



Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Фізичний факультет



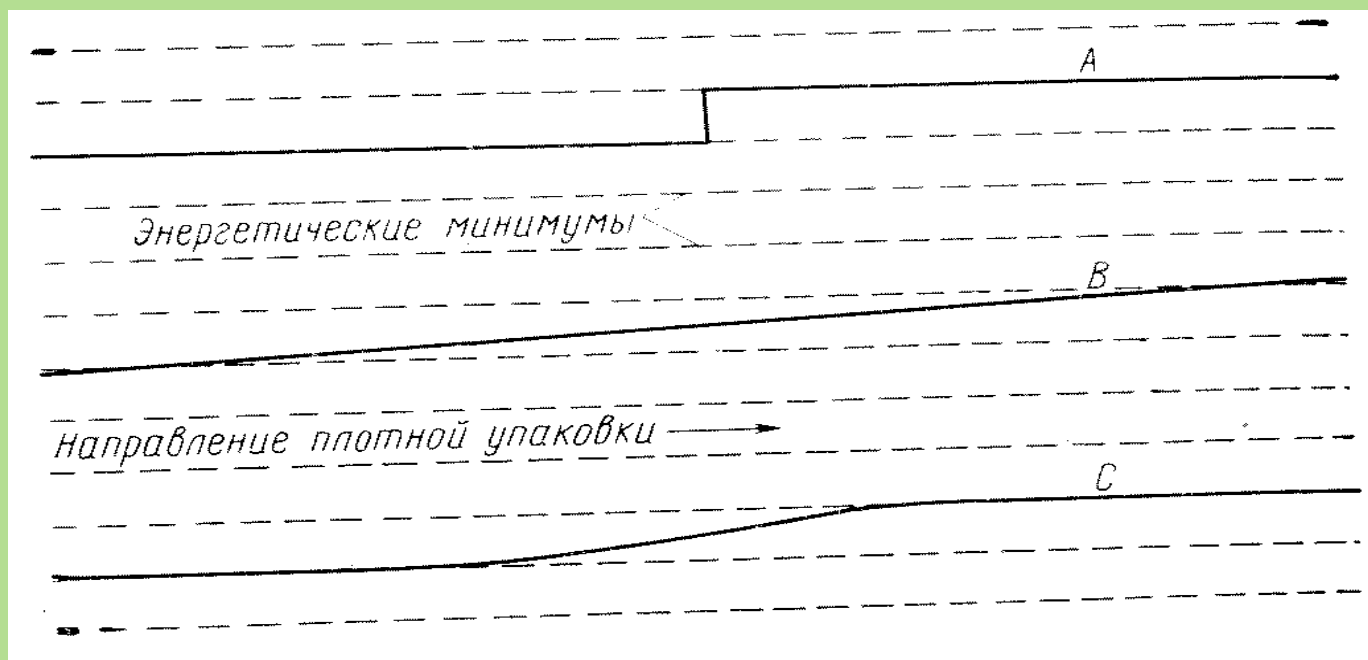
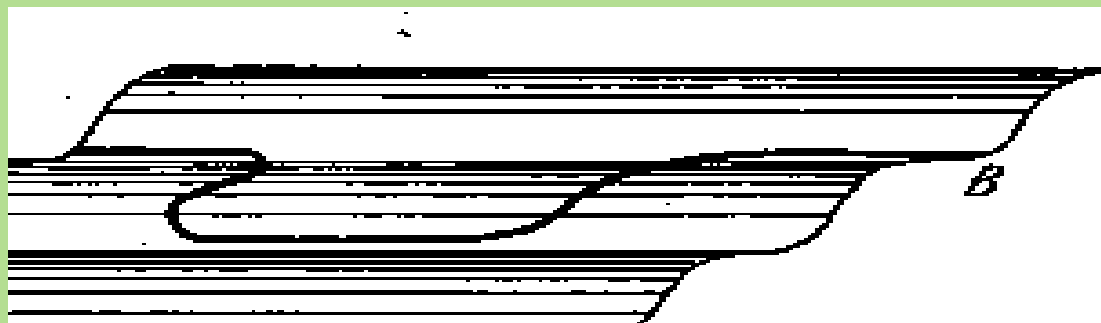
Кафедра фізики кристаллов

Упрочнение монокристаллов

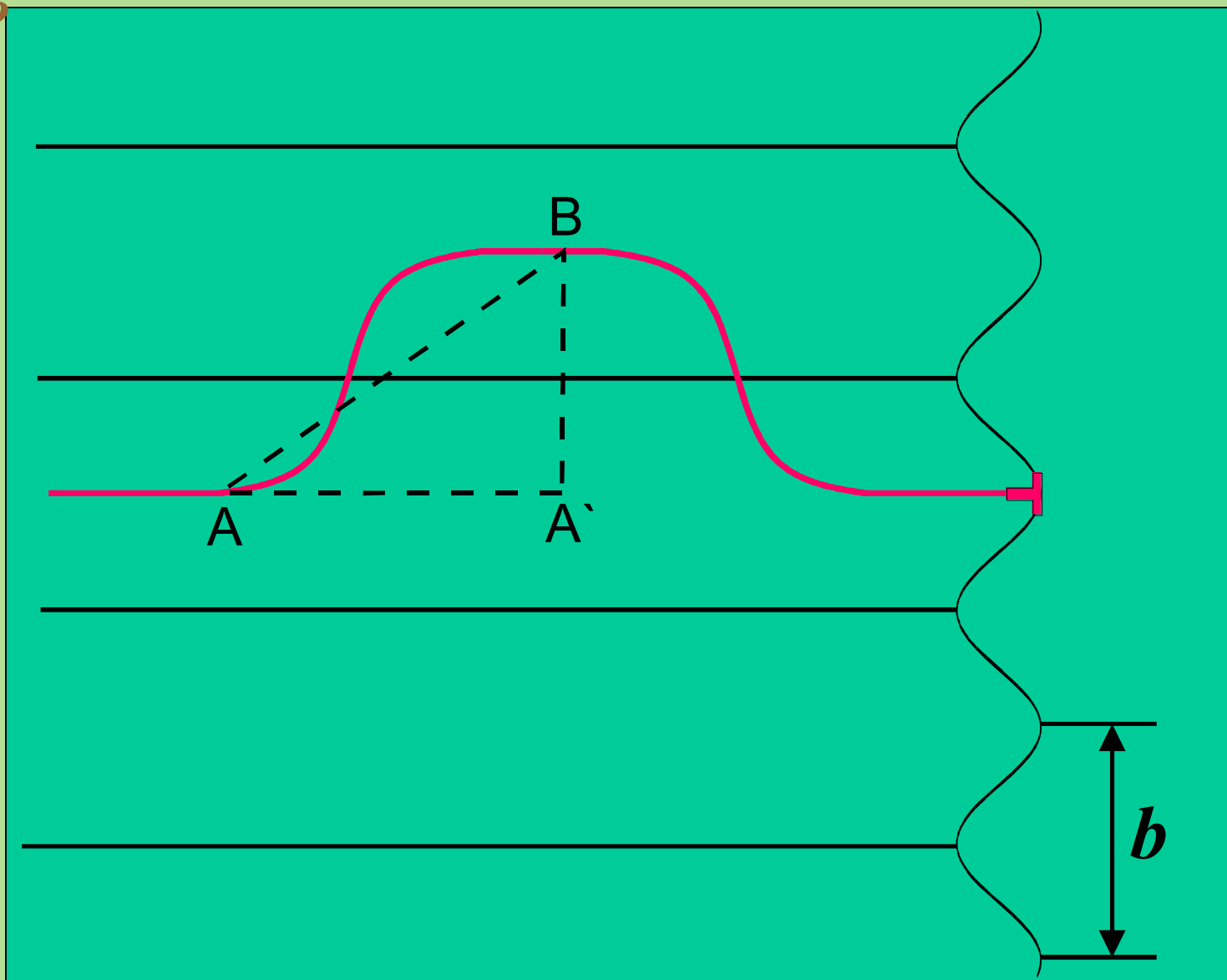
Лекция

1. Энергия образования двойного перегиба
2. Стадии упрочнения
3. Механизмы упрочнения
4. Теории деформационного упрочнения монокристаллов

