

---

# Пластическая деформация

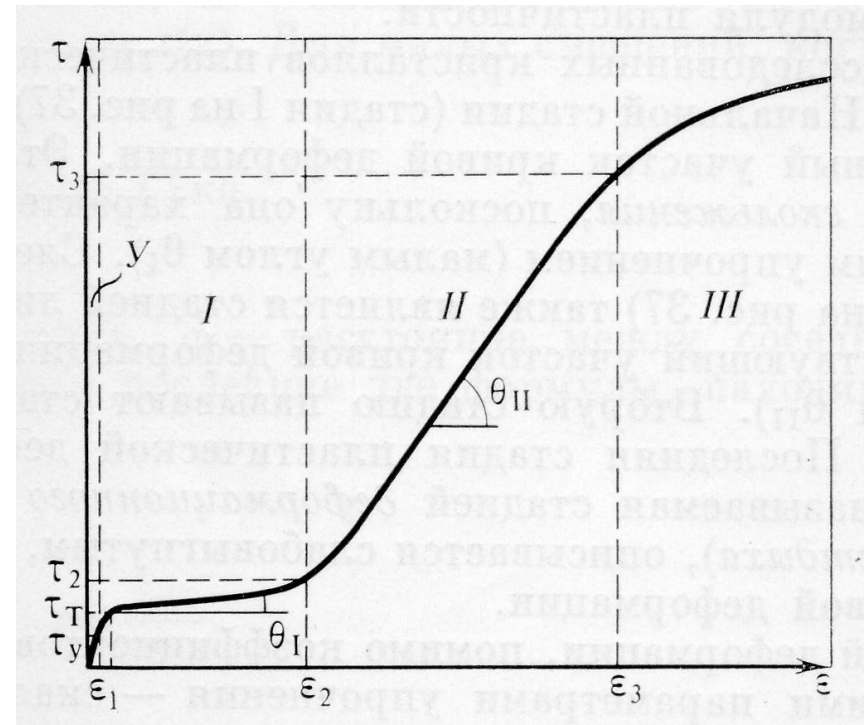
---

# Структура раздела

- Суть явления пластической деформации
- Основные понятия
- Механизмы пластичности
- Дислокационная структура т.т.
  - Движение дислокаций
  - Образование дислокаций
  - Поля напряжений дислокаций
  - Взаимодействие дислокаций

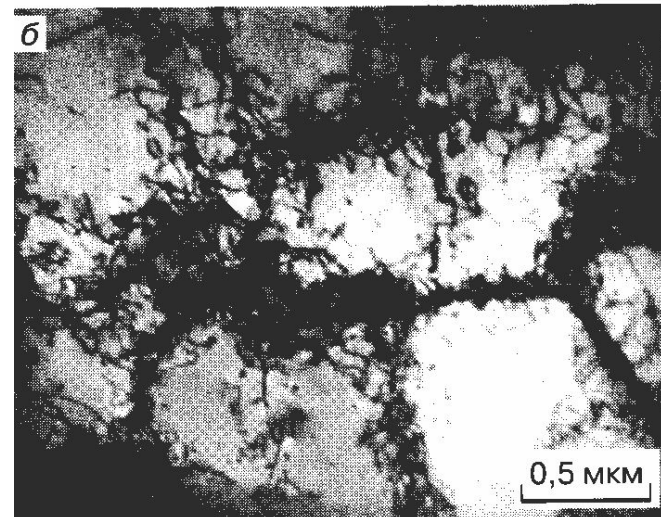
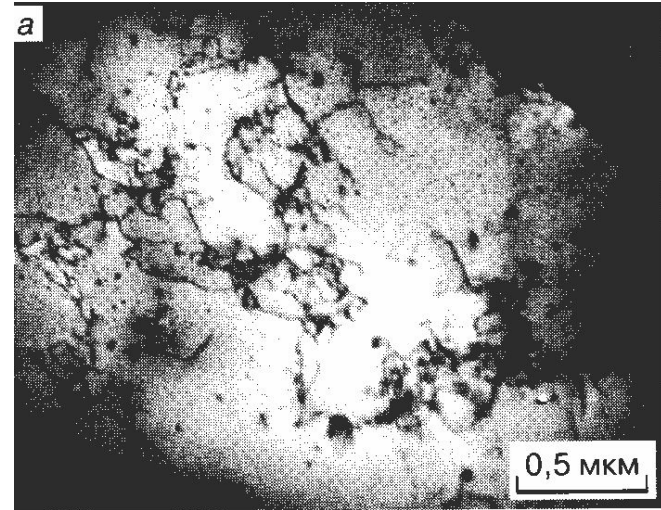
# Суть явления

- Кривая зависимости напряжения от деформации (**кривая деформации**)
  - У – область упругой деформации
  - I – область лёгкого скольжения
  - II – область упрочнения (наклёп)
  - III – область разупрочнения



# Суть явления

- Стадийность пластического течения обусловлена изменениями в дислокационной структуре
  - Клубковая структура
  - Ячеистая структура

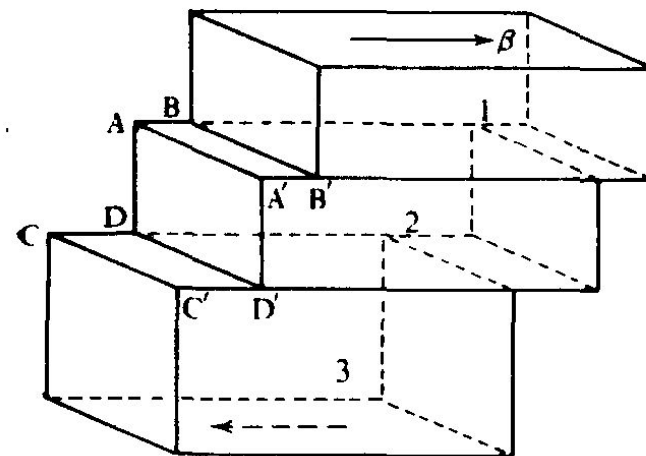
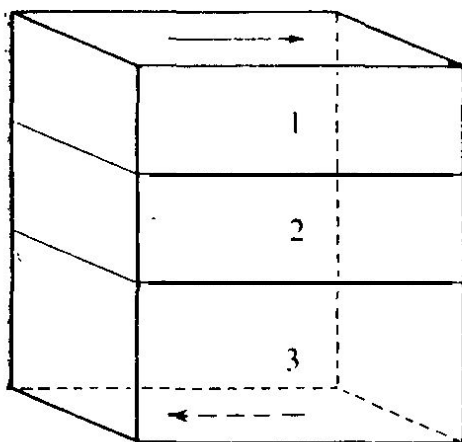
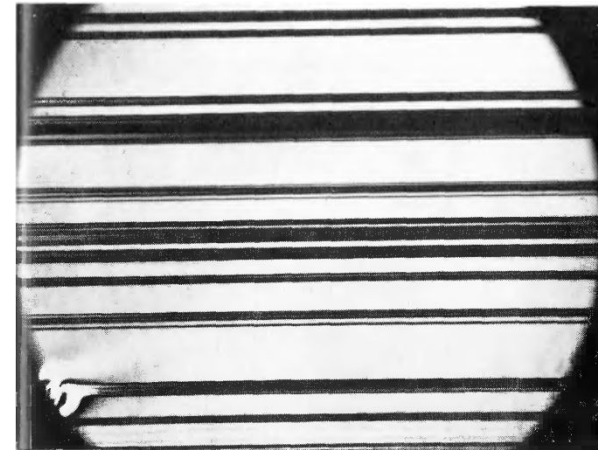


# Основные понятия

- **Предел упругости** – напряжение, при котором заканчивается стадия упругой деформации
- **Предел текучести** – напряжение, при котором резко меняется наклон кривой деформации. Соответствует началу пластической деформации
- **Коэффициент упрочнения (модуль пластичности)** – тангенс угла наклона кривой деформации

# Суть явления

**Скольжение** – это перемещение (сдвиг) одной части кристалла по отношению к другой без изменения объёма. Смещение происходит по определенной плоскости (*плоскость скольжения*) и в определенном кристаллографическом направлении (*направление скольжения*).

