

Физико-химические особенности технологических процессов в машиностроении

Проф., д.т.н. *Скотникова Маргарита Александровна*
Skotnikova@mail.ru

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

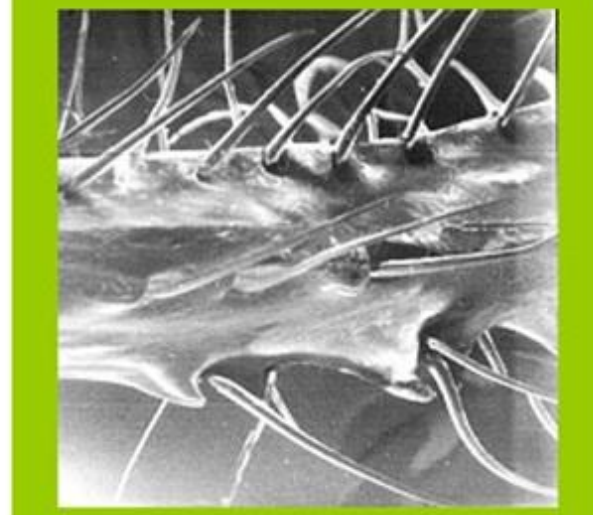
Кафедра "Машиноведение и
основы конструирования"
ИММиТ САБПУ



x 1



x 100



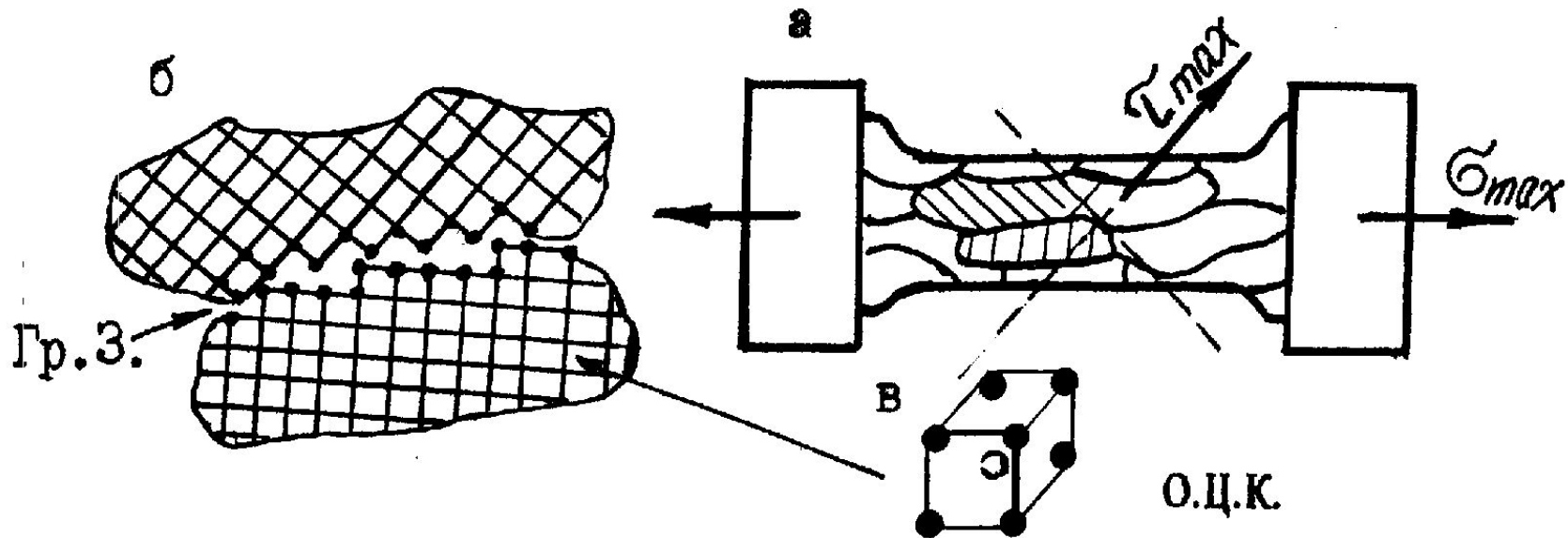
x 10000

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

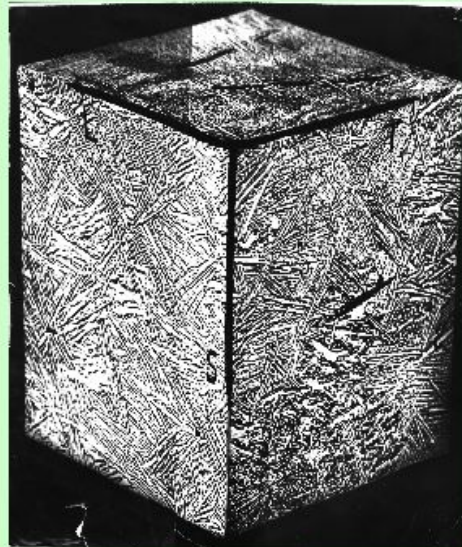
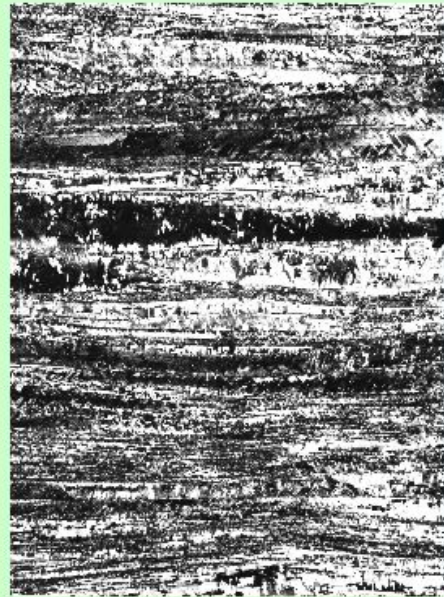
Макро – уровень



ПЭМ
РЭМ
МРСА

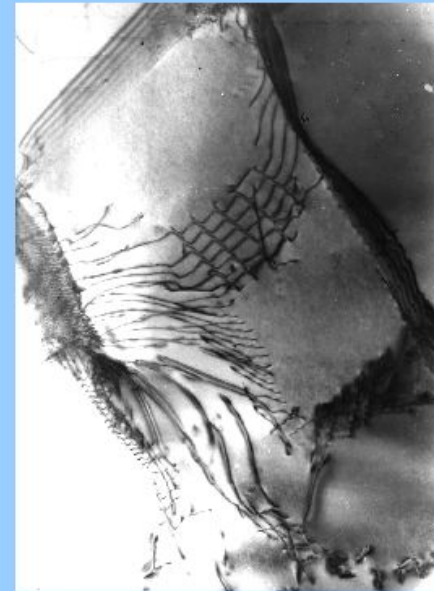
X 1

Микро – уровень



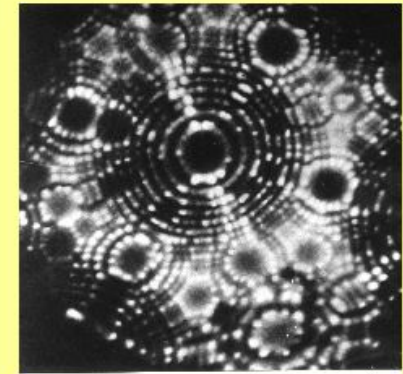
X 1000

Субмикро – уровень

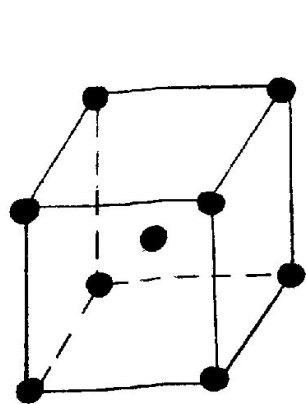


X 24000

Атомный – уровень

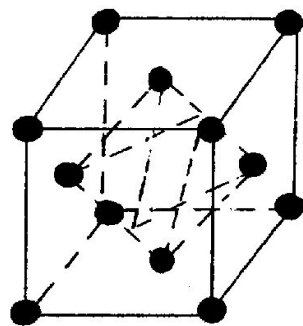


1.2. Идеальная кристаллическая структура металлов



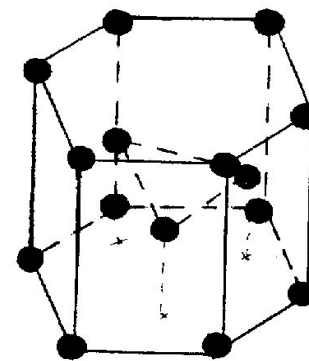
О.Ц.К.

W
V
Mo
 β -Ti
 α -Fe



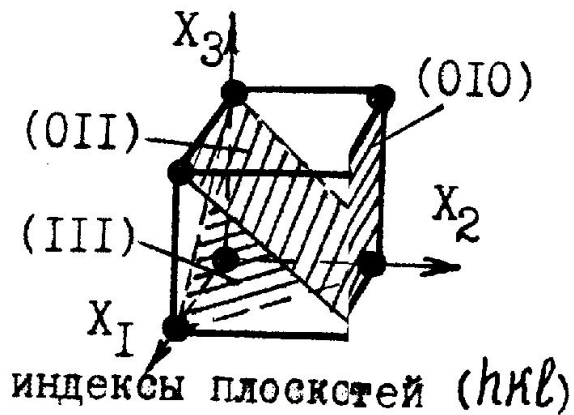
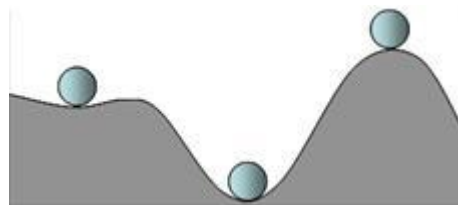
Г.Ц.К.

Al
Cu
Au
Ag
 γ -Fe

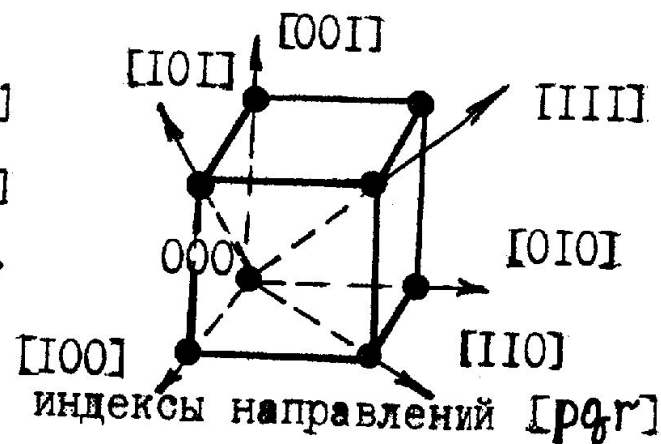


Г.П.У.