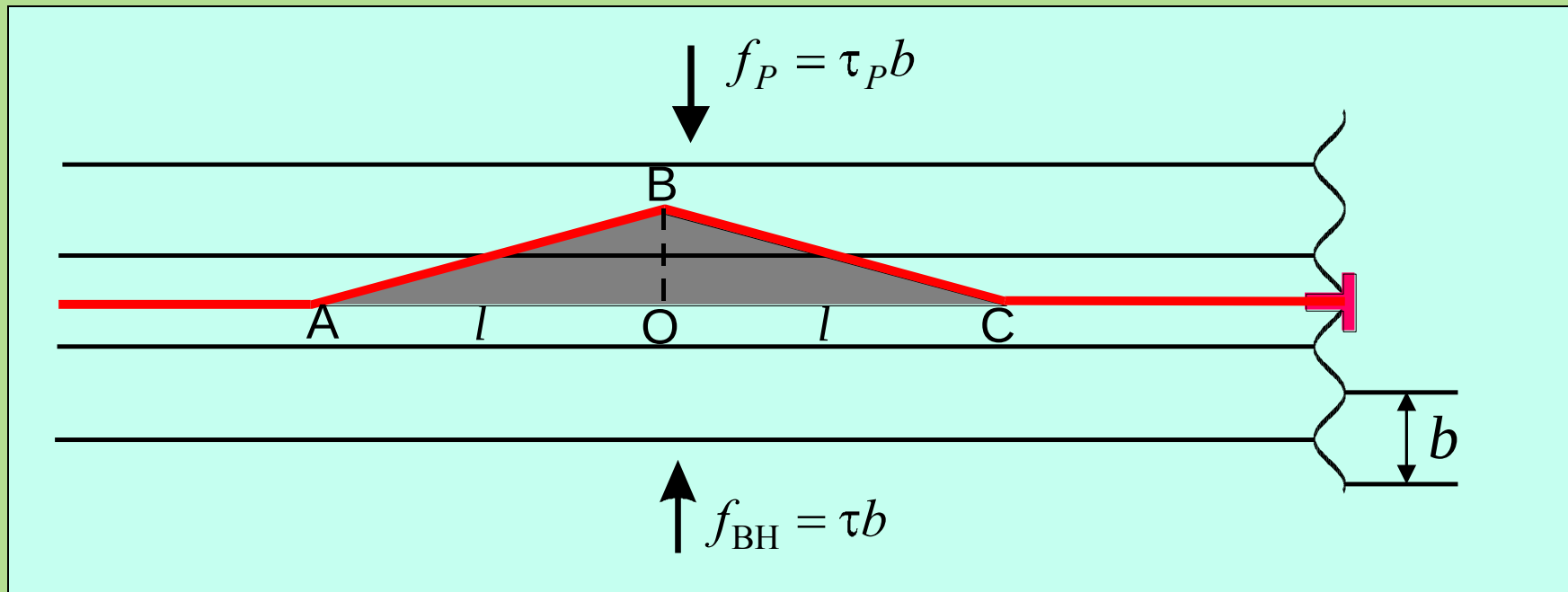
Энергия образования двойного перегиба



Чем определяется форма перегиба дислокационной линии?



Оценим энергию образования двойного перегиба (W)



$f_{BH} = \tau b$ -сила на
единицу
длины
дислокации

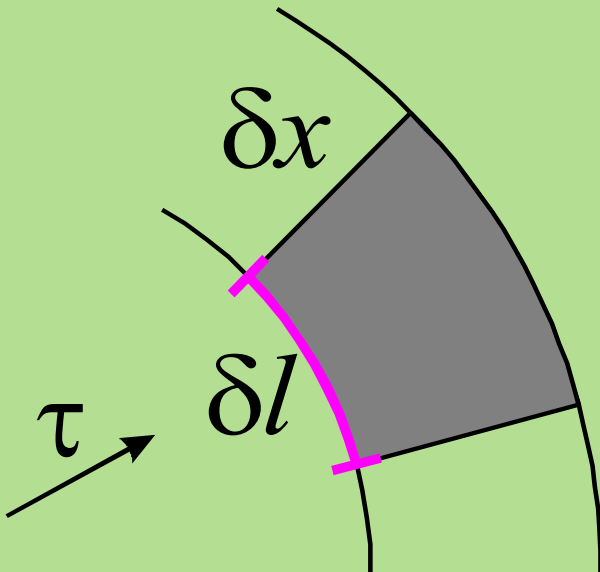
τ - внешнее сдвиговое
напряжение

$f_P = \tau_p b$ -сила Пайерлса

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2$$

ΔW_1 Энергия (или работа), которая затрачивается на перемещение дислокации

ΔW_2 Энергия (или работа), которая затрачивается на увеличение длины дислокации



$$A = f \cdot \delta l \cdot \delta x = f \delta S$$

$$\Delta W_1 = (f_P - f_{BH})bS = (\tau_P - \tau)b^2l$$

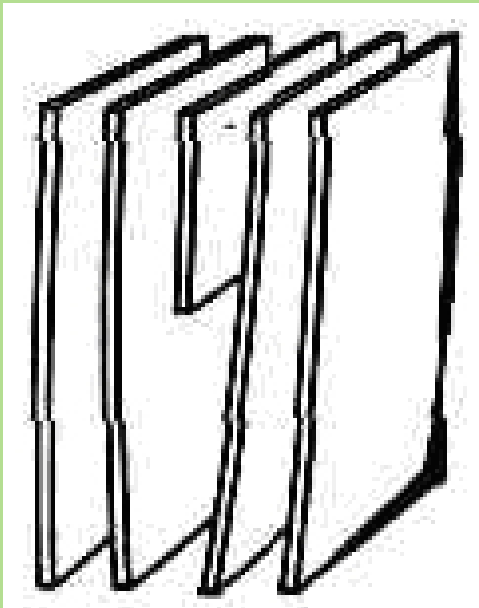
$$\Delta W_1 = (\tau_P - \tau)b^2l$$

$$\Delta W_2 = Gb^2 \Delta l \approx E_0 \delta l \quad , \text{ где } E_0 = Gb^2$$

Энергия
единицы длины
дислокации

$$\Delta l = AB + BC - AC$$

$$\Delta l = 2(AB - AO) = 2 \left[\left(l^2 + b^2 \right)^{\frac{1}{2}} - l \right] = 2l \left[\left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]$$



$$l \gg b$$

$$\Delta l \approx 2l \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b}{l} \right)^2 - 1 \right] \approx \frac{b^2}{l}$$

$$\Delta W_2 \approx E_0 \frac{b^2}{l}$$

Вывод:

для образования двойного перегиба
нужно затратить энергию:

$$\Delta W \approx (\tau_P - \tau)b^2l + E_0 \frac{b^2}{l} \approx E_0 b^2 \left[\frac{(\tau_P - \tau)l}{E_0} + \frac{1}{l} \right]$$

Как эта энергия зависит от длины перегиба?

Найдем экстремум.

$$\frac{d\Delta W}{dl} = 0$$

$$\frac{d\Delta W}{dl} = E_0 b^2 \left(\frac{\tau_P - \tau}{E_0} - \frac{1}{l^2} \right) = 0$$

$$l^2 = \frac{E_0}{\tau_P - \tau}$$

$$l^* = \sqrt{\frac{E_0}{\tau_P - \tau}}$$

$$\tau < \tau_P$$

l^* Это длина перегиба, которая соответствует min энергии,
равновесная длина перегиба

Т. к.

$$\frac{d^2 \Delta W}{dl^2} = E_0 b^2 \frac{2}{l^3} > 0$$

Найдем значение min энергии.

$W^* - ?$

$$W^*(l = l^*) = E_0 b^2 \left[\left(\frac{\tau_P - \tau}{E_0} \right) \left(\frac{E_0}{\tau_P - \tau} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\tau_P - \tau}{E_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$W^* = 2E_0 b^2 \left(\frac{\tau_P - \tau}{E_0} \right)^{\frac{1}{2}} = 2b^2 [E_0 (\tau_P - \tau)]^{\frac{1}{2}}$$

$$W^* = 2b^2 [E_0 (\tau_P - \tau)]^{\frac{1}{2}}$$

Вывод:

1. С ростом уровня внешних напряжений τ равновесная длина перегиба l^* увеличивается;

$$l^* = \sqrt{\frac{E_0}{\tau_P - \tau}} \quad \tau < \tau_P$$

2. W^* уменьшается.

$$W^* = 2b^2 \left[E_0 (\tau_P - \tau) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Оценим l^* и W^* при $\tau = 0$

l^* Минимальная длина

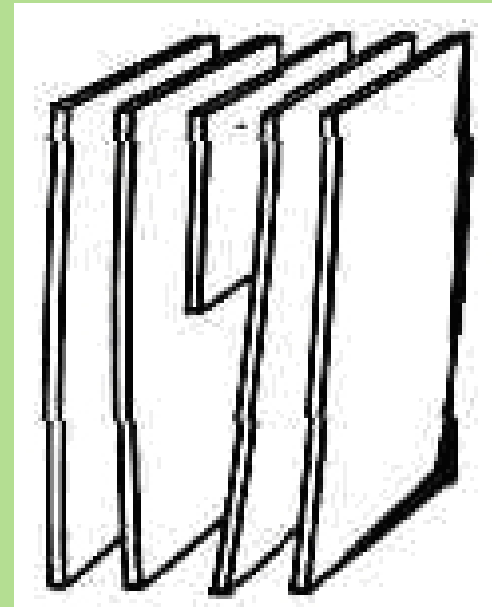
W^* Максимальная энергия

Зачем нужны эти оценки? $E_0 \approx Gb^2$, $\tau_P \sim 10^{-4} \div 10^{-6} G$,

$$l^*(\tau = 0) = \left(\frac{E_0}{\tau_P} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$b \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}, \quad G = 10^{10} \div 10^{12} \frac{\text{ДН}}{\text{см}^2}$$

$$l^*(\tau = 0) = \left(\frac{Gb^2}{10^{-4} G} \right)^{\frac{1}{2}} = 100b$$



$$W^*(\tau=0) = 2b^2(E_0\tau_P)^{1/2}$$

$$\begin{aligned} W^*(\tau=0) &= 2b^2(Gb^2 10^{-4} G)^{1/2} = 2 \cdot 10^{-2} Gb^3 \approx \\ &\approx 2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{11} \cdot 3 \cdot 10^{-23} \approx \\ &\approx 6 \cdot 10^{-14} \text{ эрг} \approx \boxed{0.04 \text{ eV}} \end{aligned}$$

$$kT = 1.38 \cdot 10^{-16} \frac{\text{эрг}}{\text{К}} \cdot 10^3 \text{ К} \approx 1.38 \cdot 10^{-13} \text{ эрг} \approx \boxed{0.1 \text{ eV}}$$

Вывод:

Энергии тепловых флуктуаций достаточно для того, чтобы обеспечить образование двойного перегиба.