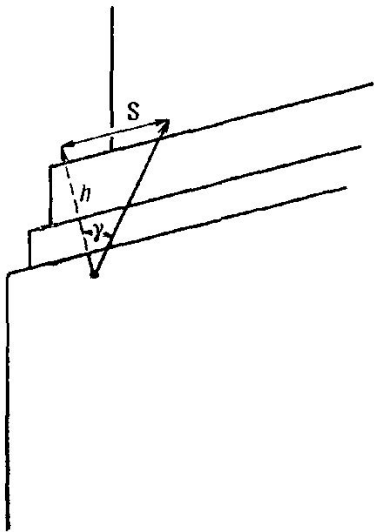


до деформации

после деформации

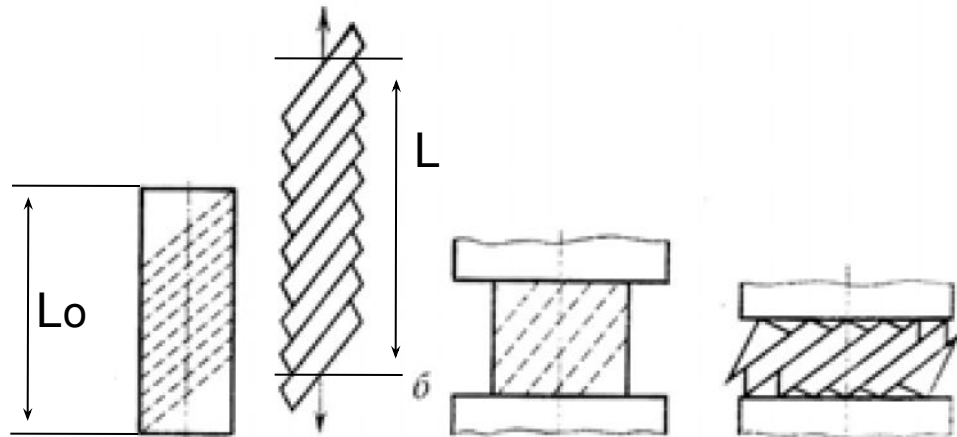
# Суть явления

Скольжение обеспечивает необратимые деформации сдвига, растяжения и сжатия.



$$\gamma = \frac{S}{h} = \operatorname{tg} \alpha$$

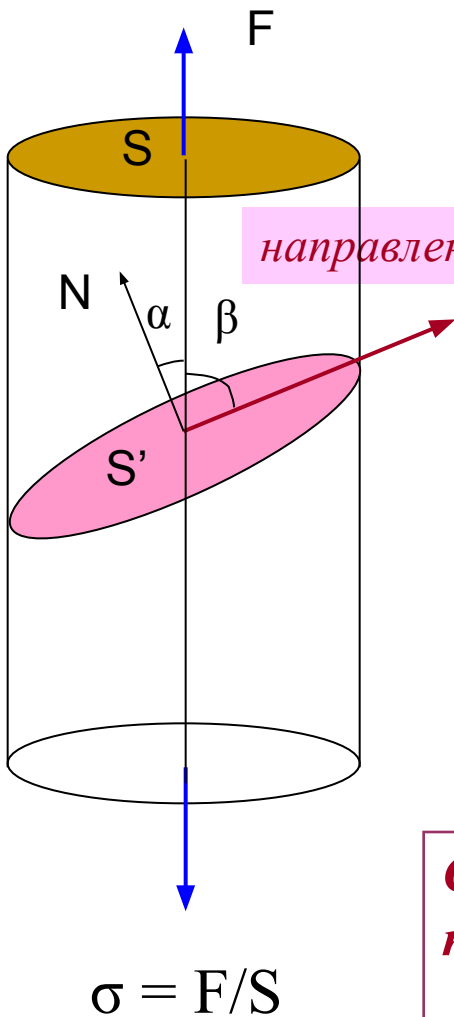
деформация сдвига



$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

деформация  
растяжения, сжатия

# Скалывающее напряжение



$$\tau = F \cos\beta / (S / \cos\alpha) = (F/S) \cos\beta \cos\alpha$$

$$\alpha + \beta = 90^\circ$$

$$\tau_{\max} = 0.5 \sigma, \text{ при } \alpha = \beta = 45^\circ$$

Скольжение происходит только под действием тангенциальных (касательных) напряжений.

**Скольжение начинается, когда  $\tau$  превышает критическое значение, характерное для данного вещества и данной системы скольжения.**

**Это закон постоянства критического скалывающего напряжения (закон Шмида и Боаса).**

***Система скольжения =  
плоскость скольжение + направление скольжения***

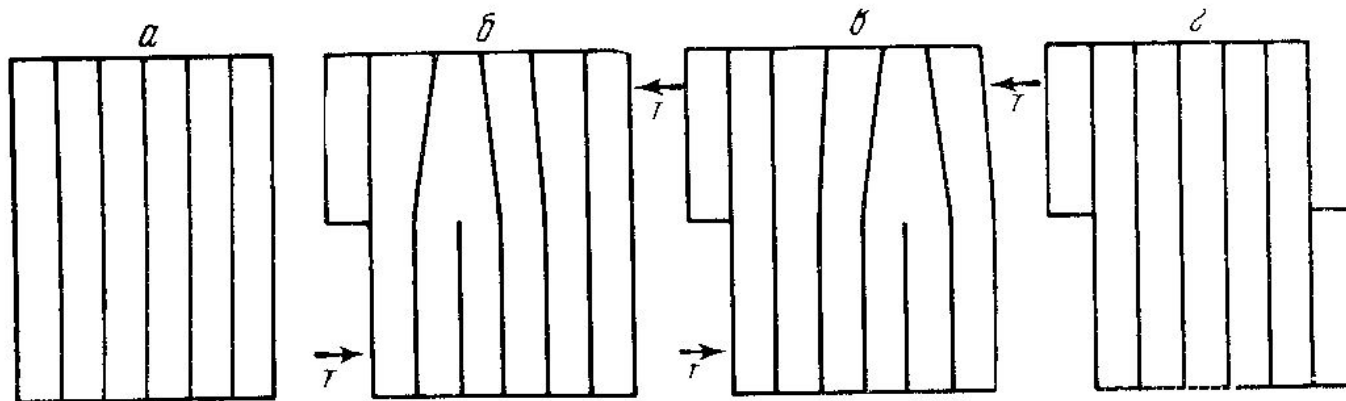


---

# Механизмы пластичности

1. Диффузионные
  - Движение точечных дефектов
  - Переползание краевых дислокаций  
**(дислокационная ползучесть)**
2. Дислокационный

