; размер зерна; внешний вид изделия.
3. Что такое микродифракционная картина?
4. Какой тип кристаллической решётки (ГПУ, ГЦК, ОЦК) имеют металлы (Al Cu Au Zn Zr W V Mo и др.), применяемые в машиностроении.
5. Системы наиболее плотноупакованных плоскостей и направлений в кристаллической решетке ГПУ, ГЦК, ОЦК – типа?
6. Нарисовать объемную кристаллическую решетку ГПУ, ГЦК, ОЦК - типа.
7. Перечислить основные дефекты кристаллического строения.
8. Средняя плотность дислокаций в хорошо отожженном недеформированном металле, сильно наклепанном и среднедеформированном состоянии составляет:
9. Какой точке на диаграмме растяжения соответствует появление: первых дислокаций, остаточной деформации 0,2%, зародышевой микротрещины.
10. Перечислить основные факторы, увеличение которых приводит к возрастанию прочностных свойств сплавов.

**Спасибо  
за внимание**