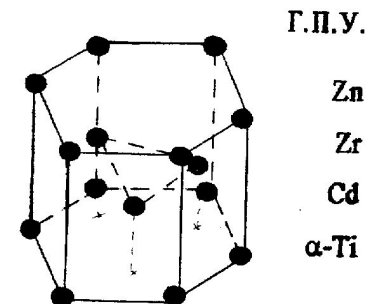
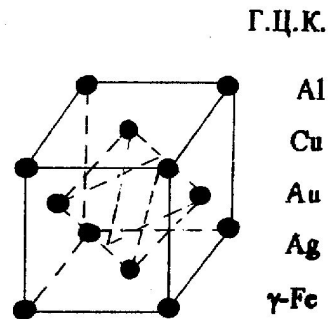
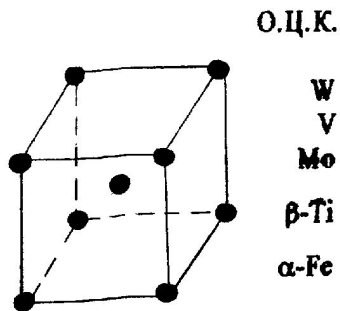
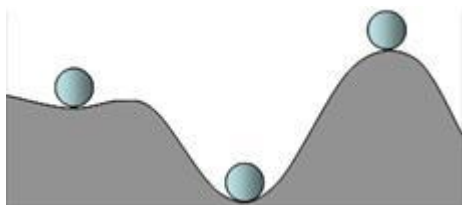
Zn
Zr
Cd
 α -Ti



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



1.2. Идеальная кристаллическая структура металлов



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



(а)



(б)

Решетка гранецентрированная кубическая (ГЦК)
Z (Al, Cu, Au, Ag, Fe)

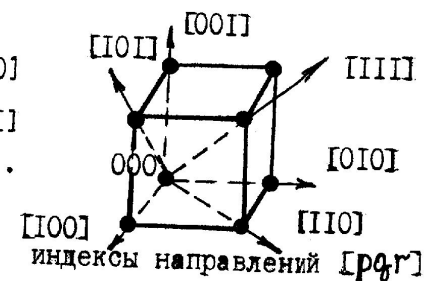
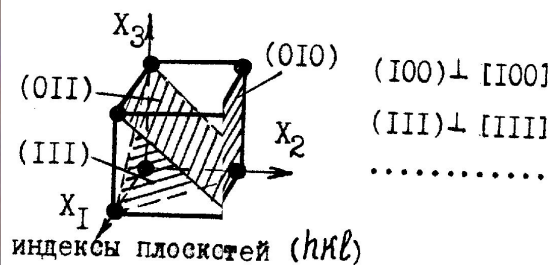
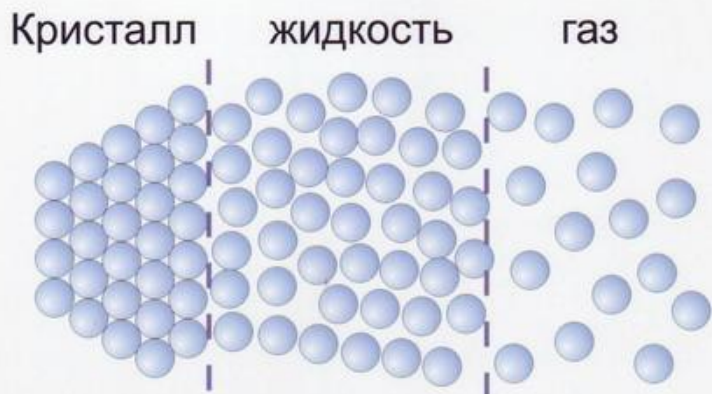
γ – наименьшее расстояние до соседних атомов.

Характеристики решетки:
Углы между осями $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Период решетки $a = b = c$
Число атомов на ячейку $n = 4$
Координационное число $Z = 12$
Кoeffициент компактности $K = 0,74$

Решетка гексагональная плотноупакованная (ГП)
(Mg, Co₂, Zn, Ti₂, Cd)

Характеристики решетки:
Углы между осями $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Период решетки $a = b \neq c, a/b = 1,633$
Число атомов на ячейку $n = 6$
Координационное число $Z = 12$
Кoeffициент компактности $K = 0,74$

Схематическая модель расположения частиц в веществе



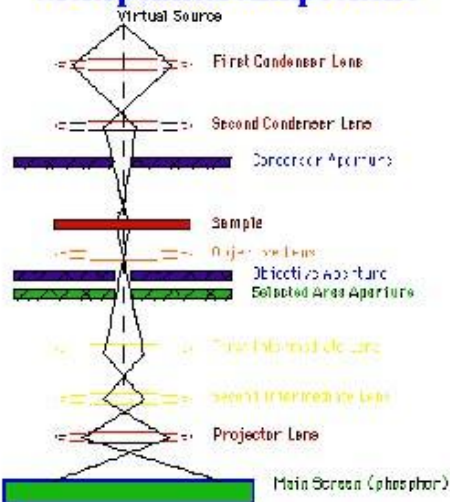
Количественные характеристики кристаллической решётки

- **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 о любого атома решетки.
- **Базис решетки (B)** – количество атомов, приходящихся на 1 элементарную ячейку решетки.
- **Коэффициент компактности (η)** – отношение объема, занимаемого атомами, ко всему объему решетки
- **Размеры пор: октаэдрические (P_6), тетраэдрические (P_4)**
- **Наиболее плотно-упакованные плоскости $\{hkl\}$.**

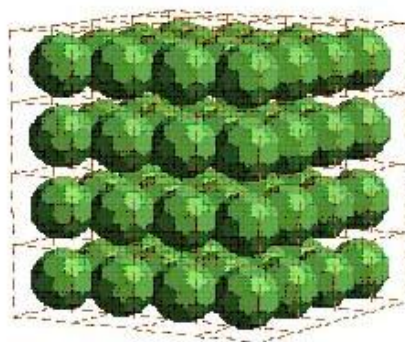
№	Обозначение a, b, c	ГЦК a, b, c	ОЦК a, b, c	ГПУ a, b, c
2	K	12	8	12
3	B	4 $1/8 \cdot 8 + 1/2 \cdot 6 = 4$	2 $1/8 \cdot 8 + 1 = 2$	6 $1/6 \cdot 12 + 1/2 \cdot 2 + 3 = 6$
4	η	74%	68%	74%
	P_6	0,41 r	0,154 r	0,41 r
5	P_4	0,225 r	0,291 r	0,225 r
6	$\{hkl\}$	$\{111\}, <110>$	$\{110\}, <111>$	$\{0001\},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

ПРАКТИЧЕСКАЯ ПРОСВЕЧИВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

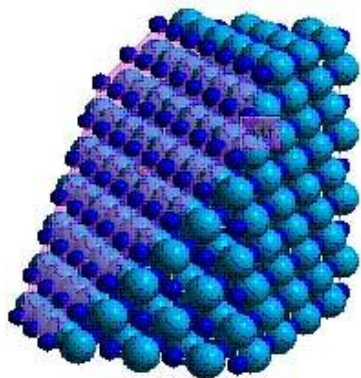
Схема хода лучей в электронном микроскопе



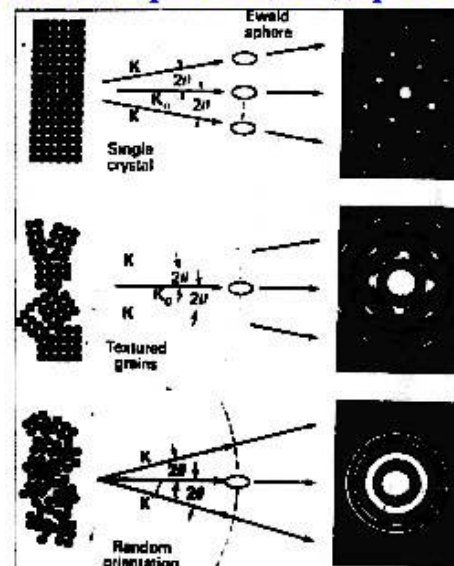
Многогранники CaIn



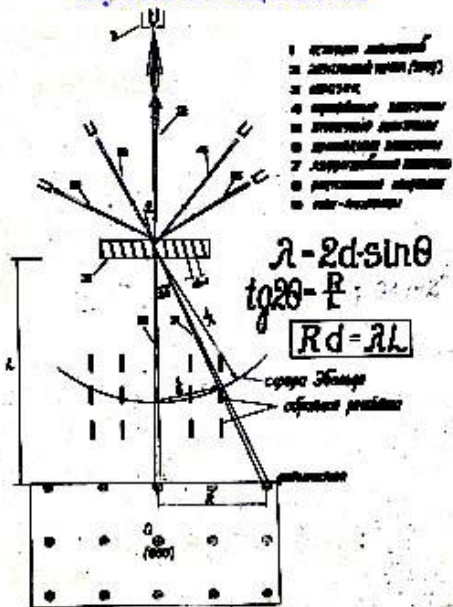
(111) плоскость в NaCl



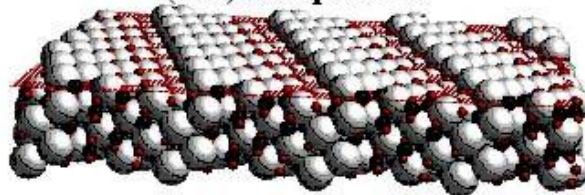
Типы электрограмм материала с различной ориентацией дефектов