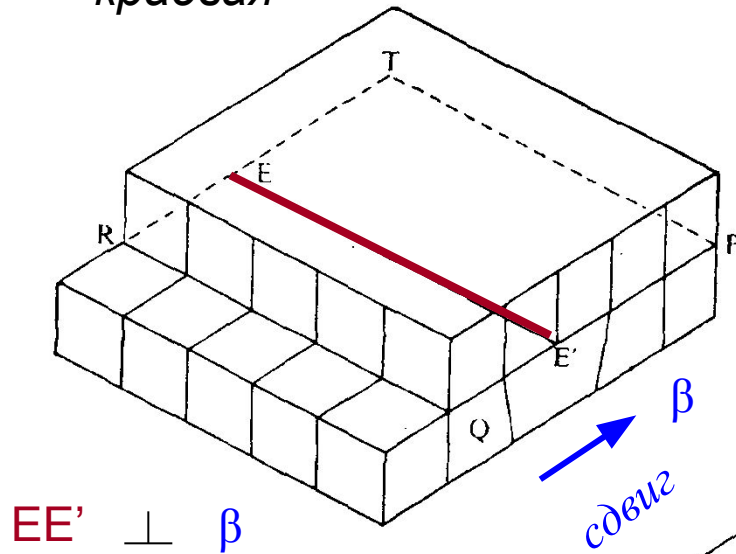
# Дислокационный механизм пластичности



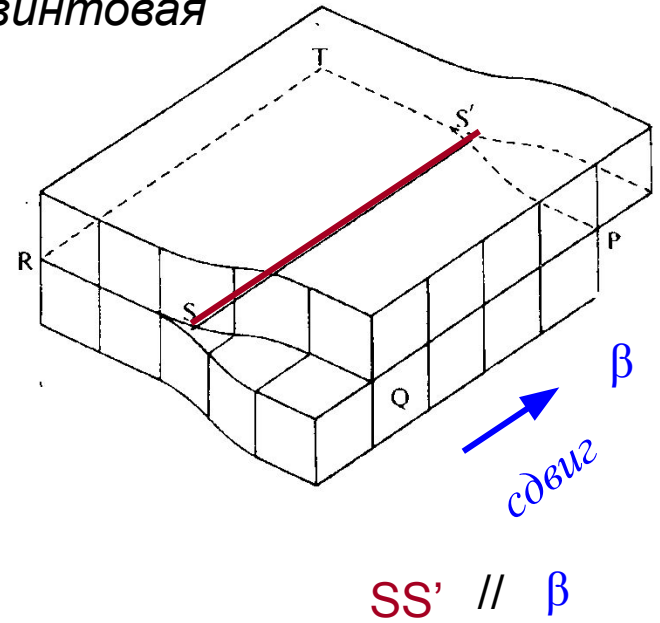
Поляни, Орован, Тейлор – 1934 г.

# Дислокации

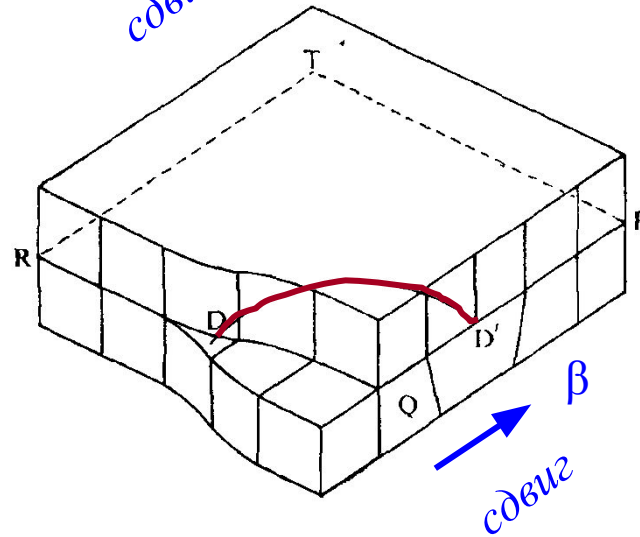
краевая



винтовая



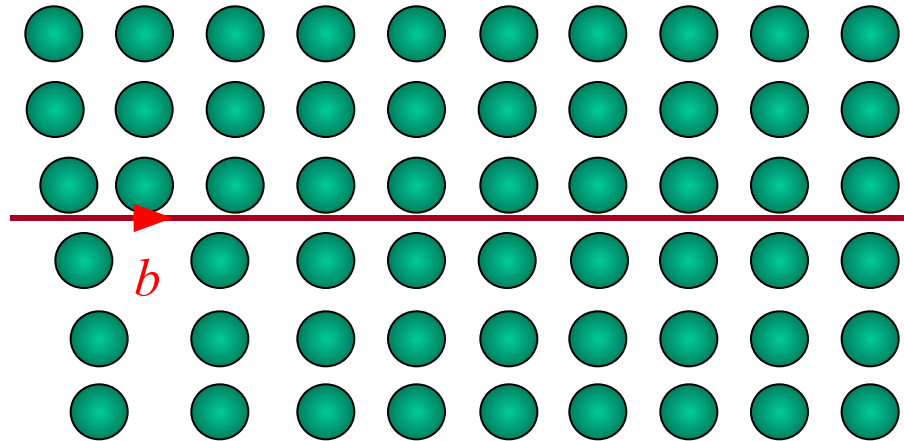
смешанная



# Вектор Бюргерса

- *Вектор Бюргерса* – кратен вектору трансляции кристаллической структуры (решётки Бравэ)
- *Вектор Бюргерса* краевой дислокации перпендикулярен линии дислокации
- *Вектор Бюргерса* винтовой дислокации параллелен линии дислокации
- *Вектор Бюргерса* любой дислокации можно представить как сумму краевой и винтовой компонент
- *Вектор Бюргерса* имеет постоянное значение и не меняется вдоль линии дислокации

# Скользящие дислокации



Скользящие дислокации – процесс периодического ослабления и восстановления связей в ядре дислокации.

Плоскость скольжения должна содержать линию дислокации и вектор Бюргерса.

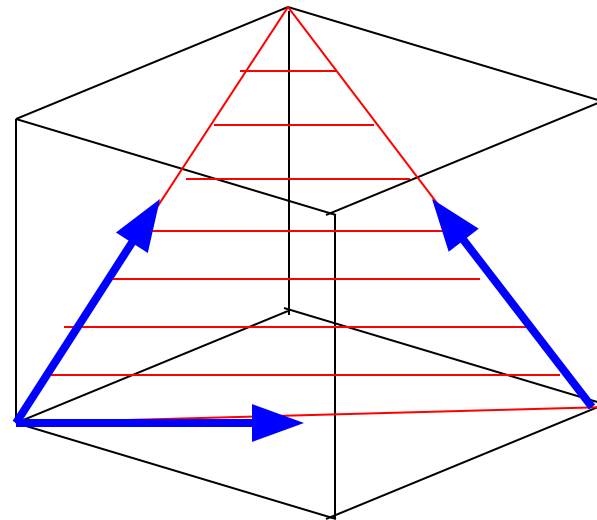
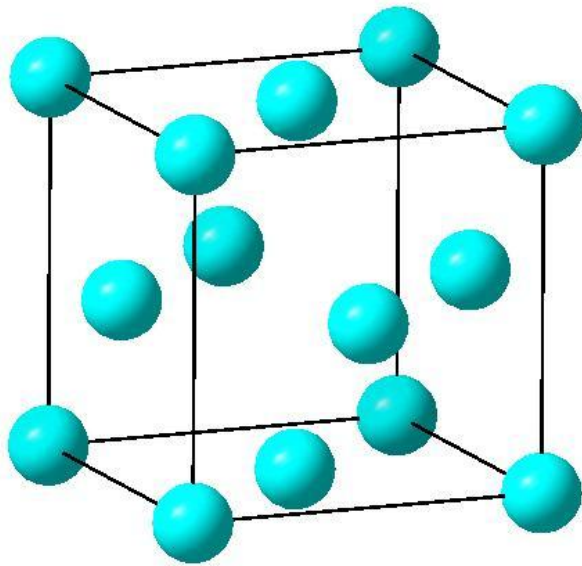
# Скольжение дислокаций

- Наблюдаемые системы скольжения
  - Плоскости скольжения – плоскости, имеющие максимальную плотность узлов решётки
  - Плоскость скольжения должна иметь максимальное значение межплоскостного расстояния -  $d$ .