Стадия упрочнения

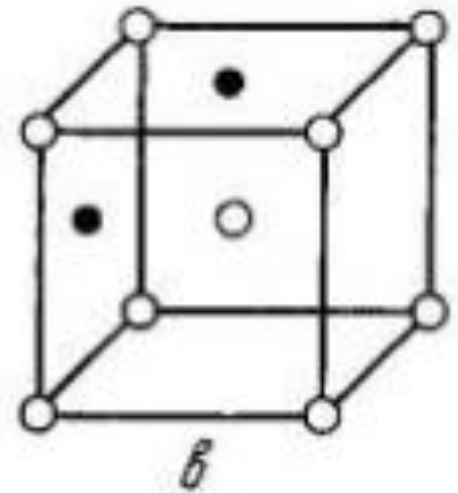
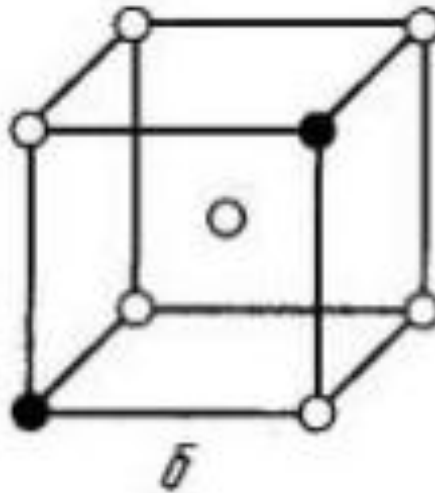
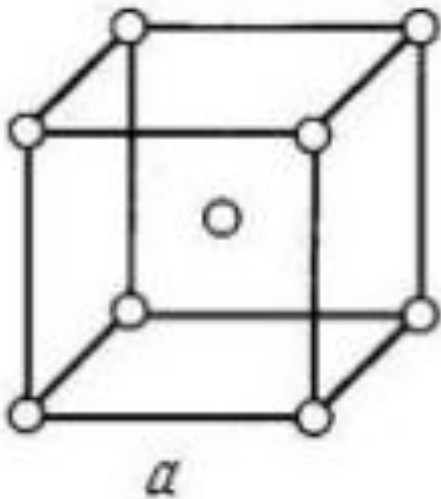
Повышение прочности или упрочнение материала – условно необратимое повышение прочностных характеристик при механическом, химическом, тепловом воздействии на материал.

Упрочнение может достигаться, во-первых, при его получении, и, во-вторых, при обработке уже полученного материала.

Механизмы упрочнения

- **Твердорастворное упрочнение** (дисперсионное упрочнение)
- **Многофазное упрочнение** (дисперсное упрочнение).
- **Поликристаллическое упрочнение** (получение сверхмелкого зерна (зернограничное упрочнение))
- **Субструктурное упрочнение** (деформационное упрочнение)