Взаимодействие электронного пучка с веществом



(111) поверхность



Схемы фазовых (полиморфных) превращений

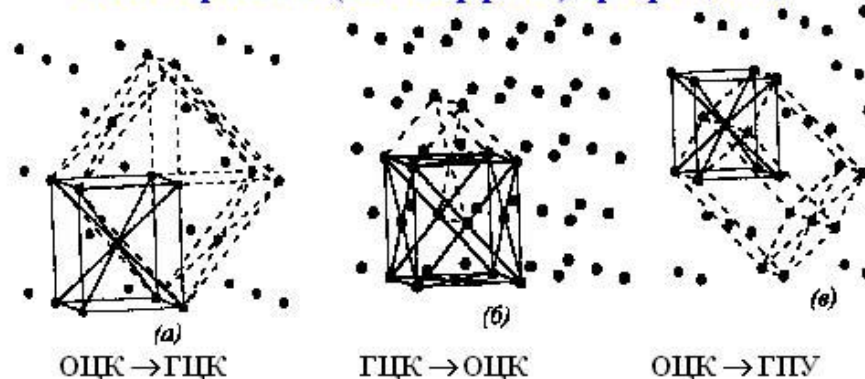
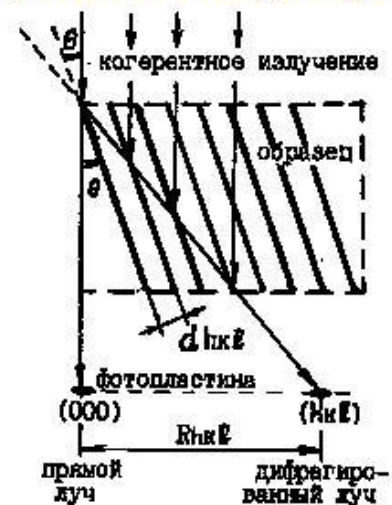
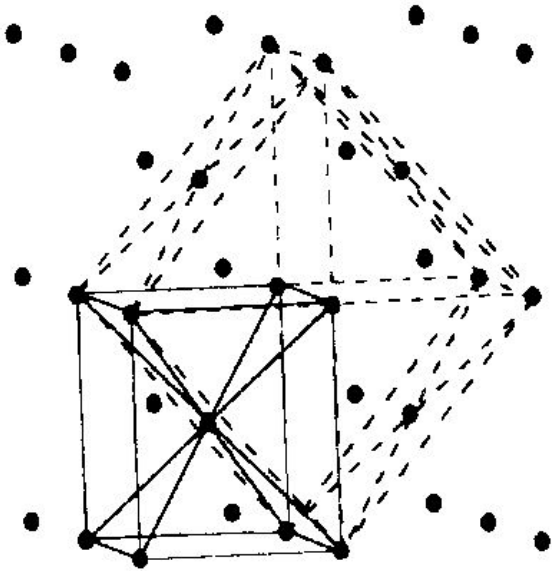


Схема формирования рефлексов на электрограмме

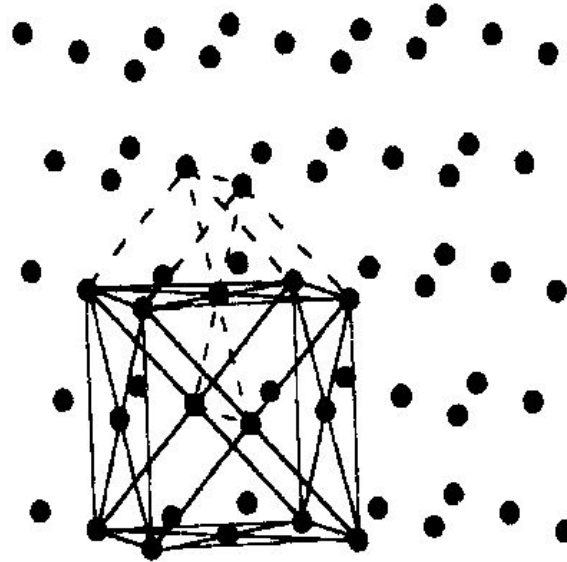


Полиморфные превращения



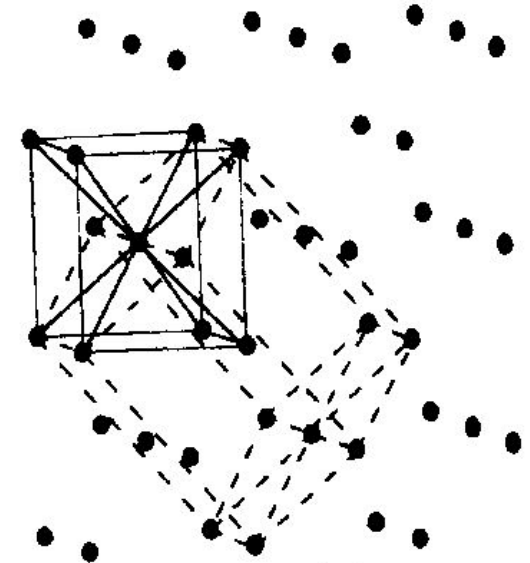
(a)

ОЦК → ГЦК



(б)

ГЦК → ОЦК



(в)

ОЦК → ГПУ

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

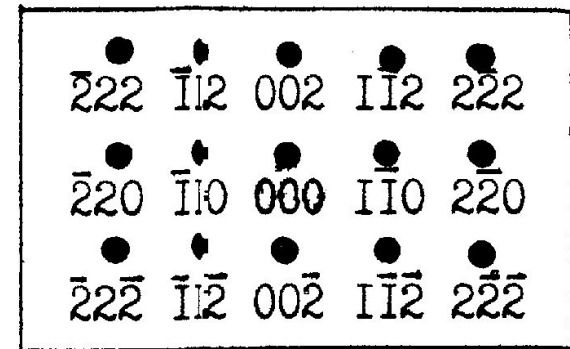
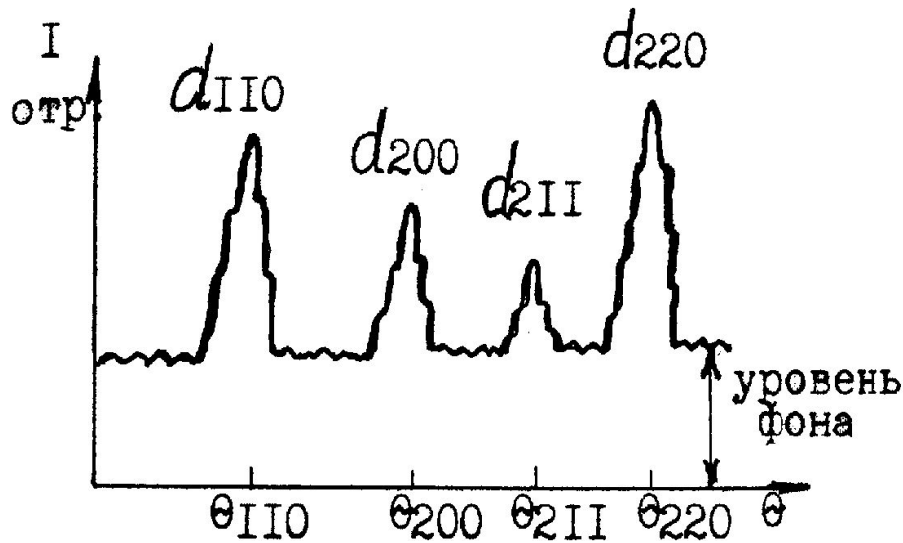
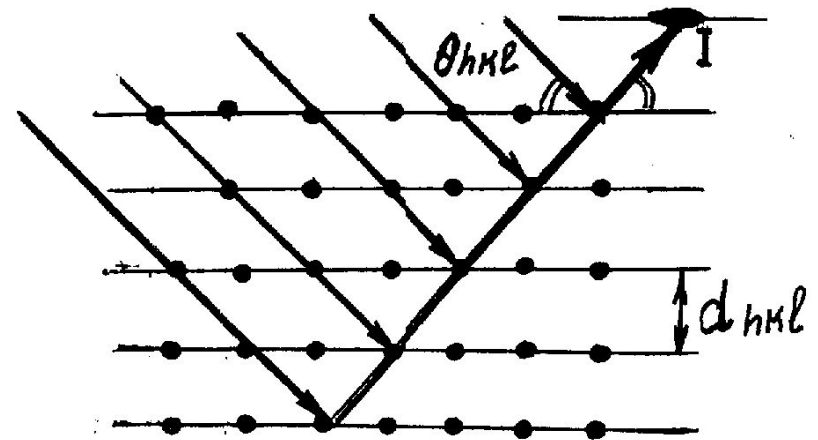
Микродифракционная картина

Когерентное
излучение с

Рефлекс (отражение)
на фотопластине
длиной волны λ

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

Рис.5.



1.3. Реальная структура металлов.

Дефекты кристаллического строения

Классификация дефектов.

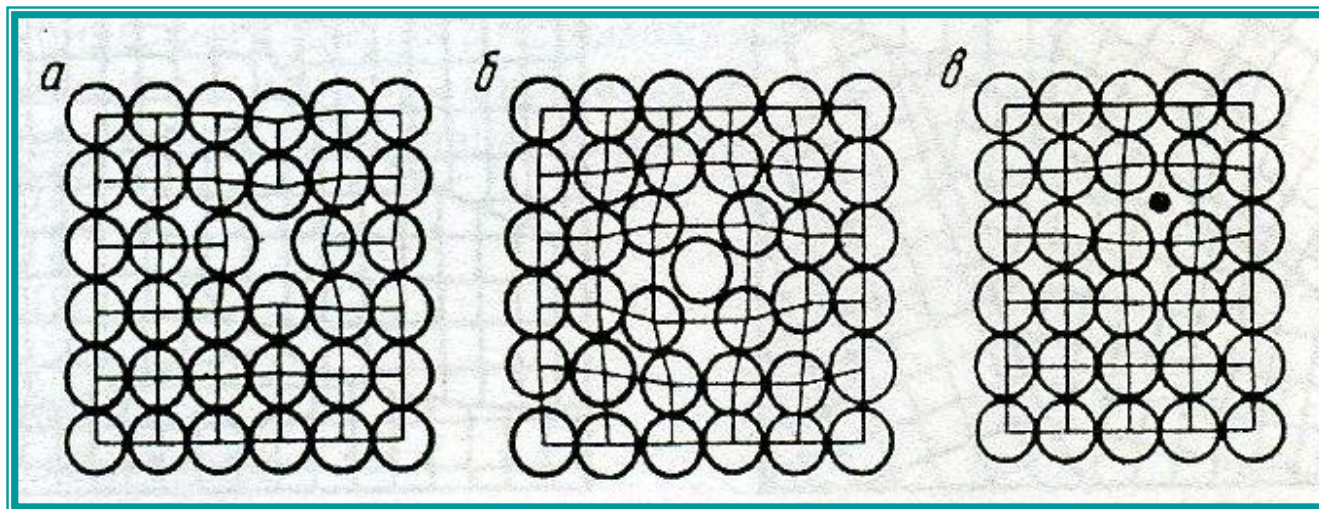
- 1. **Точечные** – вакансии, вакансионные комплексы, межузельные атомы, пары Френкеля (вакансия-межузельный атом), атомы замещения и др.
- 2. **Линейные** – дислокации (краевые, винтовые).
- 3. **Поверхностные** – границы зерен, блоков, двойников, фаз, дефекты упаковки.
- 4. **Объемные** – поры.