# Скольжение дислокаций

ГЦК металлы

Минимальный вектор трансляции -  $a/2 [110]$   
Плоскости с максимальной плотностью узлов и  
максимальным  $d$  -  $\{111\}$

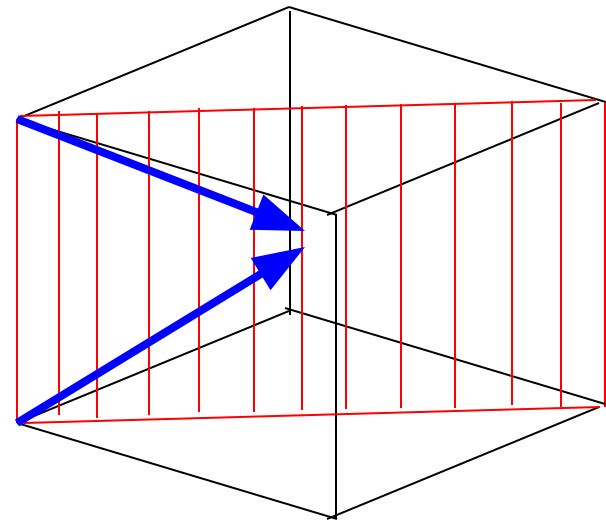
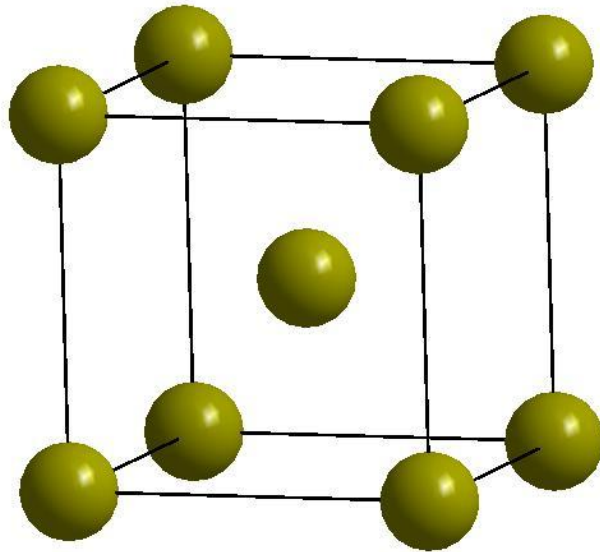


В ГЦК решётке 4 различных плоскости  $\{111\}$ , в каждой содержится 3 вектора  $a/2 [110]$ , поэтому всего  $4 \times 3 = 12$  систем скольжения.

# Скольжение дислокаций

ОЦК металлы

Минимальный вектор трансляции -  $a/2 [111]$   
Плоскости с максимальной плотностью узлов и  
максимальным  $d$  -  $\{110\}$



В ОЦК решётке 6 различных плоскости  $\{110\}$ , в каждой содержится 2 вектора  $a/2 [111]$ , поэтому всего  $6 \times 2 = 12$  систем скольжения.



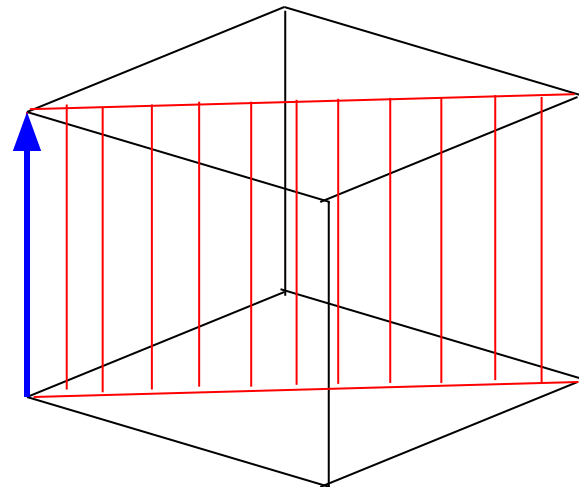
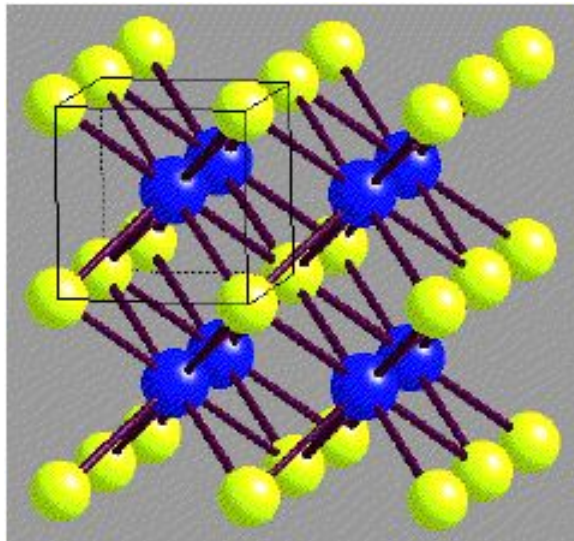
# Скольжение дислокаций

CsCl

Минимальный вектор трансляции - **a [100]**

Плоскости с максимальной плотностью узлов и

максимальным  $d$  - **{100}**, но эти плоскости состоят из ионов одного знака, скольжение происходит по **{110}**.



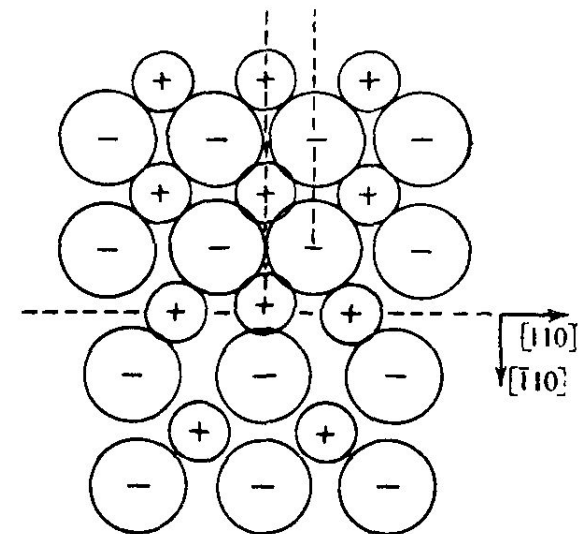
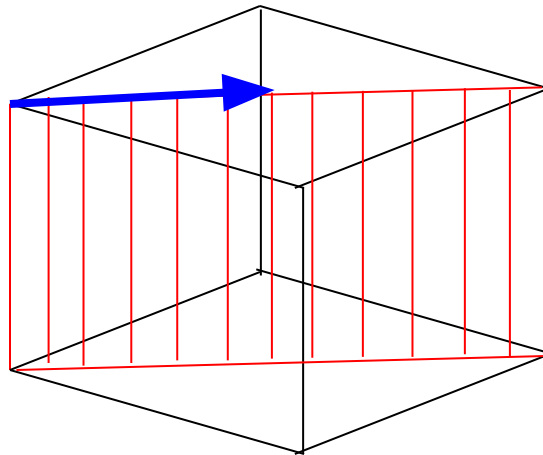
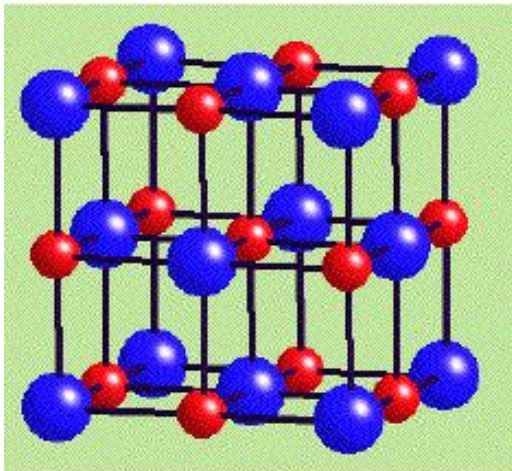
В ГЦК решётке 6 различных плоскости **{110}**, в каждой содержится 1 вектор **a [001]**, поэтому всего  $6 \times 1 = 6$  систем скольжения.