Расположение атомов при образовании твердых растворов

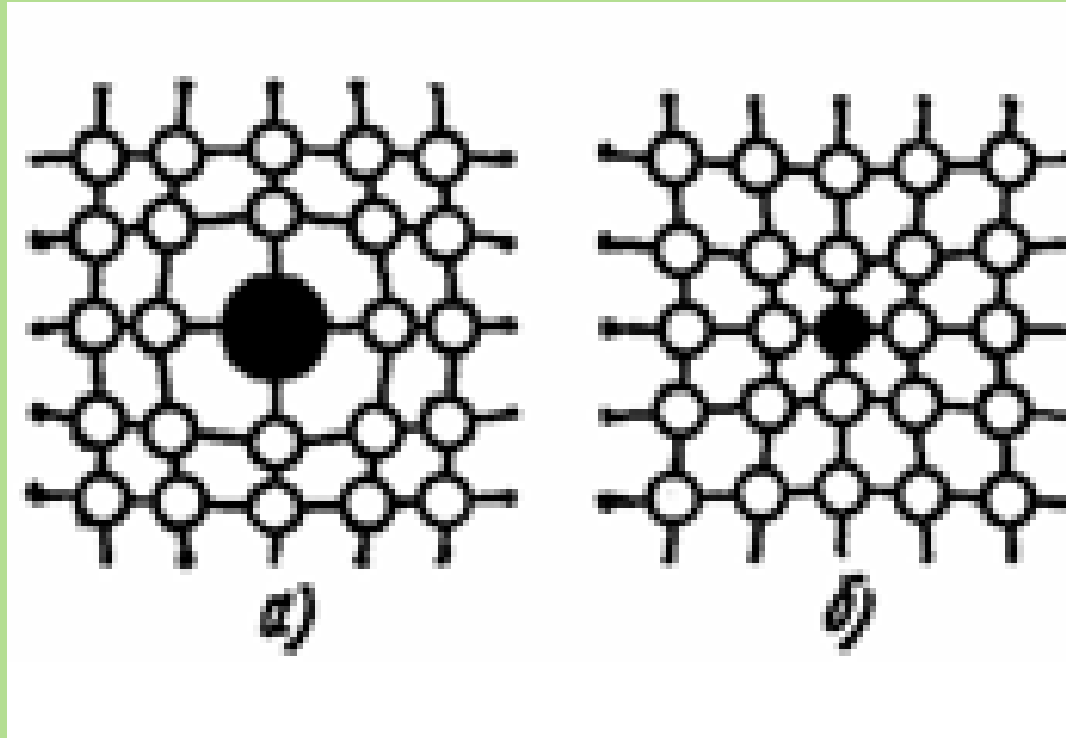


а – чистый

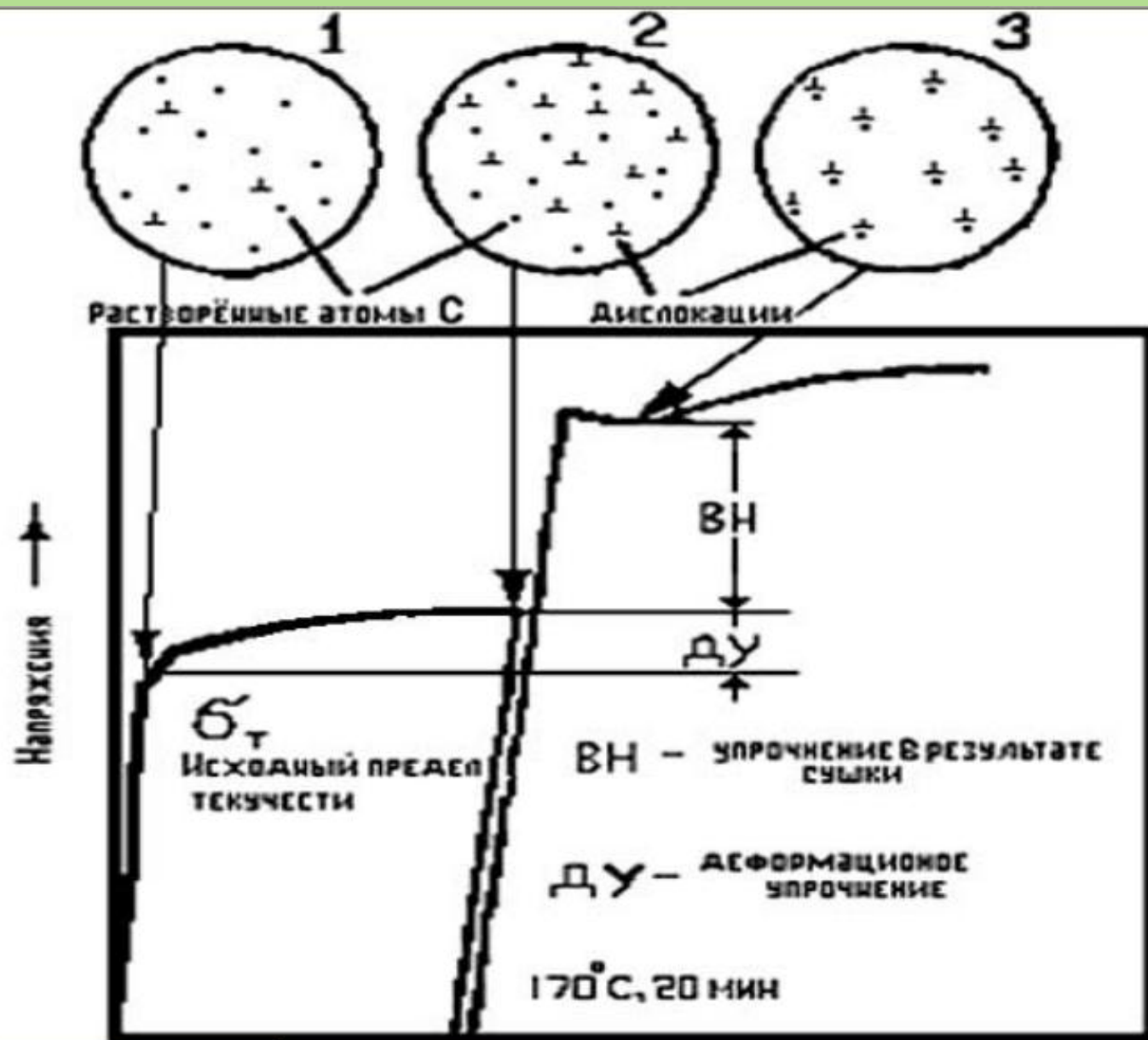
б – раствор замещения

в- раствор внедрения

Расположение атомов при образовании твердых растворов



Растворы замещения



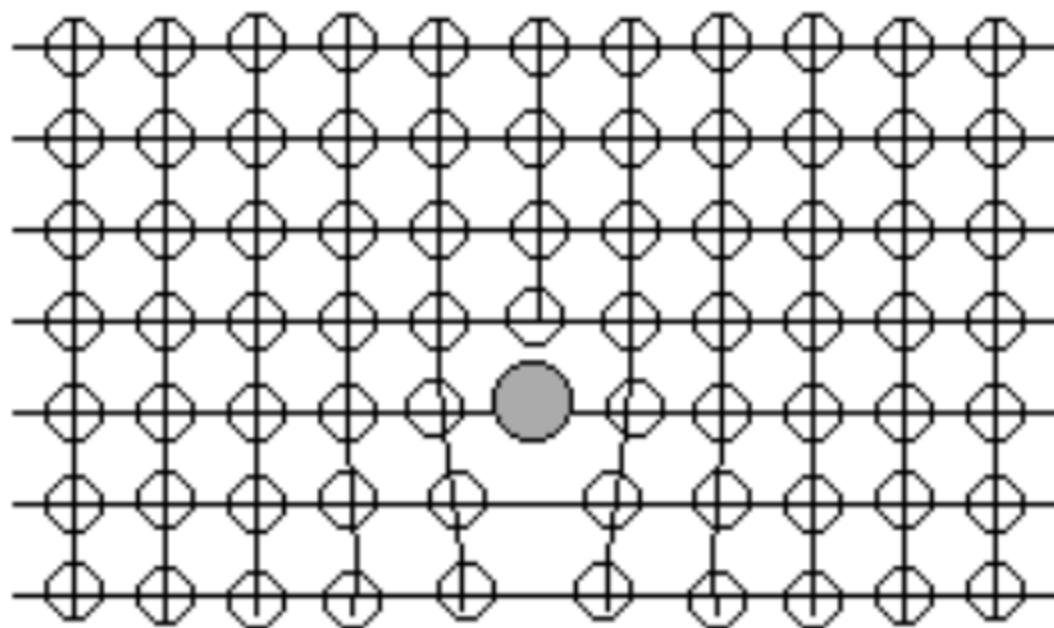


Рис. 3.35. Примесный атом
в ядре дислокации

Твердорастворное упрочнение

основано на введении в кристаллическую решетку металла атомов замещения или внедрения.

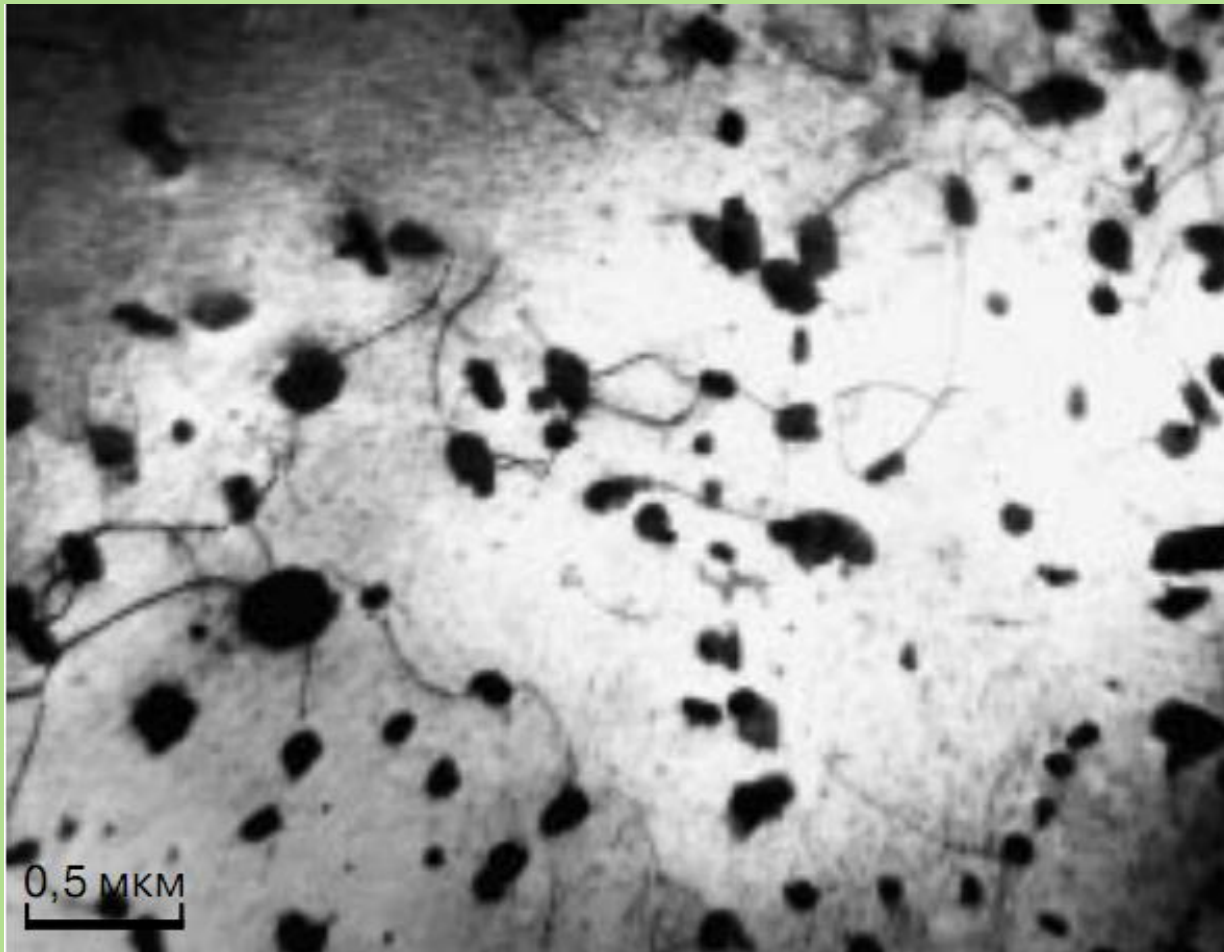
При этом кристаллическая решетка основного металла искажается вследствие различного размера атомов, образующих твердый раствор.

Дислокации при своем движении должны преодолевать искажения кристаллической решетки, что затрудняет деформацию.

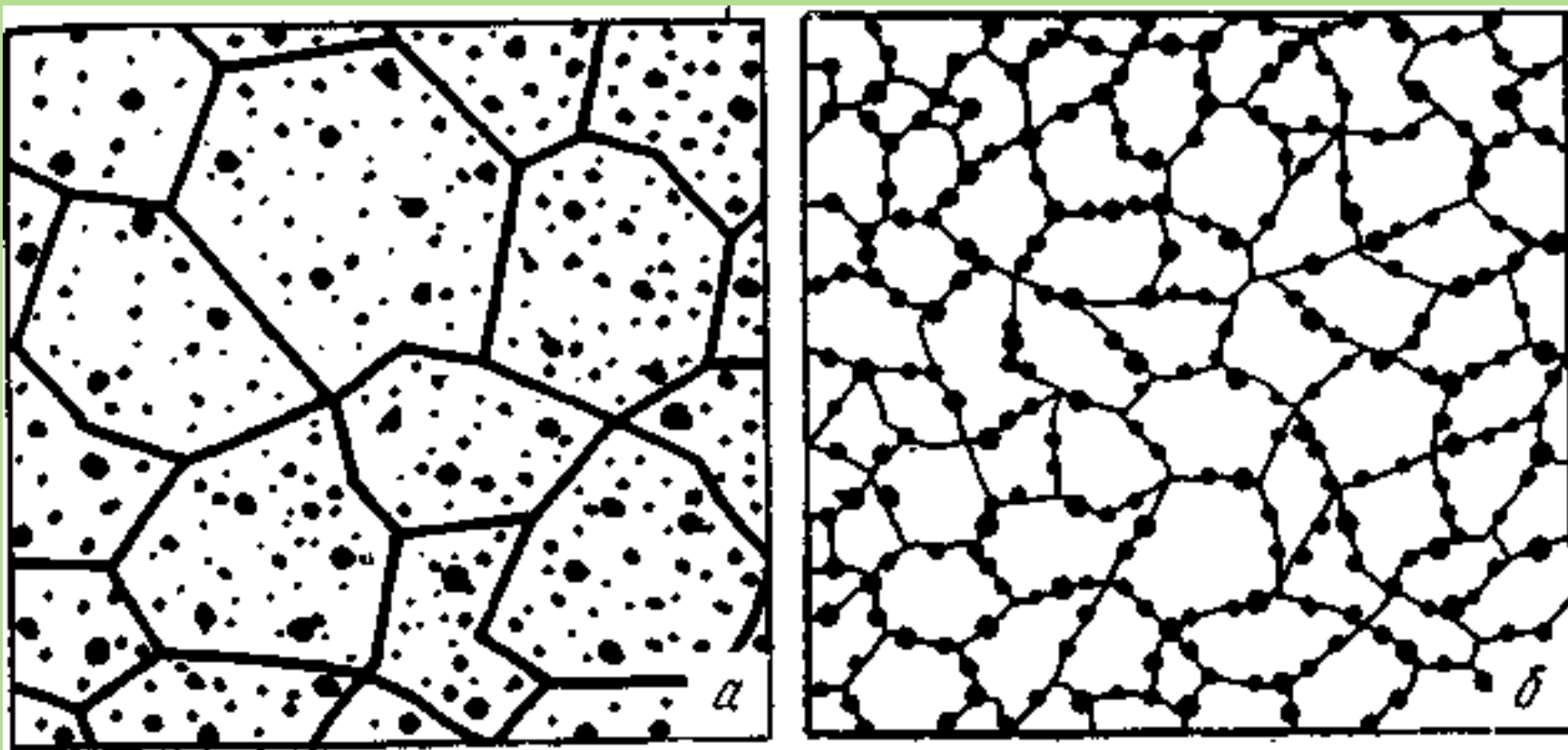
Данный механизм упрочнения проявляется при формировании любых сплавов с твердым раствором, особенно пересыщенным.