Точечные дефекты в кристаллической решетке:

а) вакансия

б) элемент замещения

в) элемент внедрения

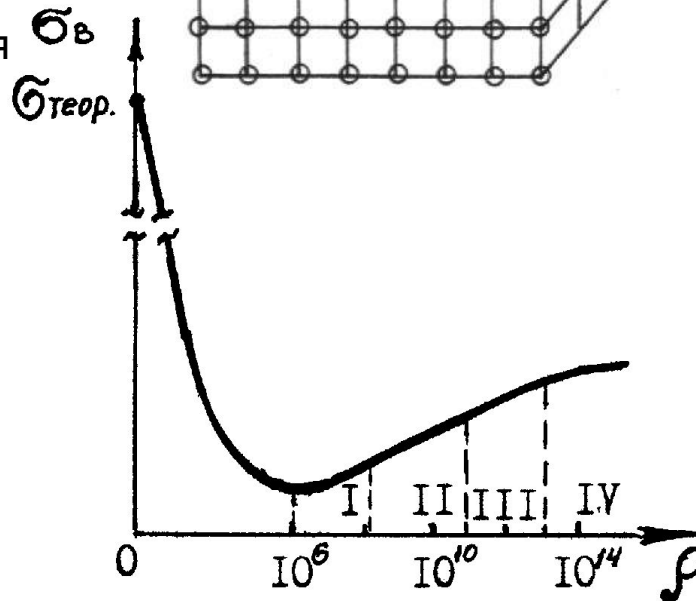
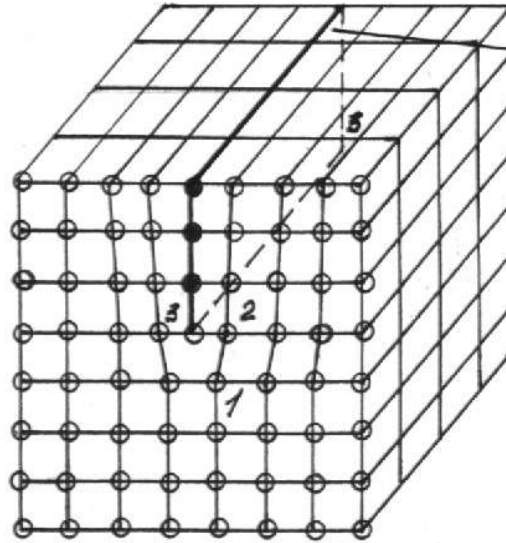


Реальная структура металлов.

Дислокации в кристалле

Классификация дефектов.

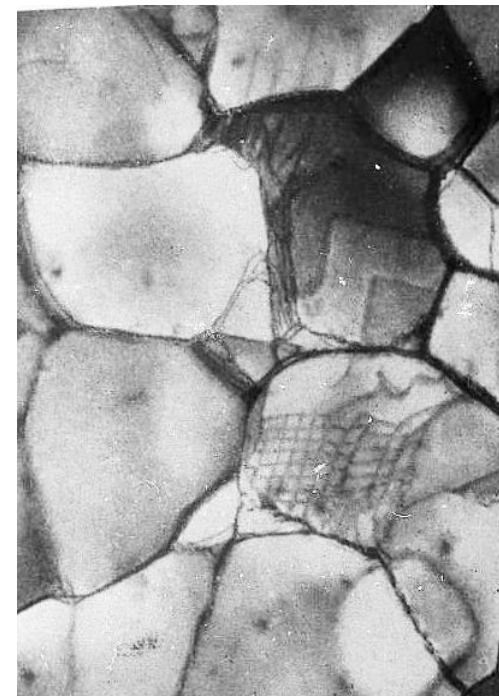
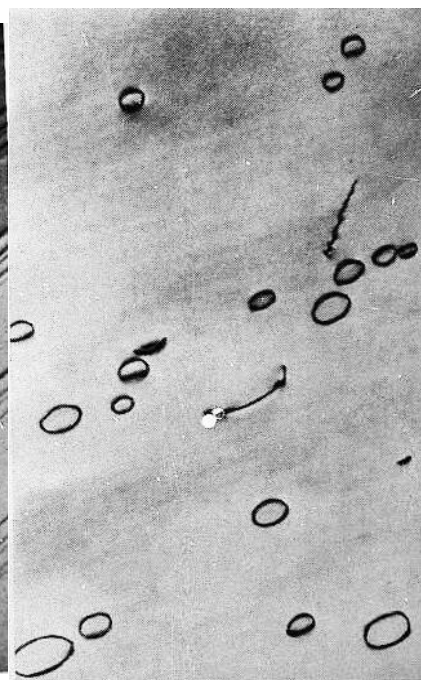
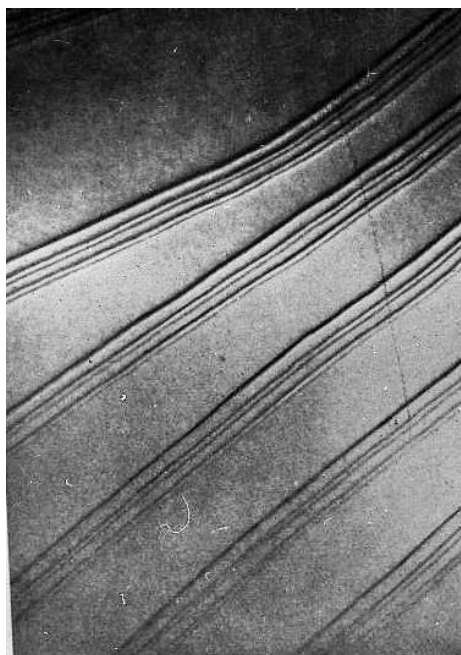
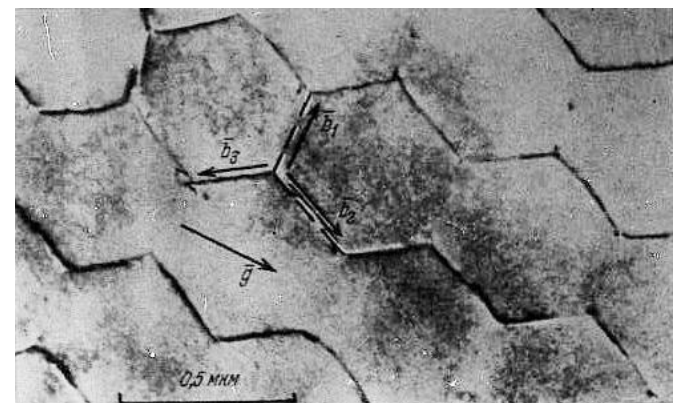
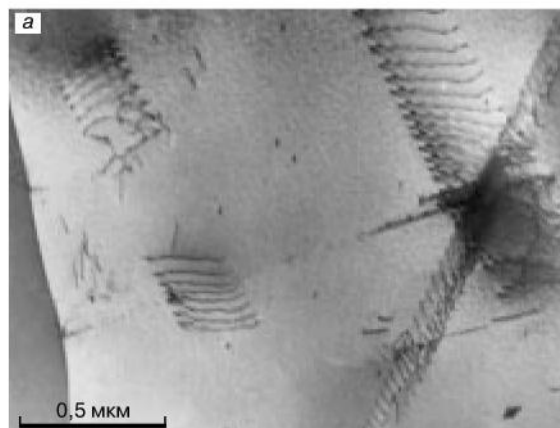
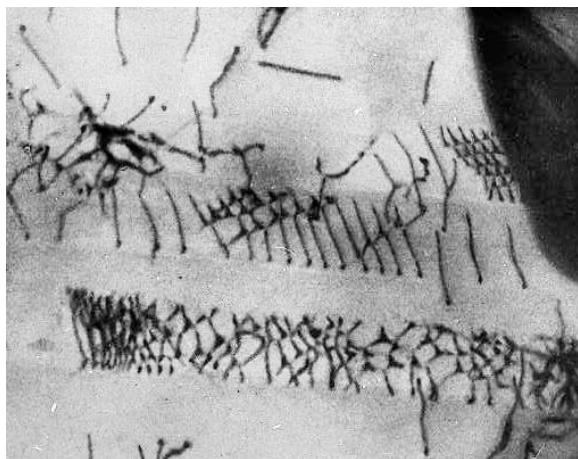
- 1. **Точечные** – вакансии, вакансионные комплексы, межузельные атомы, пары Френкеля (вакансия-межузельный атом), атомы замещения и др.
- 2. **Линейные** – дислокации (краевые, винтовые).
- 3. **Поверхностные** – границы зерен, блоков, двойников, фаз, дефекты упаковки.
- 4. **Объемные** – поры.