# Скольжение дислокаций

NaCl

Минимальный вектор трансляции –  $a/2 [110]$

Плоскости с максимальной плотностью узлов и максимальным  $d$  –  $\{111\}$ , но эти плоскости состоят из ионов одного знака, скольжение происходит по  $\{110\}$ .



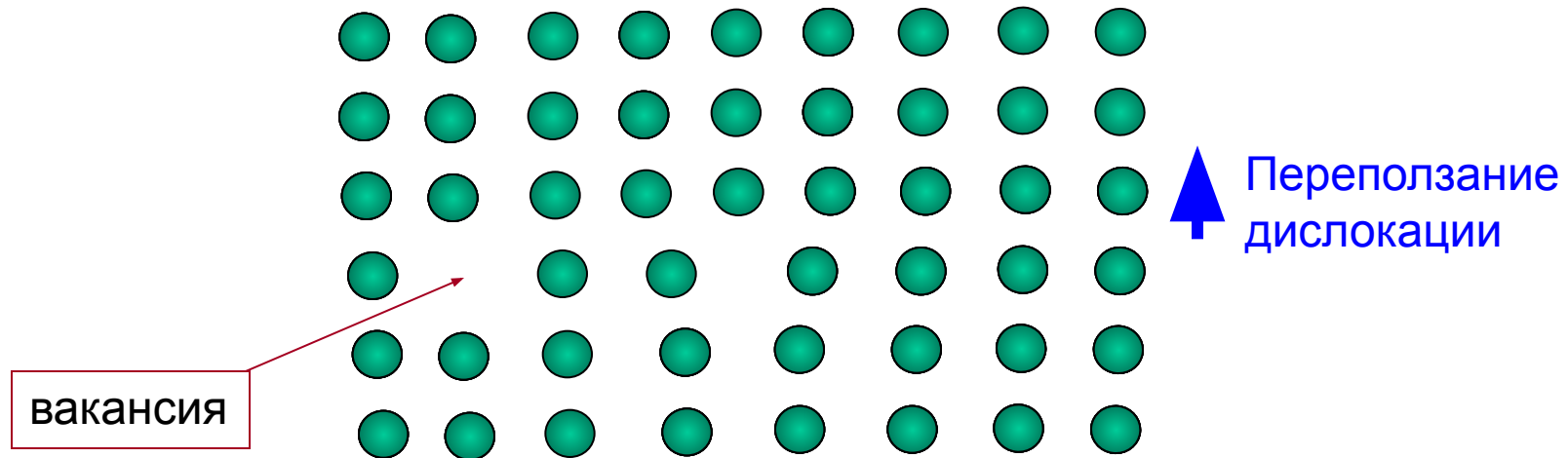
В ГЦК решётке 6 различных плоскости  $\{110\}$ , в каждой содержится 1 вектор  $a [110]$ , поэтому всего  $6 \times 1 = 6$  систем скольжения.

# Переползание дислокаций

Переползание дислокаций – это движение *краевой* дислокации в направлении перпендикулярном как линии дислокации, так и вектору Бюргерса.

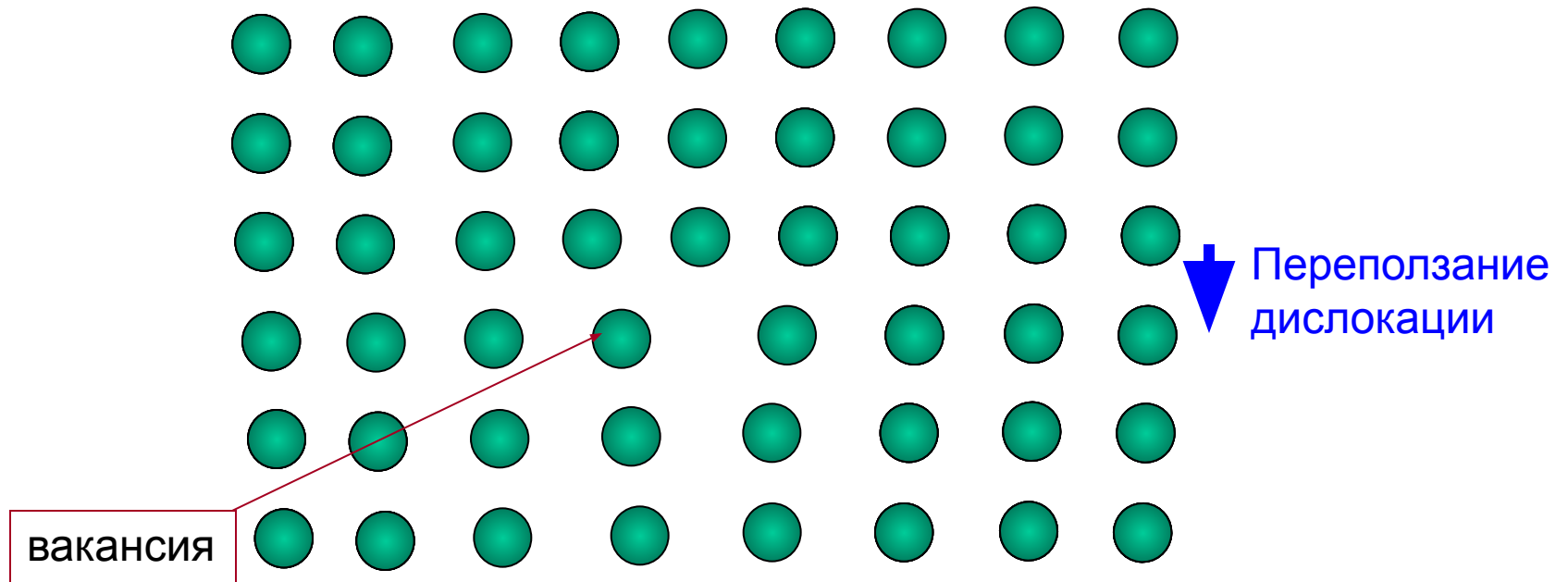
В результате переползания дислокации происходит образование или исчезновение точечных дефектов (вакансий или межузельных атомов).

## Дислокация – сток вакансий

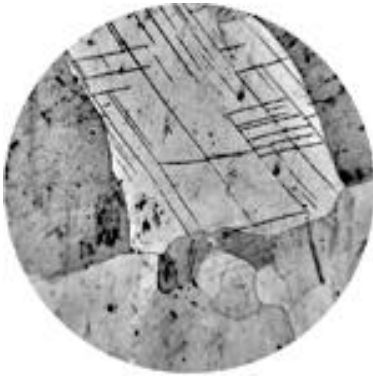


# Переползание дислокаций

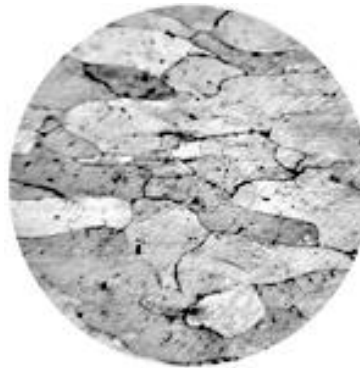
Дислокация – источник вакансий



# Микроструктура стали 05 (0,05 % C) после холодной деформации и нагрева

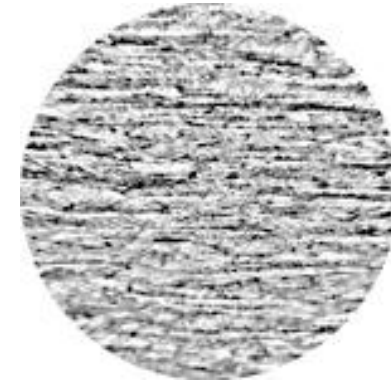


Обжатие 5 %. Твердость НВ 112.  
Однородный феррит с линиями сдвига. Следы деформации (полосы сдвига) в ближайшем сдвиге ближе к направлению максимальных касательных напряжений.