Пример: Применение сплавов. Закалка стали.

Многофазное упрочнение



Частицы второй фазы в алюминиевом сплаве.
Электронная микроскопия.



Типы структур в дисперсноупрочненных материалах: а -дисперсная; б -агрегатная

Многофазное (дисперсионное) упрочнение

Упрочнение дисперсными частицами

заключается в образовании мелких выделений второй фазы в матрице основного металла. В структуре сплавов могут формироваться дисперсные частицы карбидов, интерметаллических соединений, оксидов. Эти выделения создают препятствия для движения дислокаций и значительно повышают прочность материала.

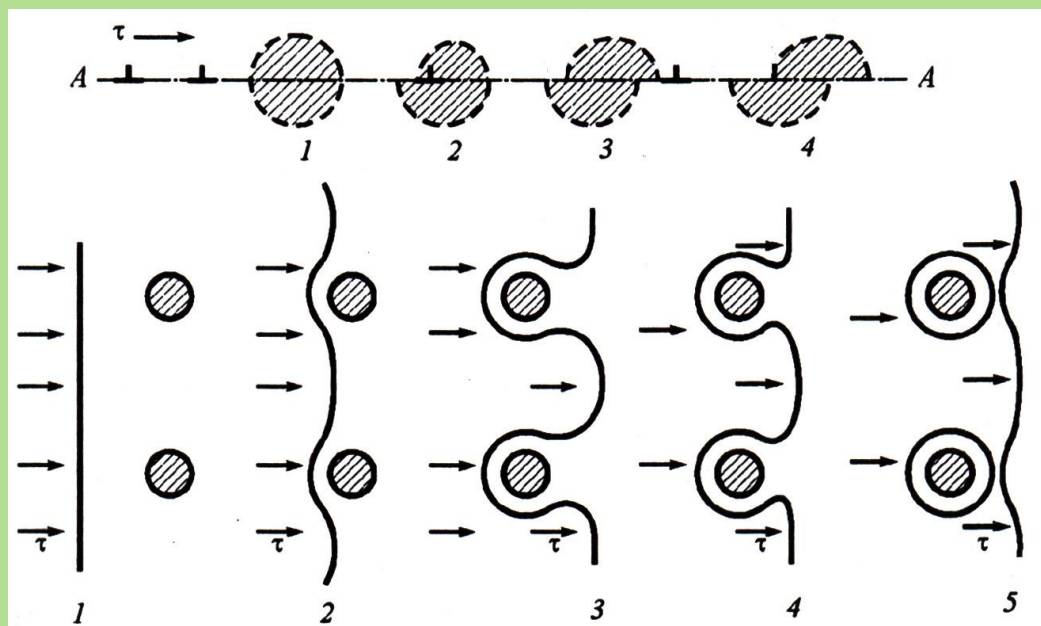
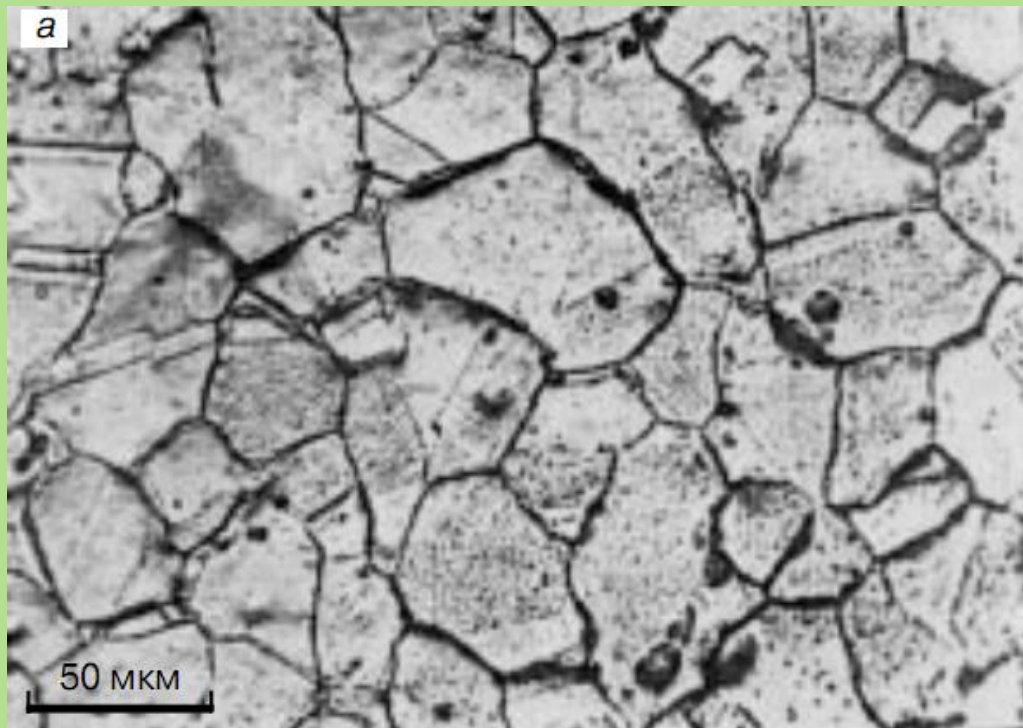


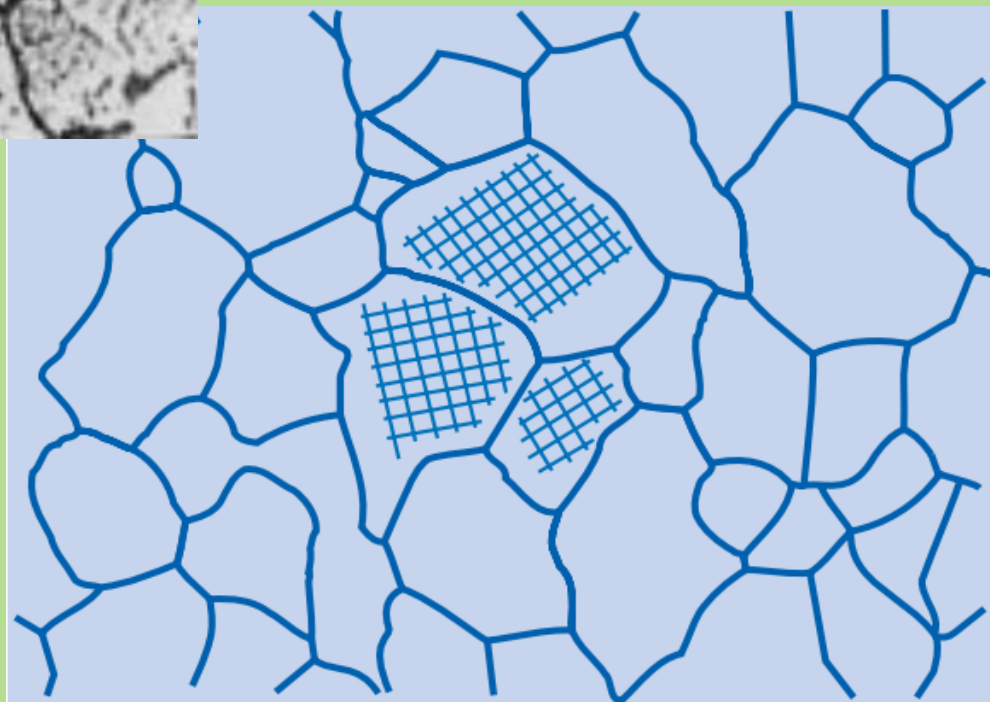
Схема перемещения дислокации в двухфазных сплавах при перерезании частиц второй фазы (а) и при образовании дислокационных петель (б)



Поликристаллическое упрочнение

Поликристалл

Схема



Поликристаллическое (зернограничное) упрочнение

Наличие границ зерен в поликристалле приводит к его упрочнению.