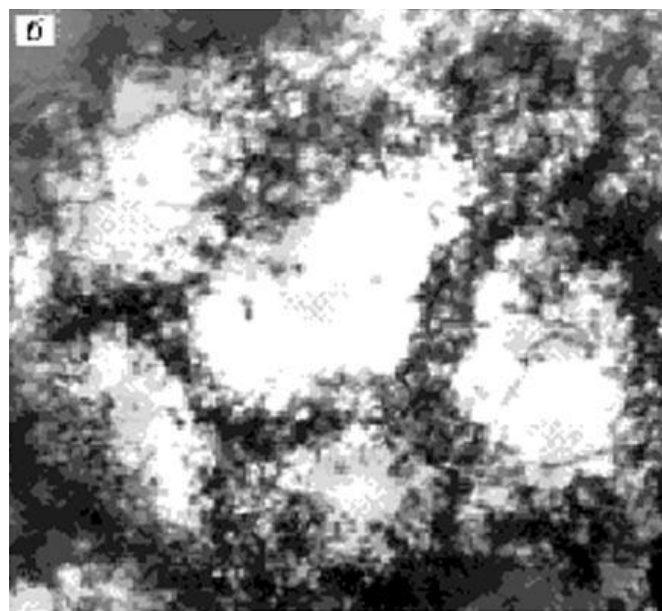
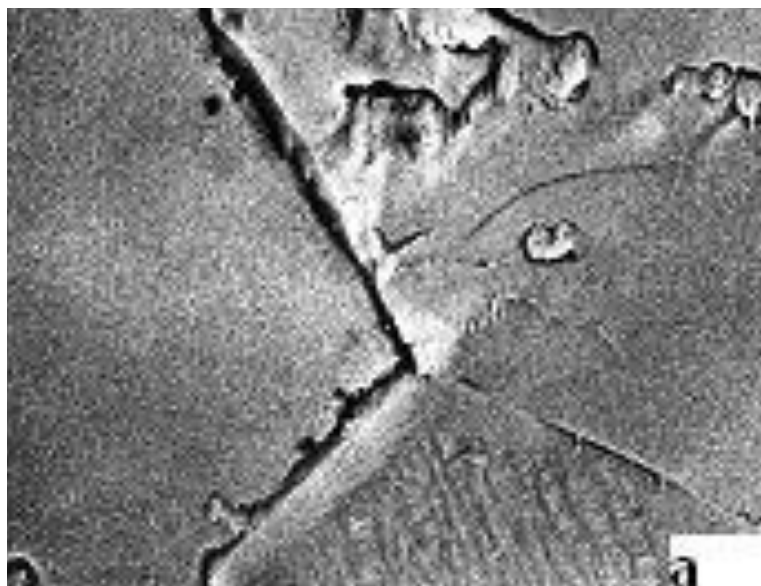
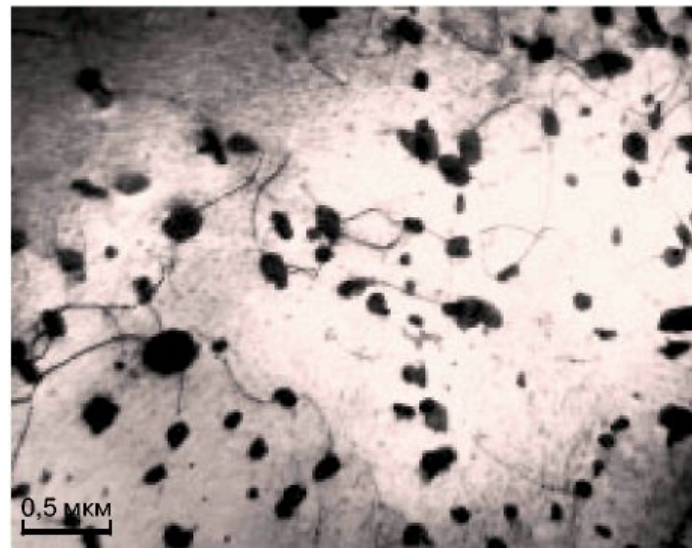
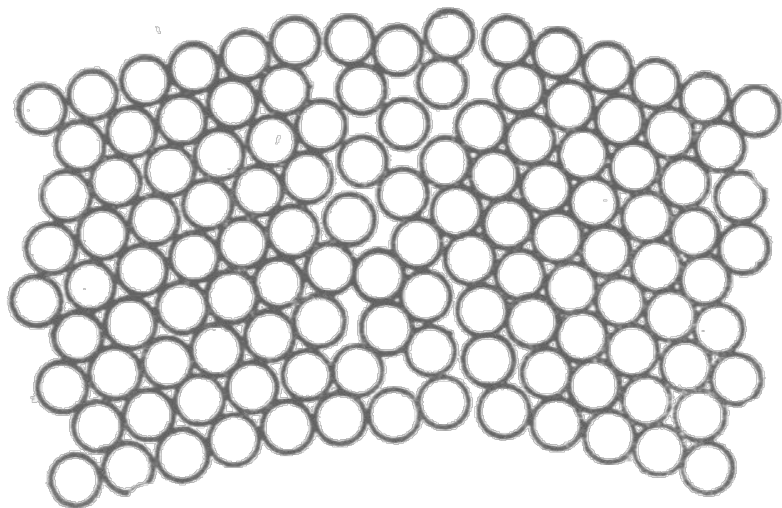
Плотность дислокаций

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

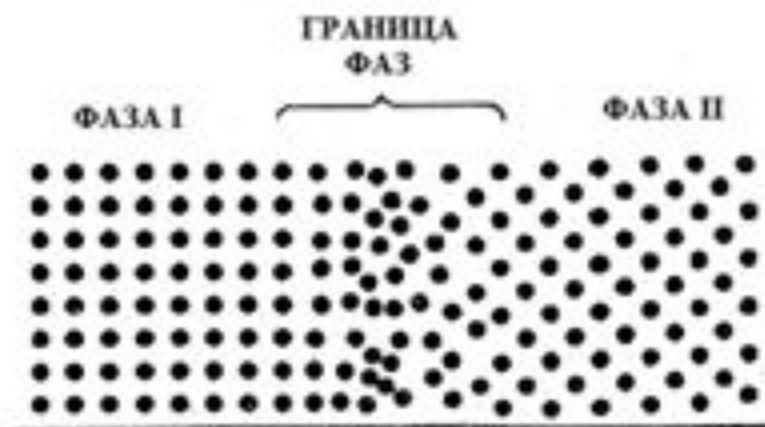
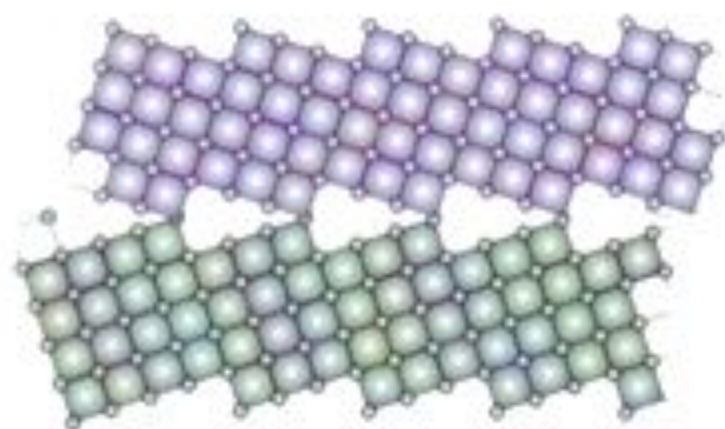
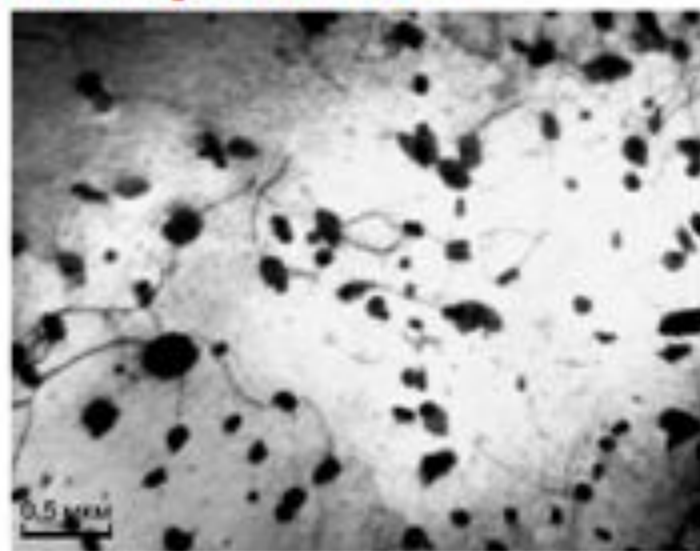
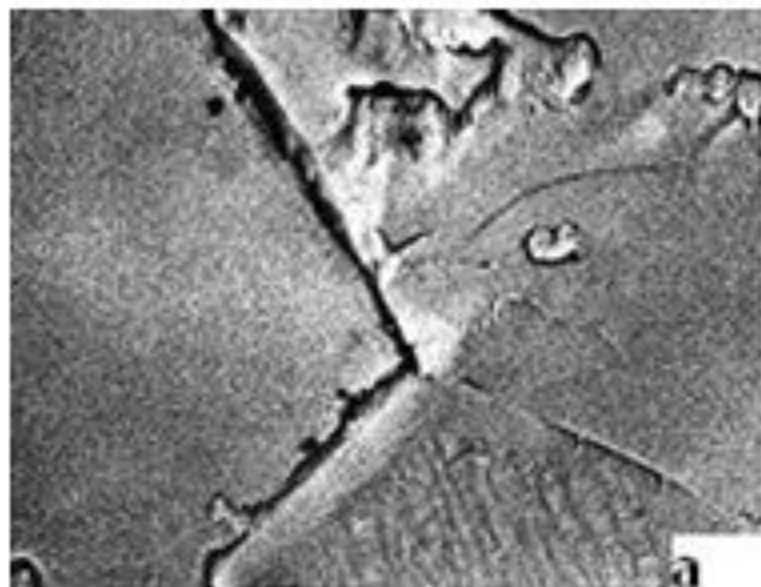
Дислокации в кристалле