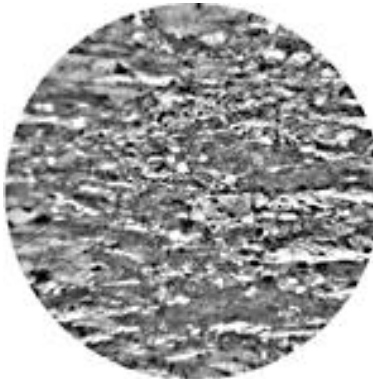
Обжатие 30 %. Твердость НВ 136.

Зерна феррита сжаты в направлении обжатия



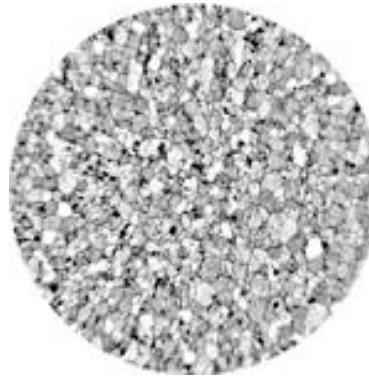
Обжатие 80 %. Твердость НВ 210.

Зерна сжаты в направлении обжатия. Травимость зерен высокая и приближается к травимости границ, что приводит к уменьшению контраста



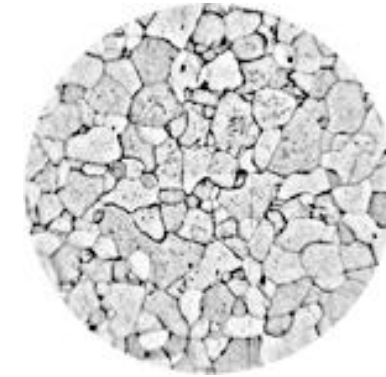
Обжатие 80% и отжиг при 550°C.  
Твердость НВ 109.

Начало первичной рекристаллизации. Среди темных деформированных зерен наблюдаются мелкие светлые равноосные зерна – зародыши рекристаллизации.



Обжатие 80% и отжиг при 600°C.  
Твердость НВ 106.

Мелкие равноосные зерна первичная рекристаллизация окончилась

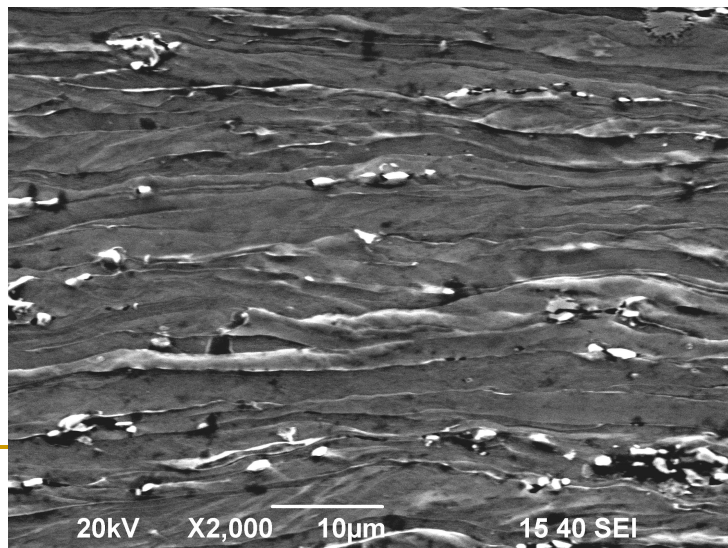
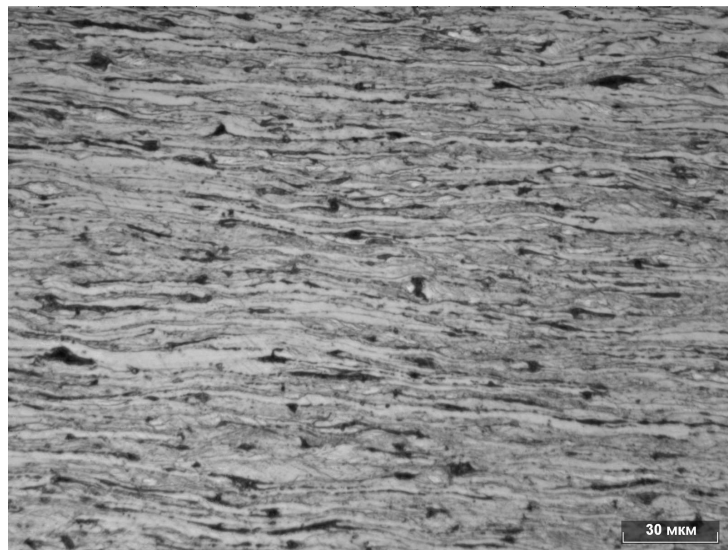


Обжатие 80% и отжиг при 600°C.  
Твердость НВ 104.

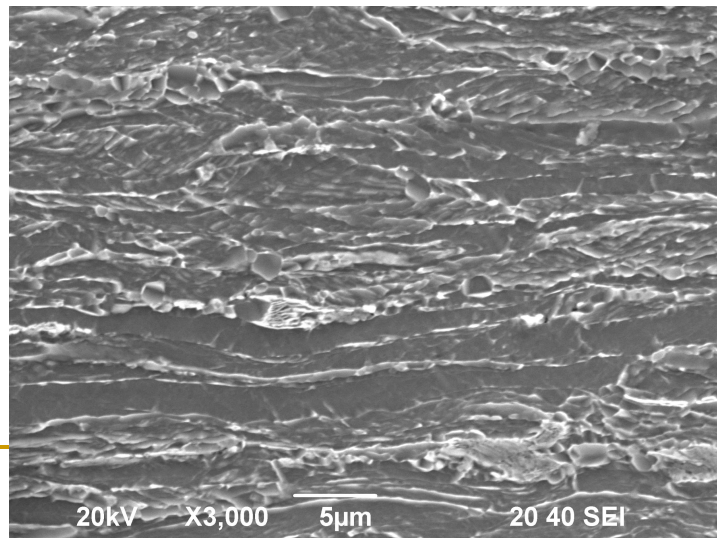
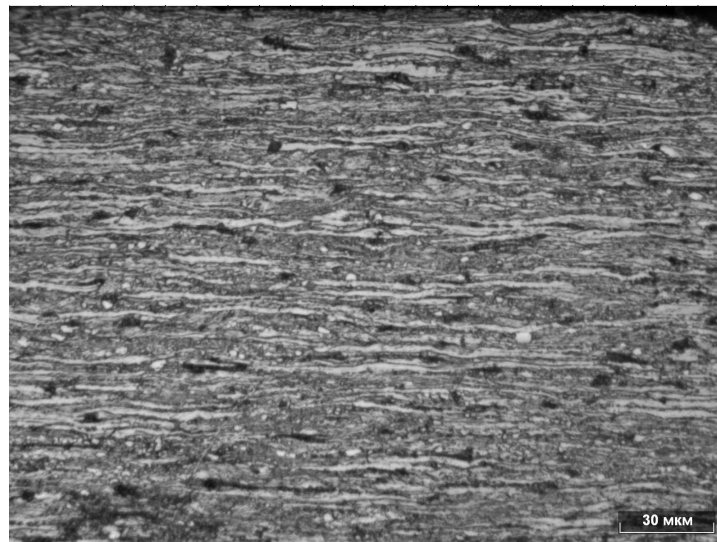
Равноосные зерна. (Результат собирательной рекристаллизации). Структура после холодной пластической деформации и последующего рекристаллизационного отжига качественно не отличается от исходной