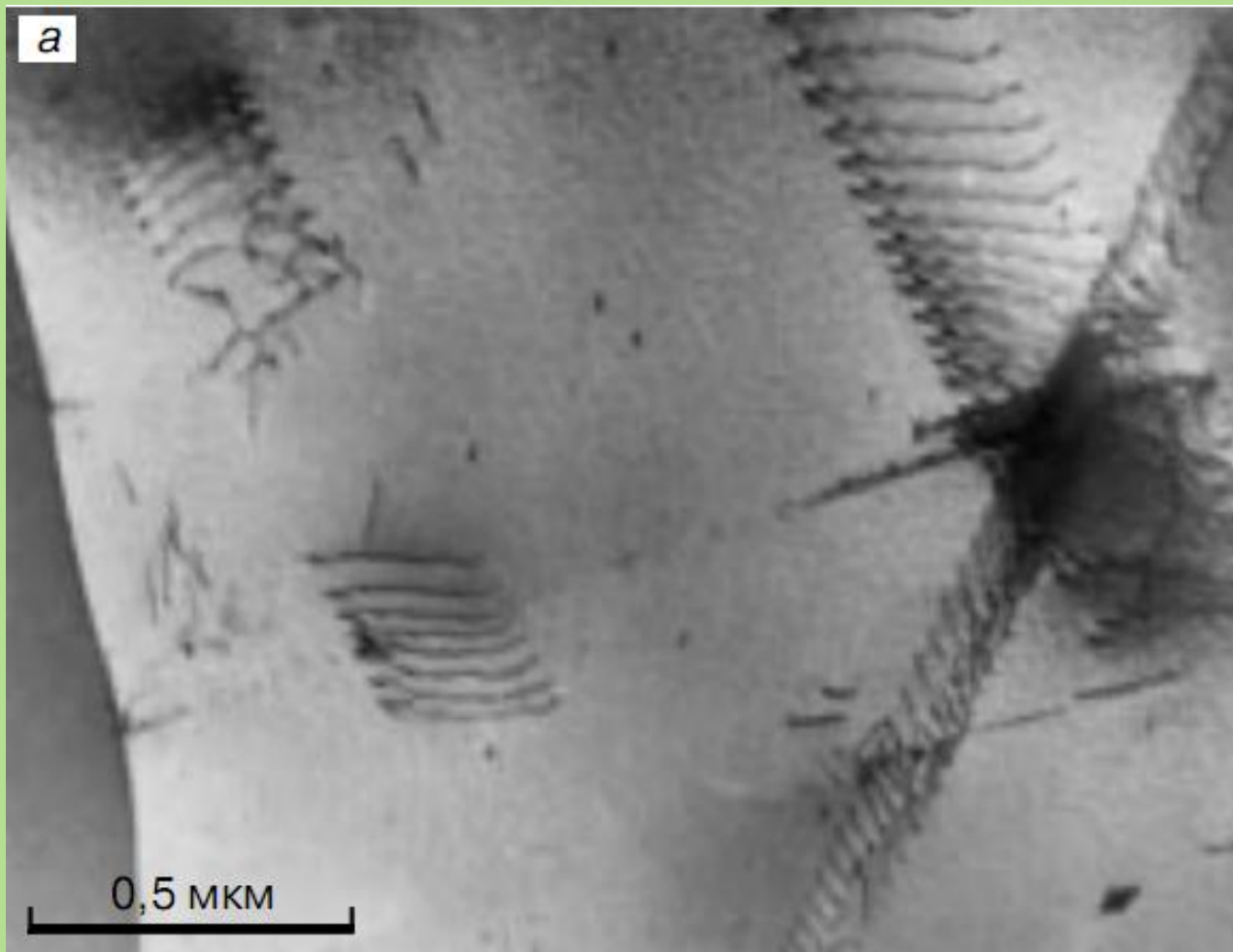
При определенном значении напряжения дислокации не могут перейти через границу в другое зерно и начинают тормозиться. Для преодоления границы им необходимо дополнительное напряжение.

Чем мельче зерно, тем прочнее металл.



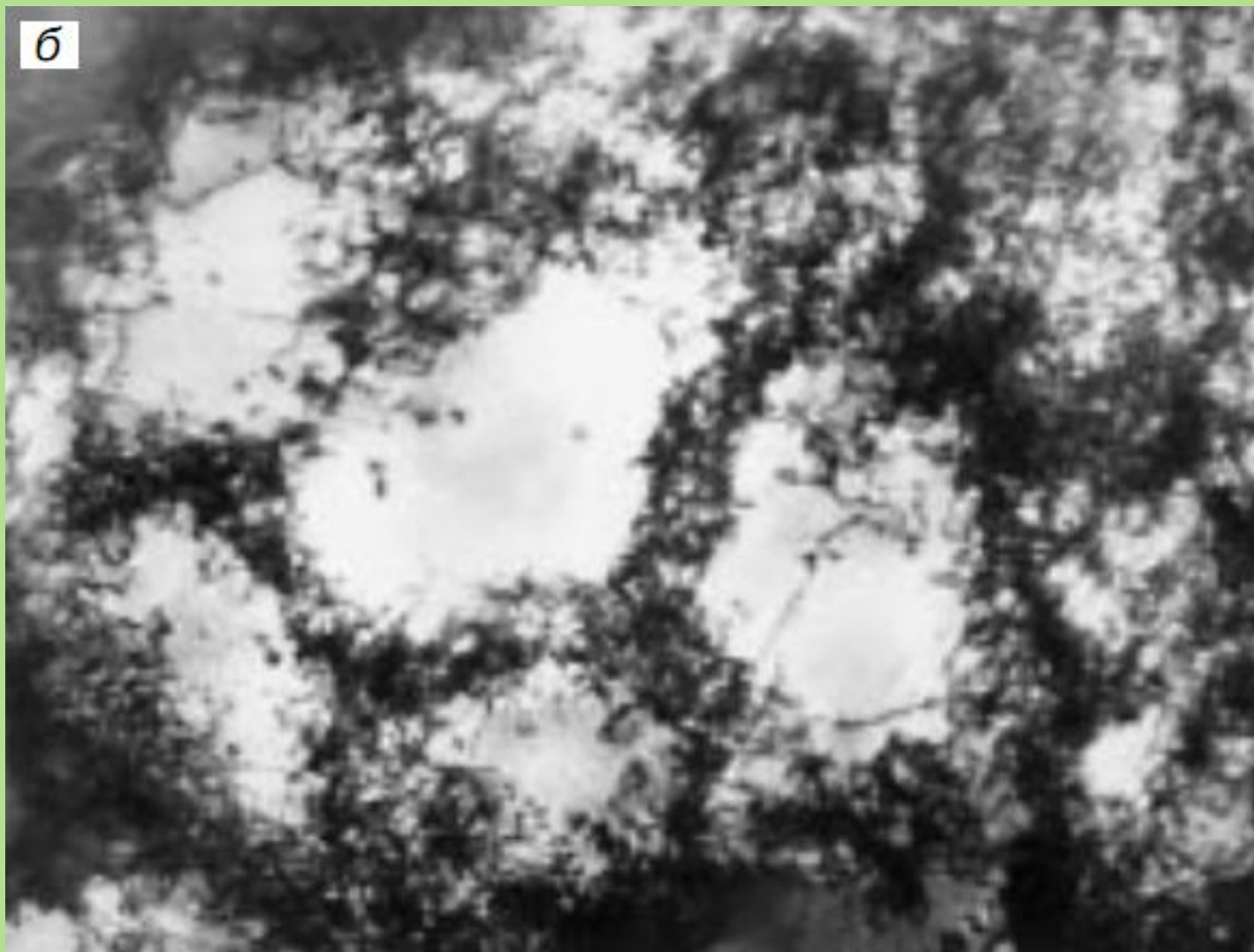
Пример: Измельчения структуры при кристаллизации.
Закалка и высокий отпуск стали.