Поверхностный дефект кристаллического строения



Поверхностный дефект кристаллического строения

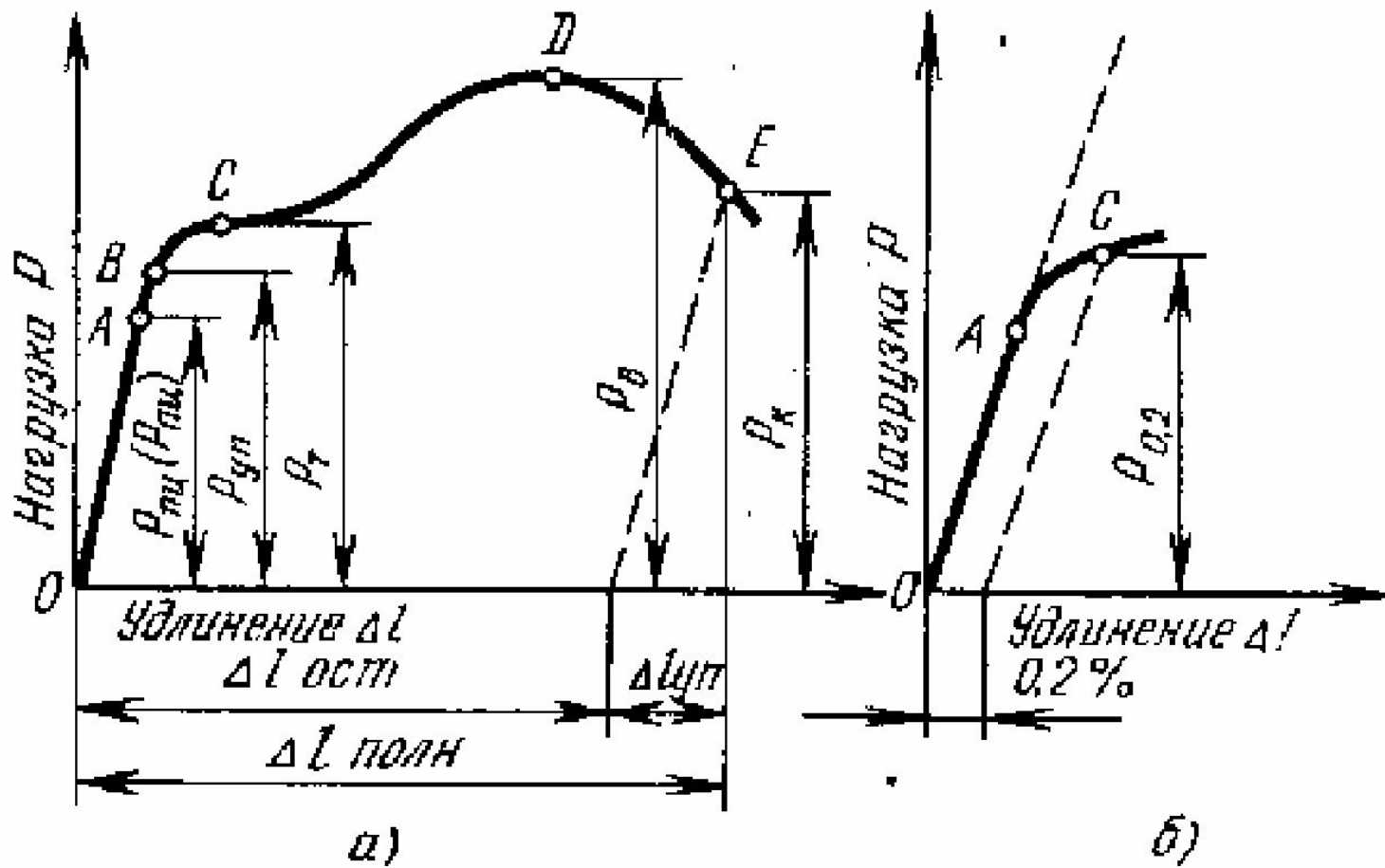


Объемный дефект кристаллического строения



- 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

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

$\sigma_{0,2}$	=	σ_0	+	σ_1	+	σ_2	+	σ_3	+	σ_4	+	σ_5
		<i>сила</i>		<i>твердо</i>		<i>дислока</i>		<i>дисперс</i>		<i>упрочне</i>		<i>упрочне</i>
		<i>трения</i>		<i>раство</i>		<i>ционное</i>		<i>сионное</i>		<i>ние</i>		<i>ние</i>
		<i>решетк</i>		<i>рное</i>		<i>упрочне</i>		<i>упрочне</i>		<i>больше</i>		<i>малоугл</i>
		<i>и</i>		<i>упрочне</i>		<i>ние</i>		<i>ние</i>		<i>угловы</i>		<i>овыми</i>
				<i>ние</i>						<i>ми</i>		<i>граница</i>
										<i>граница</i>		<i>ми</i>
										<i>ми</i>		

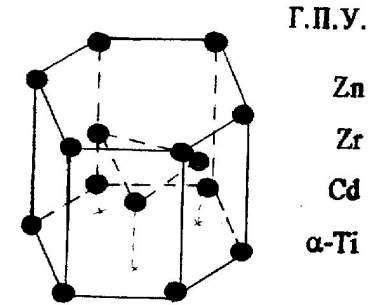
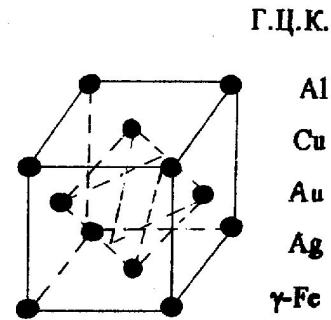
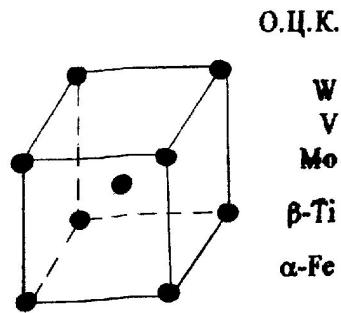
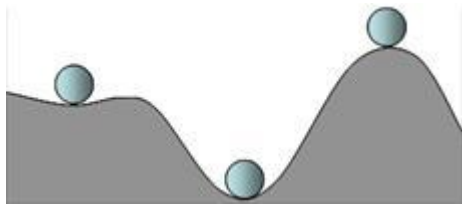
Теоретическая прочность

Пути повышения прочности металлов

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

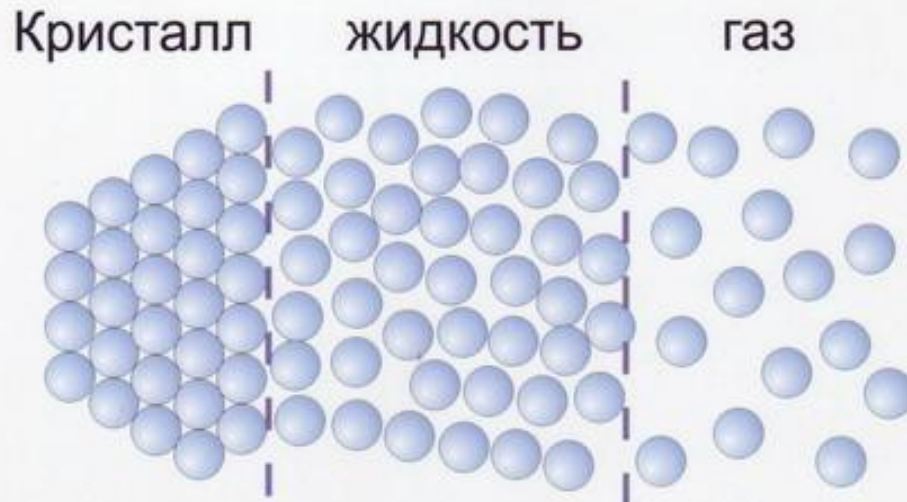


Упрочнение, обусловленное силой трения решетки в монокристалле. Напряжение Пайерлса.



Me	W	Mo	Ni	α- Fe	Cu	Au	Al
$\tau_{кр}, \text{ МПа}$	38	30,5	23	21,5	12	8,0	6,8

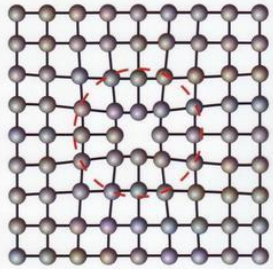
Схематическая модель расположения частиц в веществе



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

Твёрдорастворное упрочнение

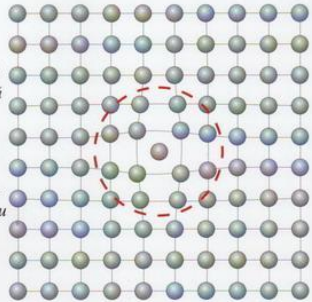
Точечные дефекты



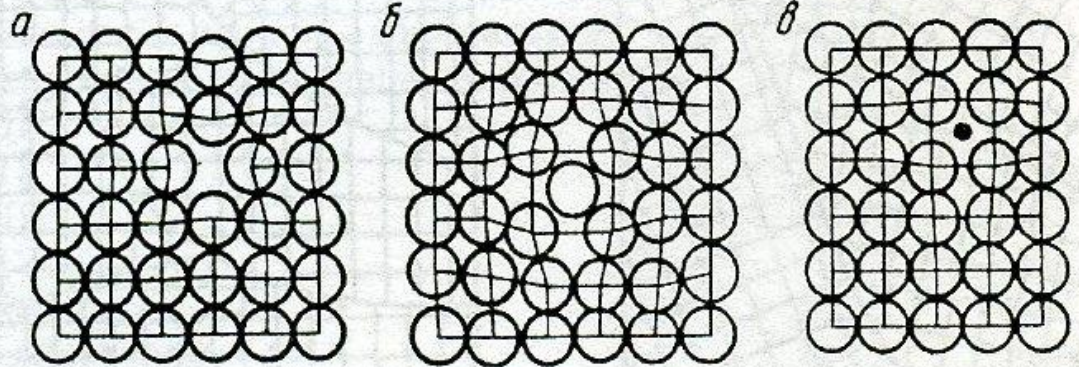
Вакансия - это узел кристаллической решетки незанятый атомом или ионом.

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

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

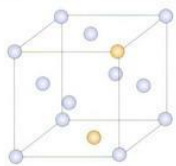


Точечные дефекты в кристаллической решетке: а) вакансия; б) элемент замещения; в) элемент внедрения



Твердые растворы замещения

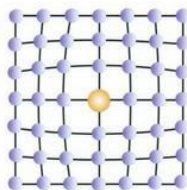
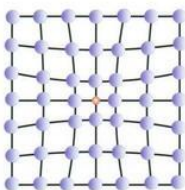
Растворы такого типа образуются путем замены атомов металла - растворителя в его кристаллической решетке атомами растворенного элемента



● - Атом растворителя

● - Атом растворенного элемента

Искажения кристаллической решетки в твердых растворах замещения

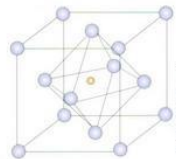


Атом растворимого элемента меньше атома растворителя

Атом растворимого элемента больше атома растворителя

Твердые растворы внедрения

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

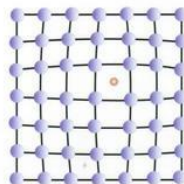


● Атом растворителя

● 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

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

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

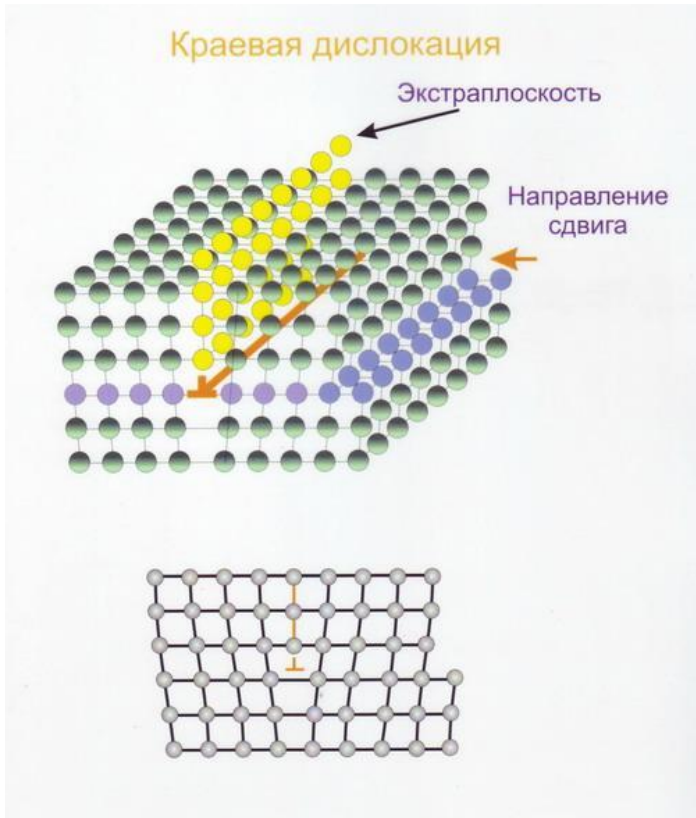
где, Δ – величина размерного несоответствия атомов металлов в твёрдом растворе,

d – диаметр атома металла,

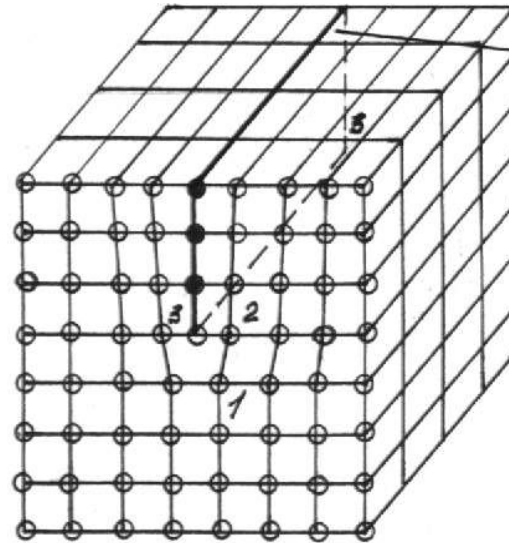
K_i – коэффициент упрочнения сплава i – ым легирующим элементом, пропорциональный величине его размерного несоответствия Δ_i ;