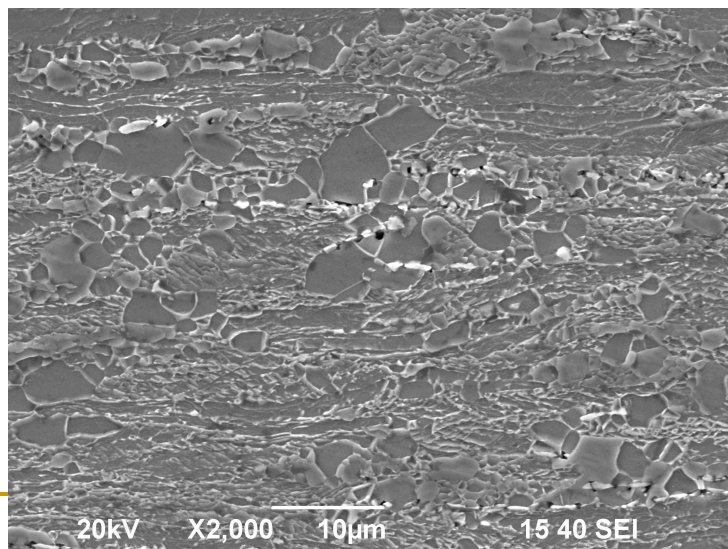
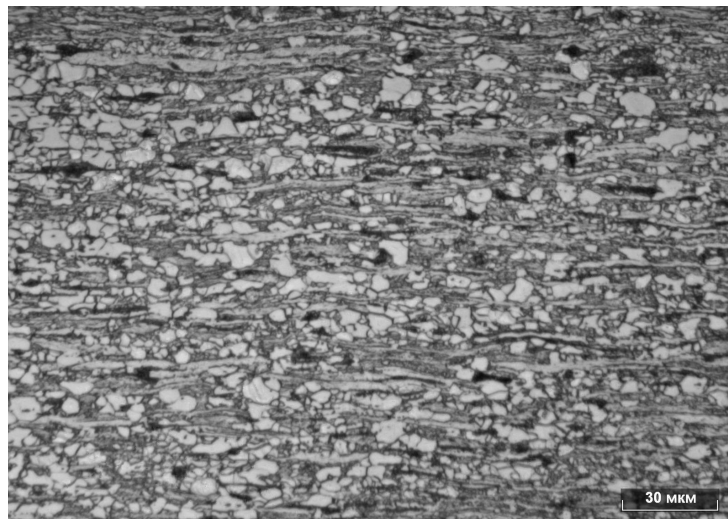
## Структура холоднодеформированной стали 10пс



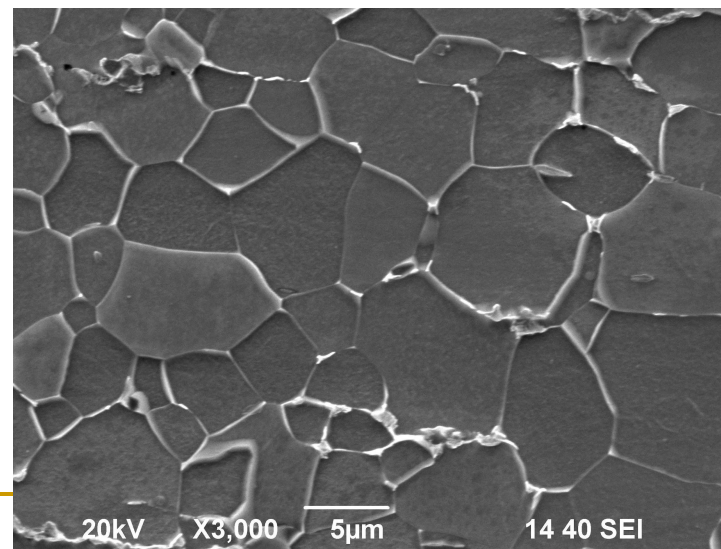
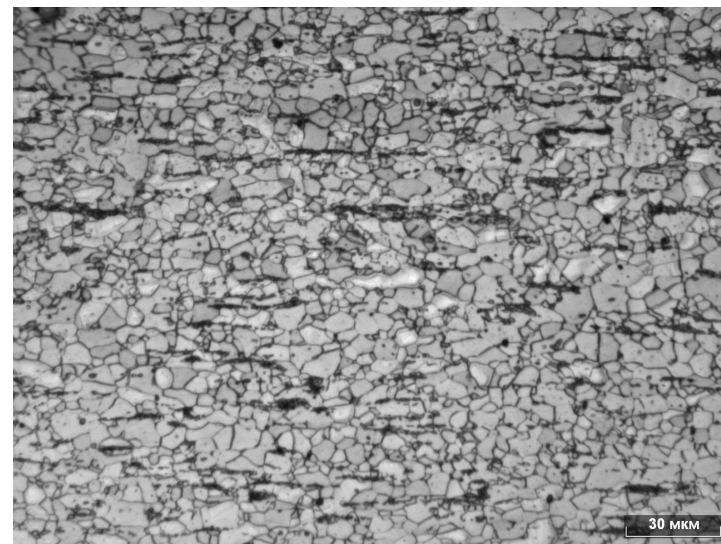
## Начало рекристаллизации в холоднодеформированной стали 10пс – образование зародышей рекристаллизации



Образование новых зародышей  
рекристаллизации и их рост  
в холоднодеформированной стали 10пс