Субструктурное упрочнение



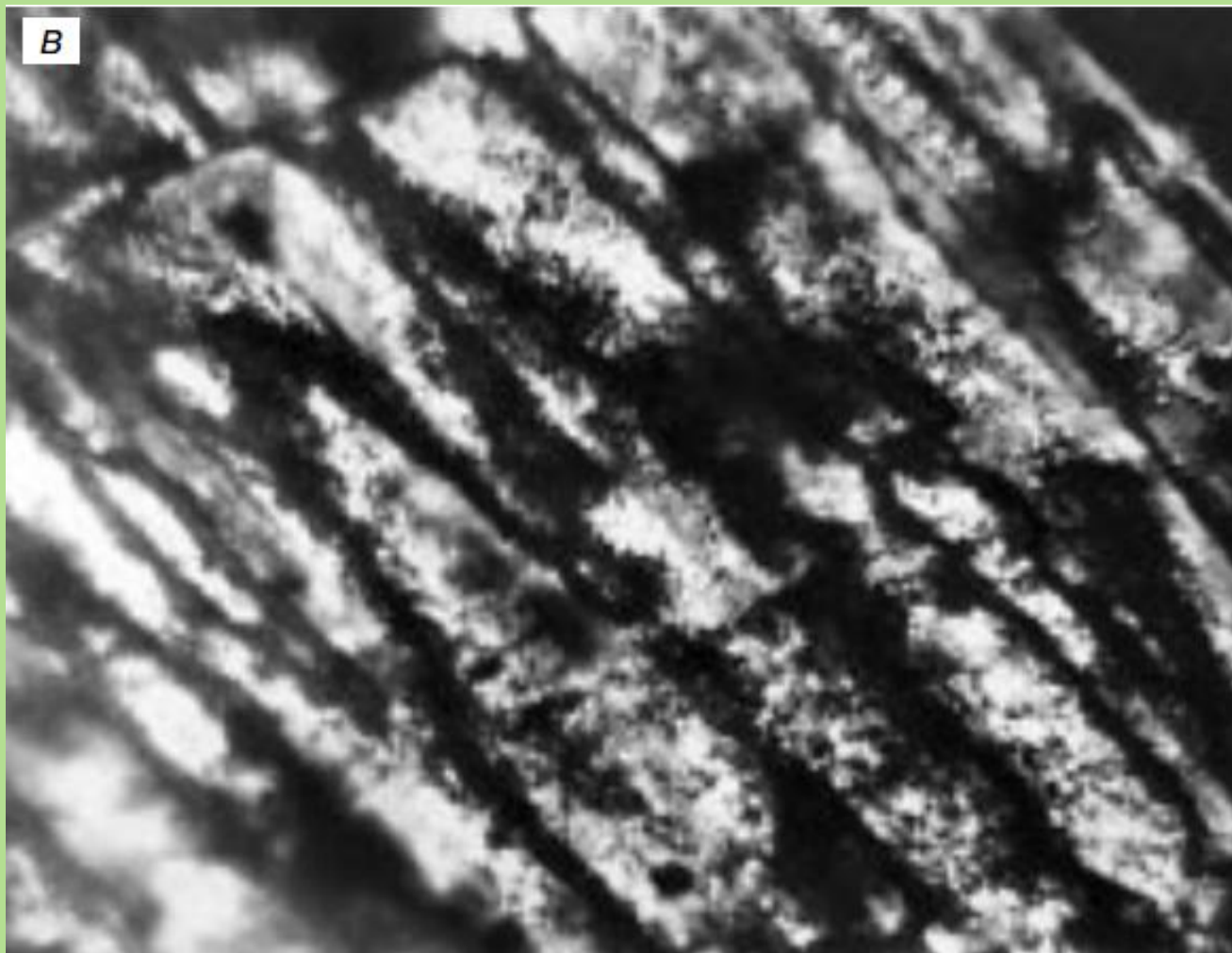
Дислокационные скопления

Субструктурное упрочнение



Ячеистые дислокационные структуры

Субструктурное упрочнение

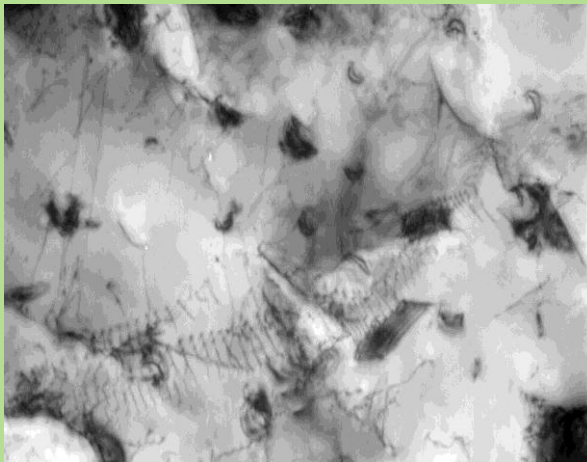


Микрополосы

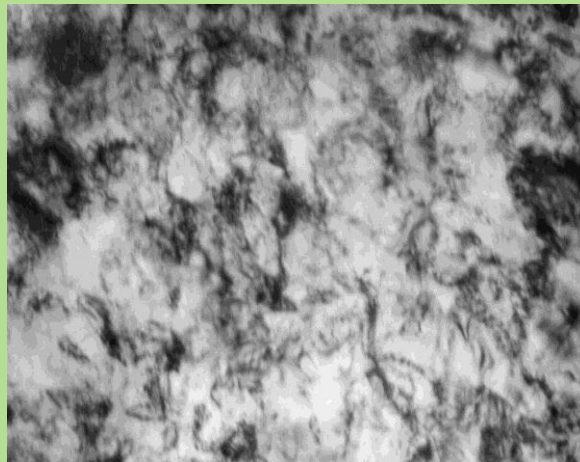
Дислокационное упрочнение

достигается при формировании в кристаллической решетке большого числа дислокаций.

Плотность дислокаций увеличивается, и дислокации создают различные субструктуры, что в результате тормозит процесс пластической деформации.



а



б

ЭМ изображение
дислокационной структуры в
титане: а – хаотически
расположенные дислокации;
б – упорядоченная
дислокационная
субструктура ($\times 25000$)

Пример: Упрочнение наклепом

В современных конструкционных материалах чаще всего используется комбинированное взаимодействие нескольких из этих механизмов.



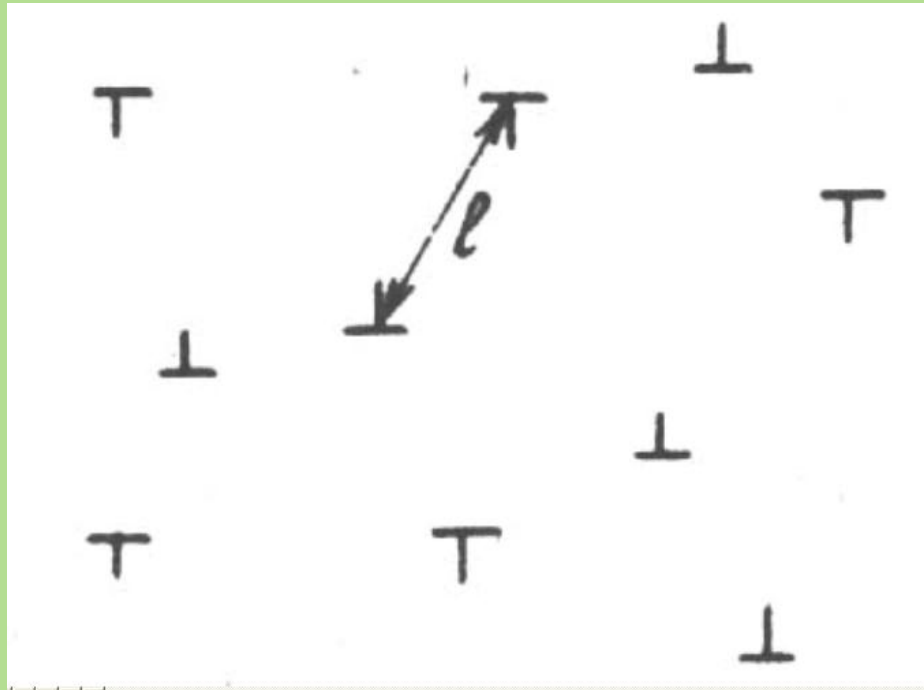
Микроструктура стали
45 после закалки

Например:

При закалке стали происходит формирование пересыщенного твердого раствора углерода в железе – мартенсита (твердорастворное упрочнение), формирование мелкозернистой структуры мартенсита (зернограничное упрочнение) с большой плотностью дислокаций (дислокационное упрочнение).

Теории деформационного упрочнения монокристаллов

Теория Тейлора



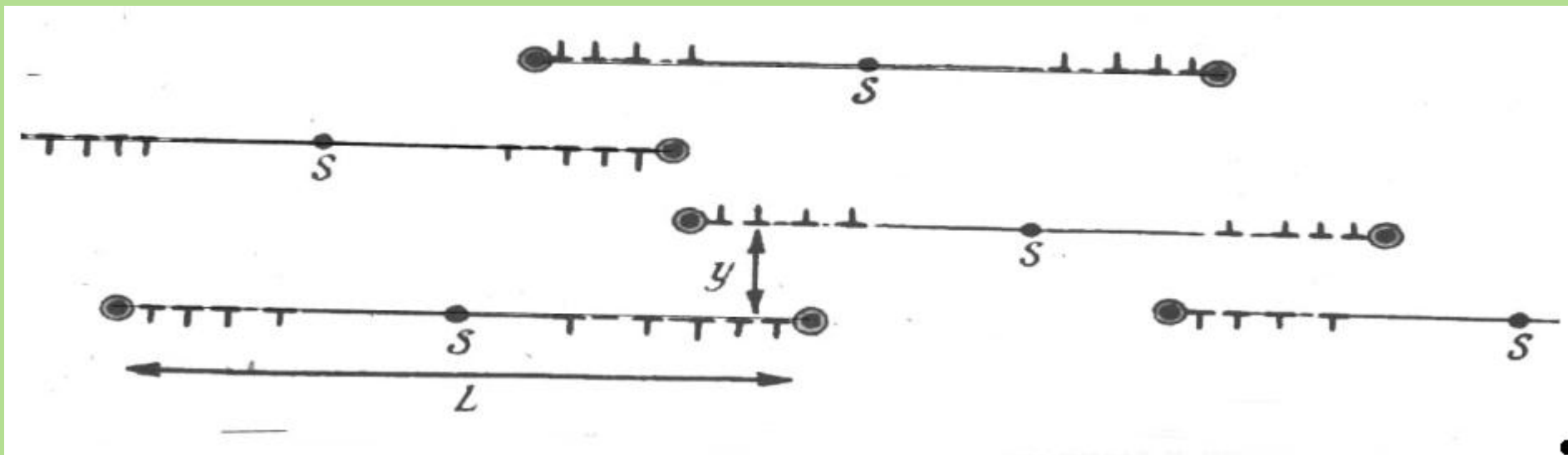
$$l = \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

$$\tau \approx \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)} \rho^{1/2}$$

$$\rho(\tau) = \left(\frac{\tau}{G} \right)^2 \cdot \frac{4\pi^2(1-\nu)^2}{b^2}$$

Недостатки:

Теория Мотта



Теория Зегера

Основные причины упрочнения

1. **Взаимодействие полей упругих напряжений.**
2. **Упрочнение при пересекающихся плоскостях скольжения.**
3. **Пересечение непараллельных дислокаций.**
4. **Пересечение винтовой дислокации с краевой и винтовой с винтовой дислокацией.**

Взаимодействие полей упругих напряжений.

Взаимодействие полей упругих напряжений в упругих средах.

Взаимодействие полей упругих напряжений в упругих средах.

Взаимодействие полей упругих напряжений в упругих средах.

Взаимодействие полей упругих напряжений в упругих средах.

Взаимодействие полей упругих напряжений в упругих средах.

Взаимодействие полей упругих напряжений в упругих средах.

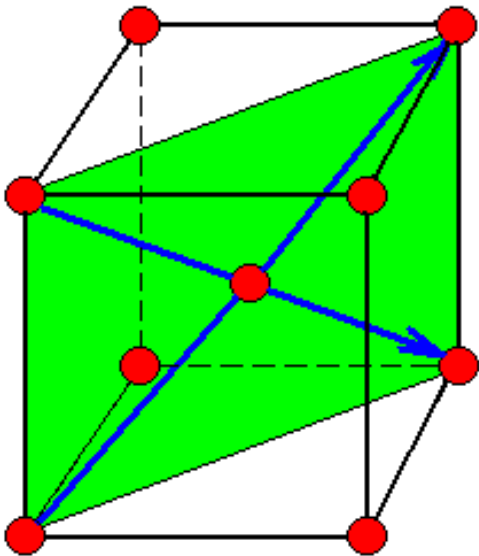
Взаимодействие полей упругих напряжений в упругих средах.

Взаимодействие полей упругих напряжений в упругих средах.