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

Дислокационное упрочнение



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



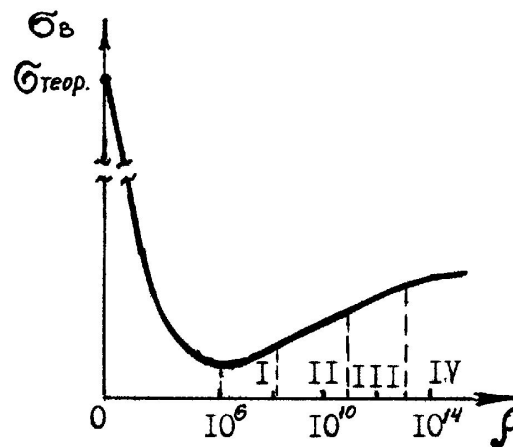
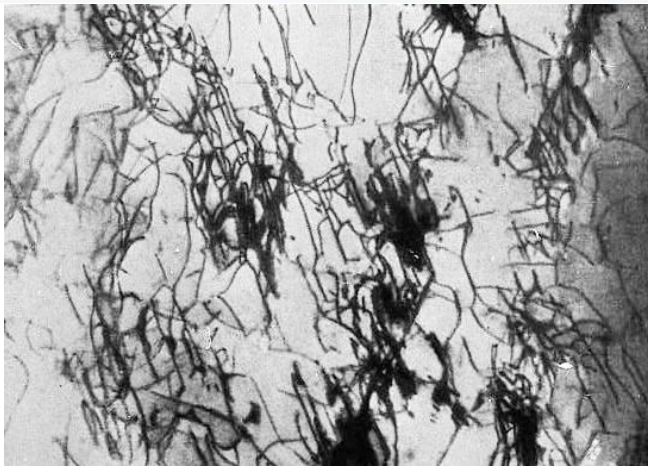
Плотность дислокаций

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

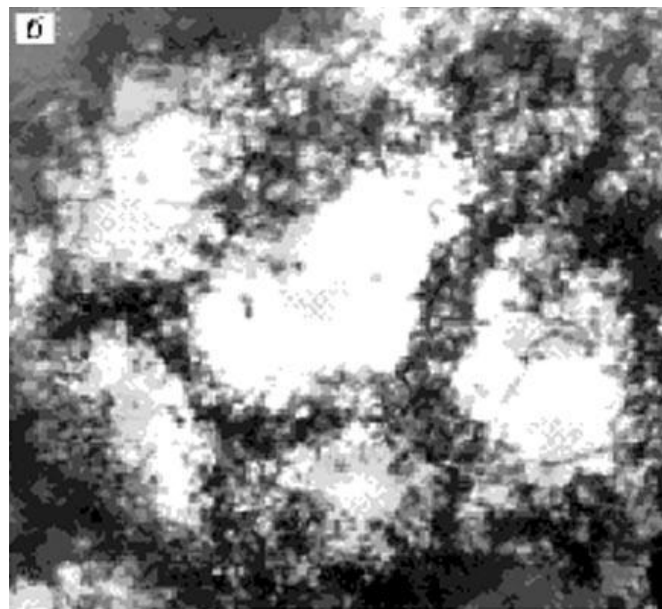
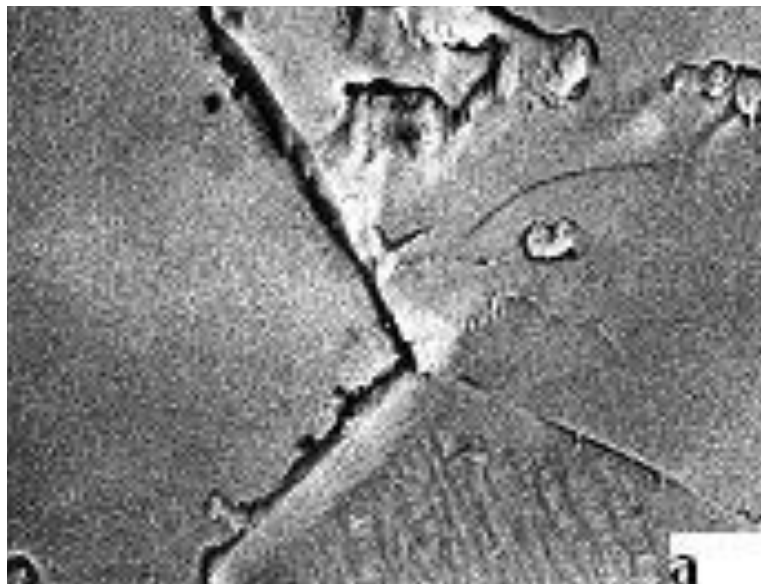
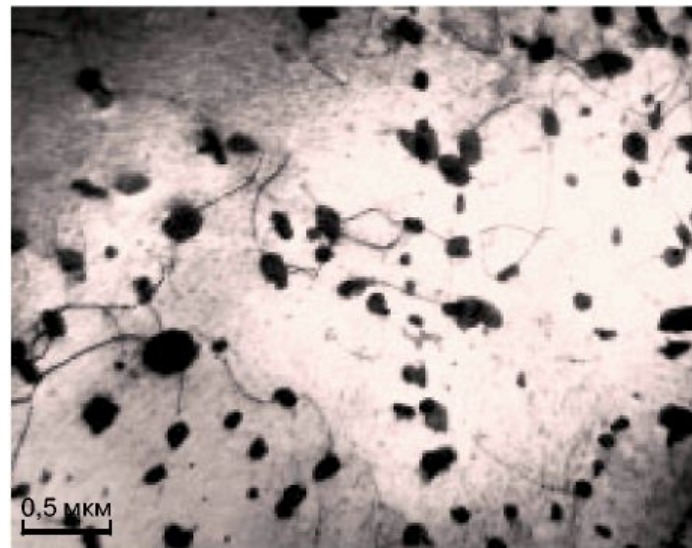
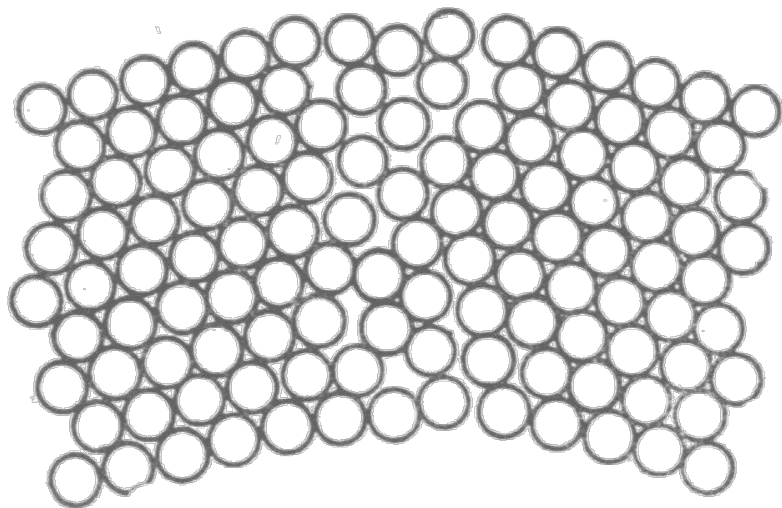
II) $\rho_{\perp} = 10^8 \text{ см}^{-2}$ - дислокационные "жгуты", клубки, сплетения, $\epsilon = 5\%$;

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

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

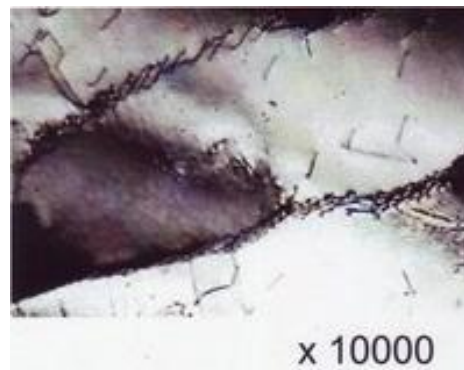
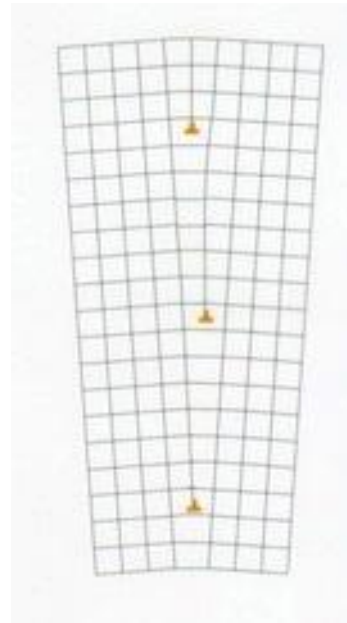
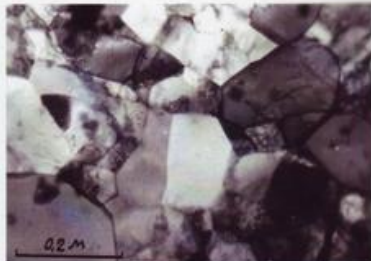
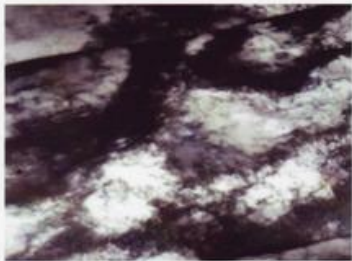
Схема полигонизации



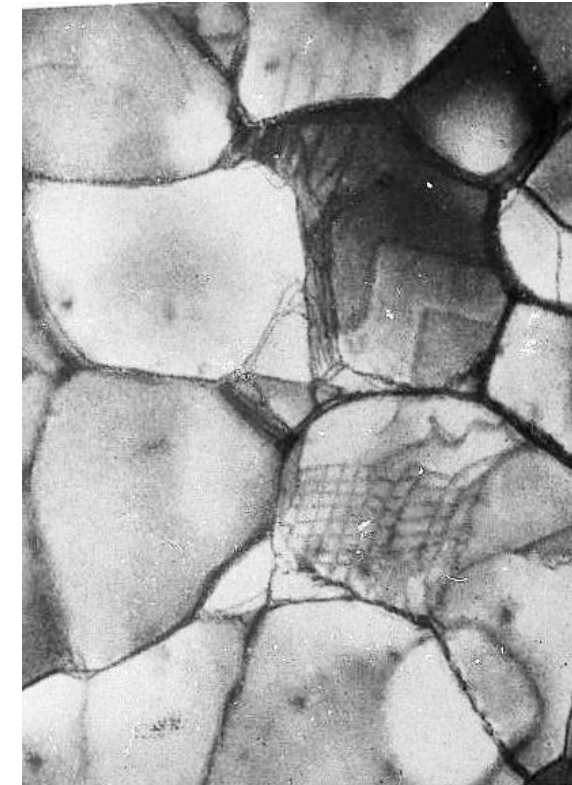
Изменение структуры при нагреве

Структура после
холодной деформации

Структура после
полигонизации

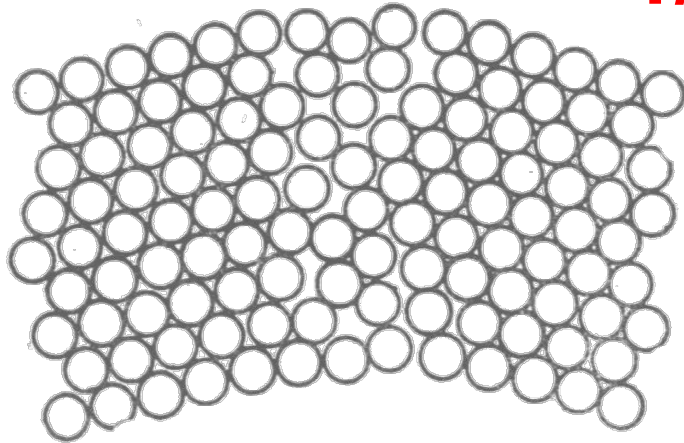


$$\sigma_5 = K_c \cdot d^{-m}$$

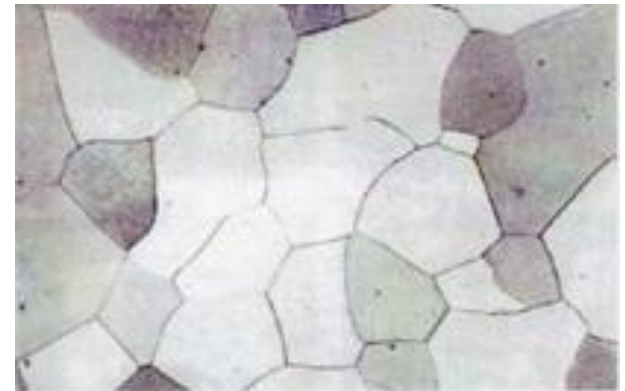
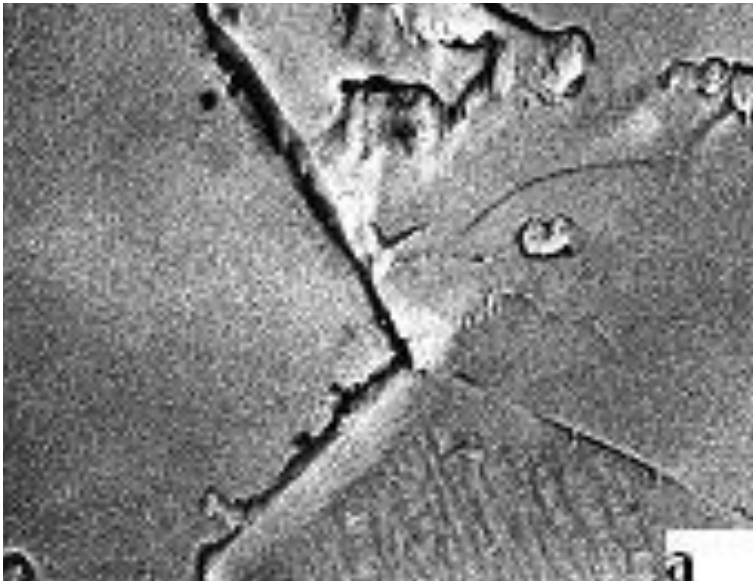


Зернограничное упрочнение

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

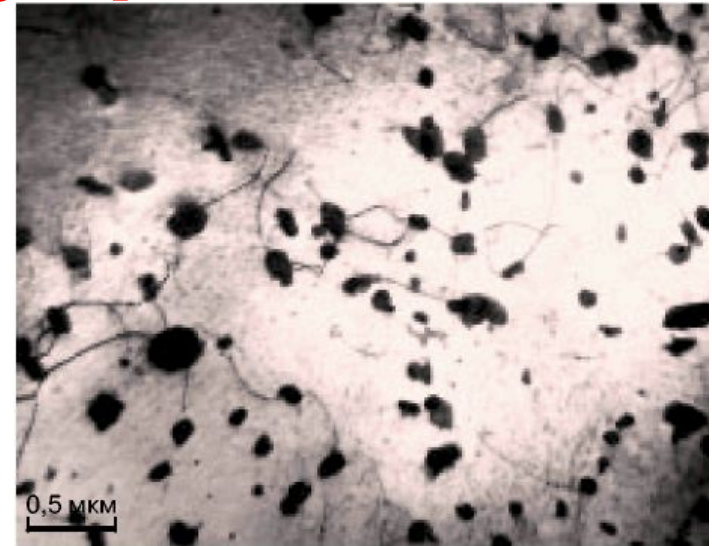
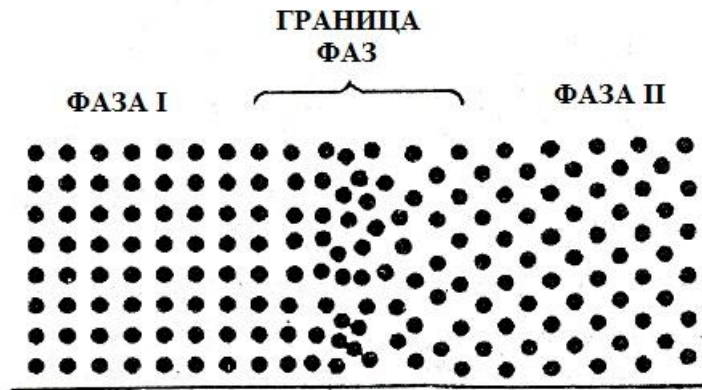


$$\sigma_3 = K_y \cdot D^{-1/2}$$



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
45X14N14B2M (ЗИ69)	0,4-0,5	13-15	13-15	-	0,25-0,4	-	W 2,0-2,7
31X19N9MBBT (ЗИ572)	0,28-0,35	18-20	8-10	-	1,0-1,5	-	W 1,0-1,5 Ti 0,2-0,5 Nb 0,2-0,5
37X12N8Г8МФБ (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 Si 0,9-1,4
40X15N7Г7Ф2МС (ЗИ388)	0,38-0,47	14-16	6-8	6-8	0,65-0,95	1,5-1,9	-

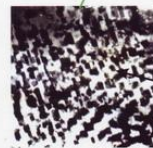
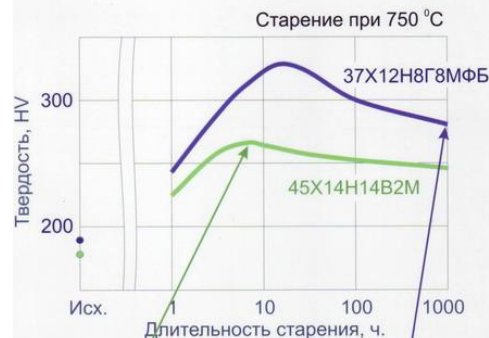
Термическая обработка: **закалка** и **старение**.
Основные упрочняющие фазы:
в сталях 45X14N14B2M и 31X19N9MBBT - Me_3C ;
в сталях 37X12N8Г8МФБ и 40X15N7Г7Ф2МС - Me_3C , и VC

Микроструктура стали 37X12N8Г8МФБ

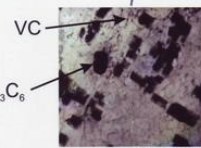


X300

Старение жаропрочных аустенитных сталей с карбидным упрочнением



X35000



X35000

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: **08X18N9T**, **20X23N18**, **20X25N20C2** 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 (сгл.)	Ti (сгл.)
1	Теоретическая прочность	$\sigma_{теор} = (E \cdot S_n / a)^{1/2}$	E - модуль Юнга S_n - поверхностная энергия, н/см a - равновесное межатомное расстояние, см	20000 0	4380 0	27000 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 0	16,8 (30)	24
3	Твердорастворное упрочнение	$\sigma_1 = \sum K_i \cdot C_i$	K_i - коэфф упрочнения i-го элемента C_i - концентрация i-го элемента	см. табл.		(115)	замещ 200 внедр 320
4	Дислокационное упрочнение (затухает в процессе деформации)	$\sigma_2 = \alpha \cdot M_0 \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2}$ $\sigma = 1/2 \pi \cdot G b^2 \rho^{1/2}$	α - коэффициент ориентационный множитель b-вектор Бюргерс ρ - плотность дислокаций	0,5 2,75 0,2510 ⁻⁷	0,2 2,95	(140)	2,3 ($\rho=10^8$) отпуск 73 ($\rho=10^{11}$) закалка
5	Дисперсионное упрочнение частицами	$\sigma_3 = 0,84 M_0 \cdot G \cdot b / 2\pi \cdot K_d \cdot \ln(\lambda/2b)$ $\sigma_3 = 0,8 G \cdot b / \lambda$	K_d - коэфф., учитывающий тип дислокаций λ - расстояние между частицами	1,25 9мкм		9,8 $\cdot 10^2 / \lambda$ $\cdot \ln(2\lambda)$	1,6 ($\lambda=9\text{мкм}$)

Механизмы упрочнения стали и сплавов

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