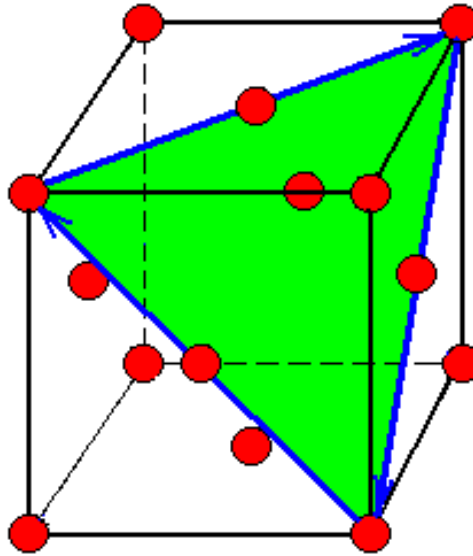
Системы скольжения

Скольжение в кристаллах происходит по наиболее плотноупакованным плоскостям в наиболее плотноупакованных направлениях. Плоскость с направлениями образует систему скольжения.

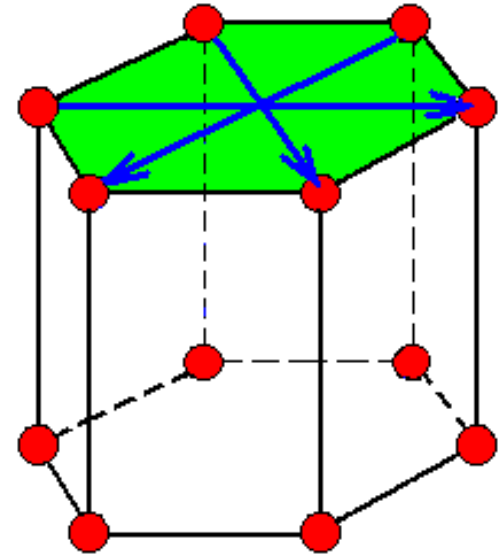
ОЦК
6 плоскостей $\{110\}$
2 направления $\langle 111 \rangle$
 $6 \times 2 = 12$ систем

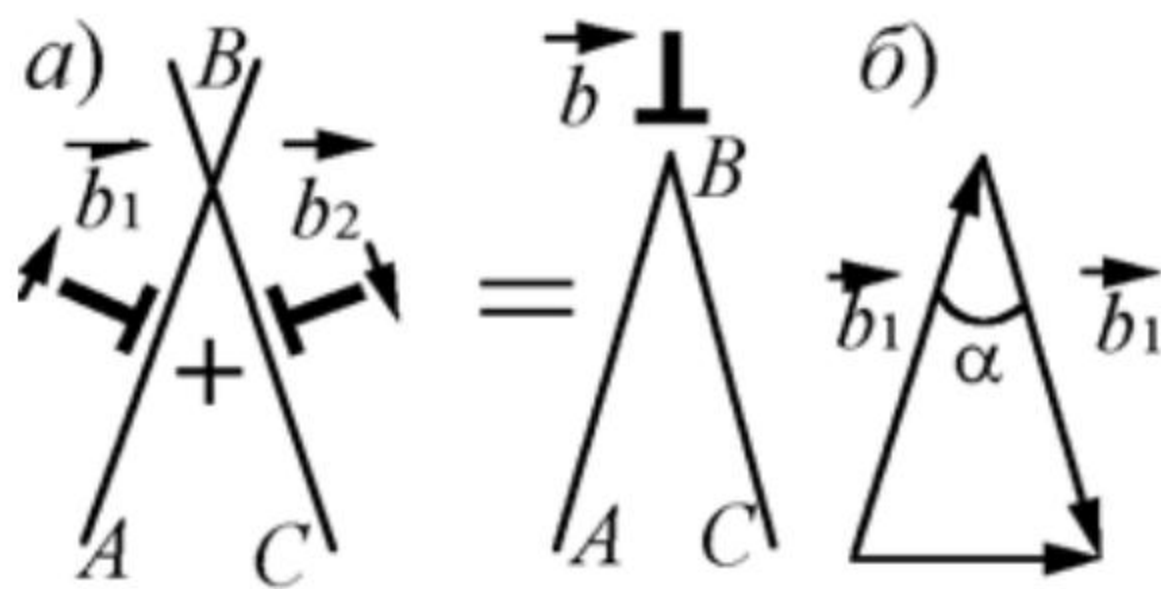


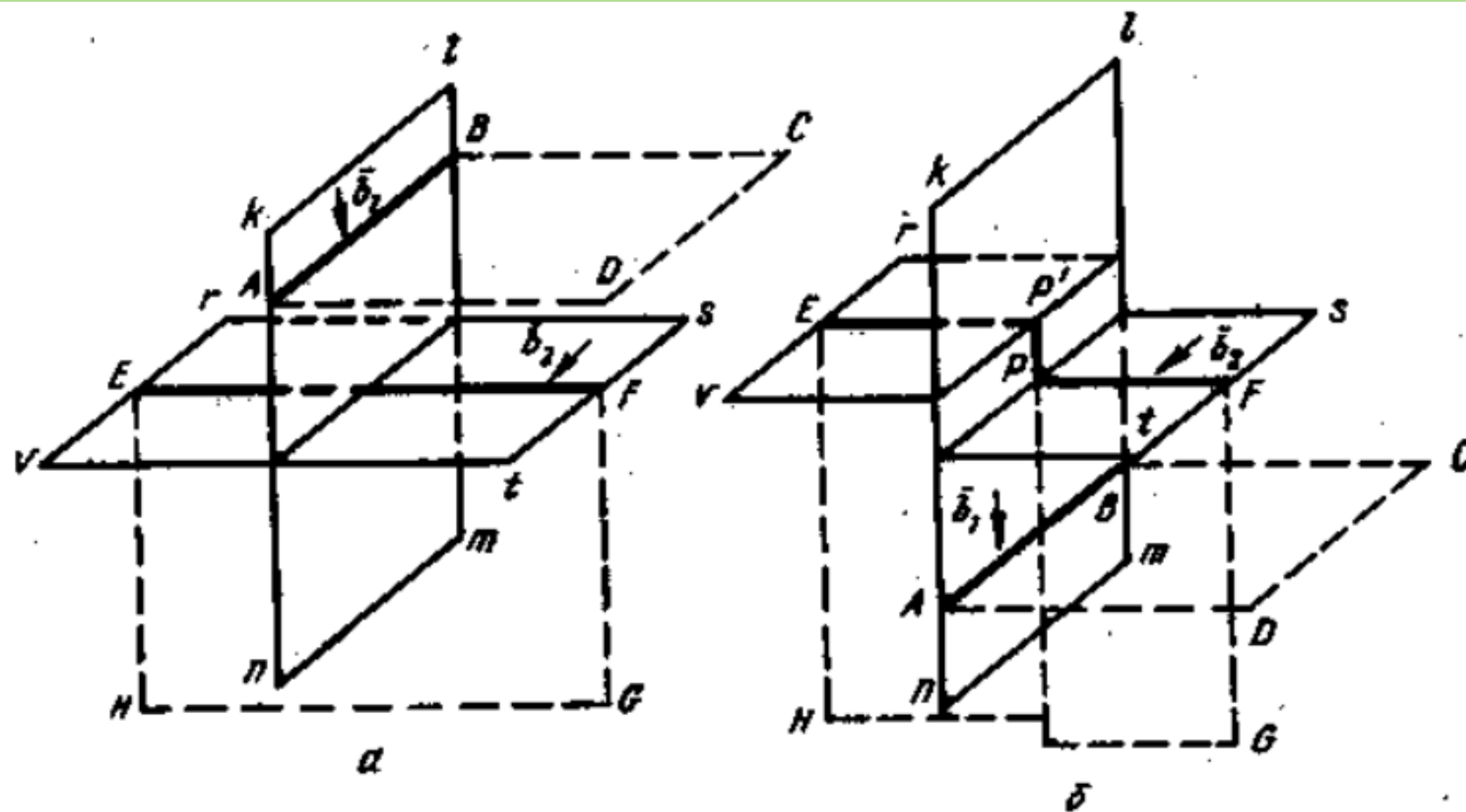
ГЦК
4 плоскости $\{111\}$
3 направления $\langle 110 \rangle$
 $4 \times 3 = 12$ систем



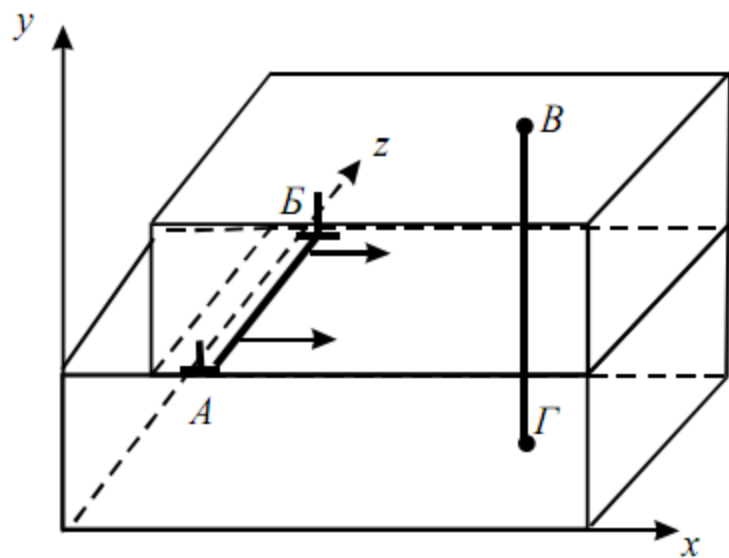
ГПУ
1 плоскость $\{1110\}$
3 направления $\langle 1120 \rangle$
 $1 \times 3 = 3$ системы







a)



b)