Завершение рекристаллизации в  
холоднодеформированной стали  
10пс





Влияние холодной деформации на свойства низкоуглеродистой стали

Влияние нагрева на свойства холоднодеформированной низкоуглеродистой стали

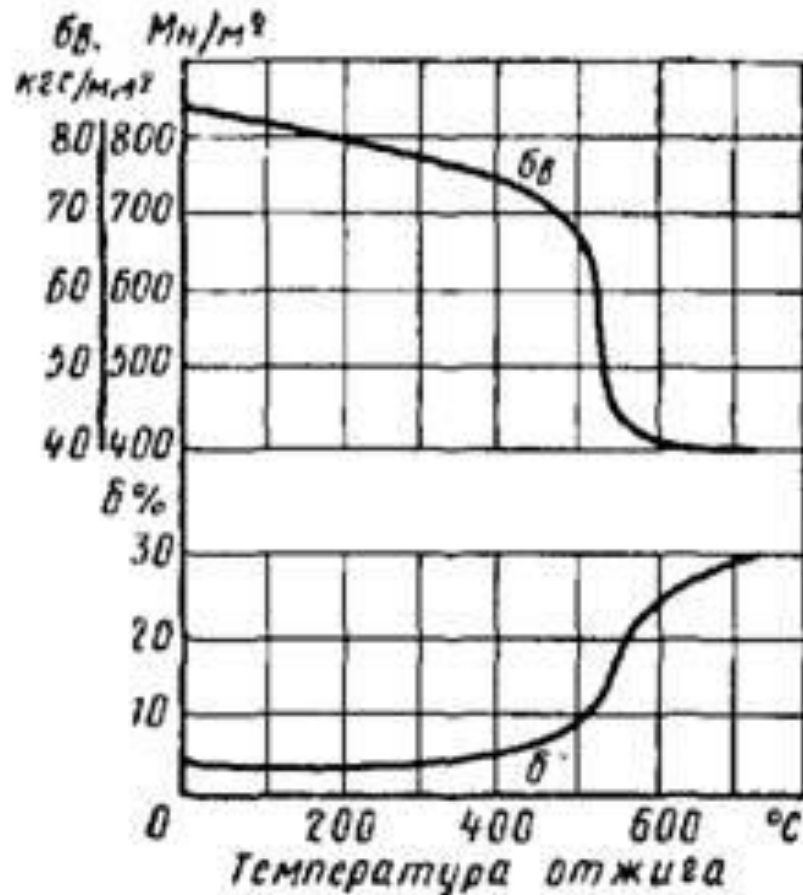
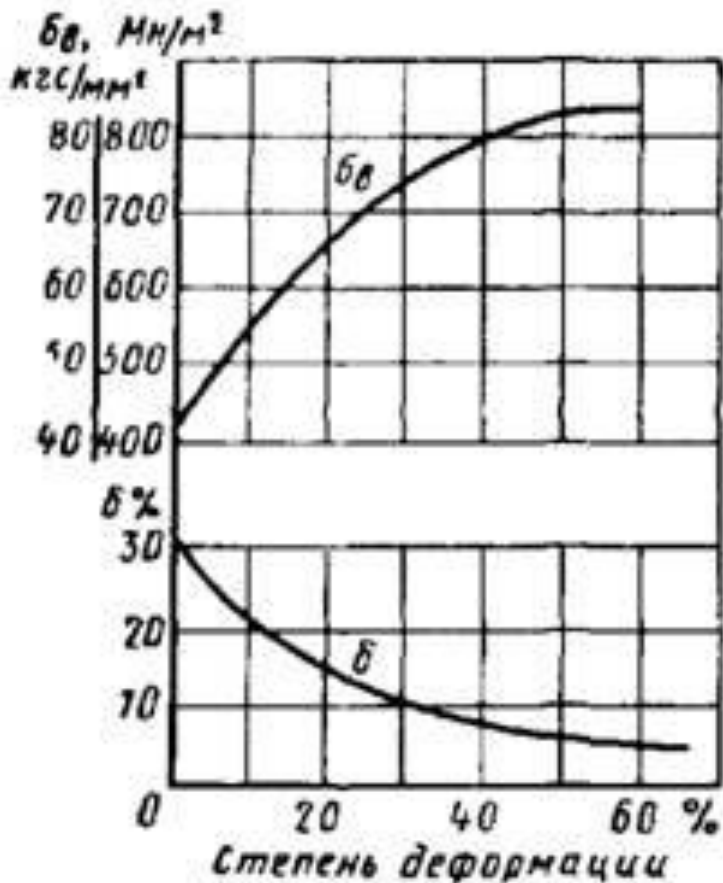
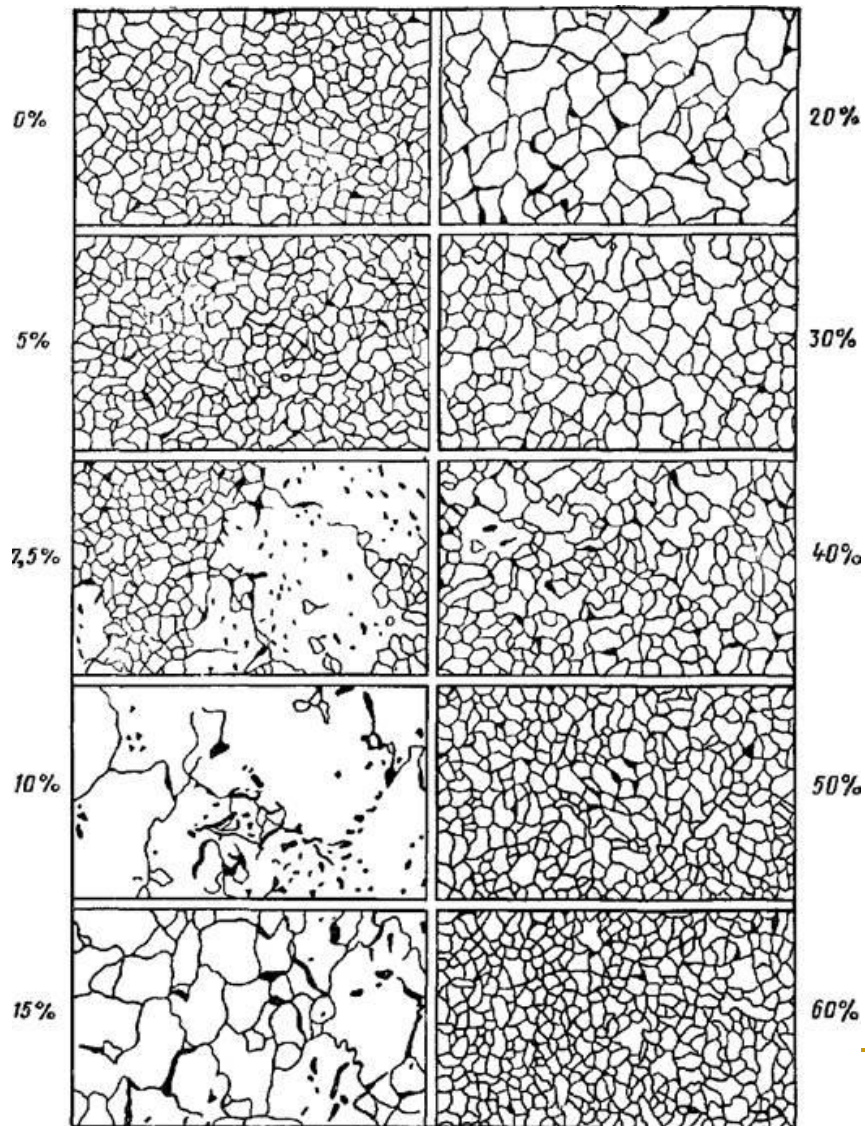




Схема изменения микроструктуры стали 08кп после отжига при 730 °С в зависимости от степени обжатия



Влияние предварительной степени деформации металла на величину зерна после рекристаллизации

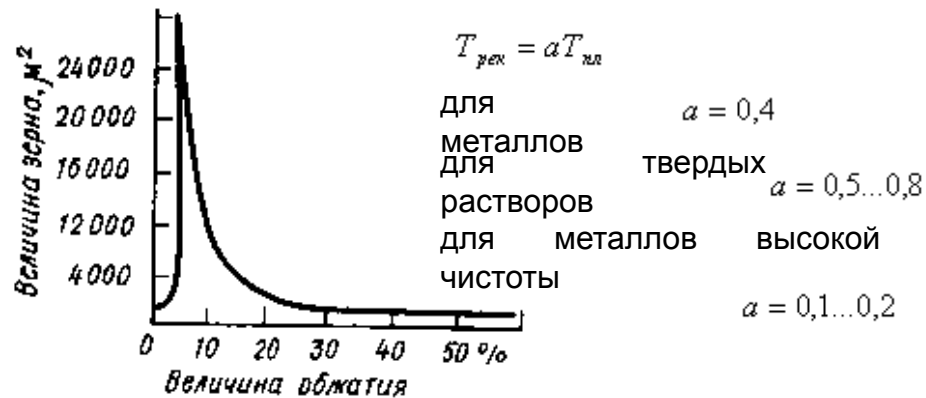


Диаграмма рекристаллизации для железа, деформированного в холодном состоянии

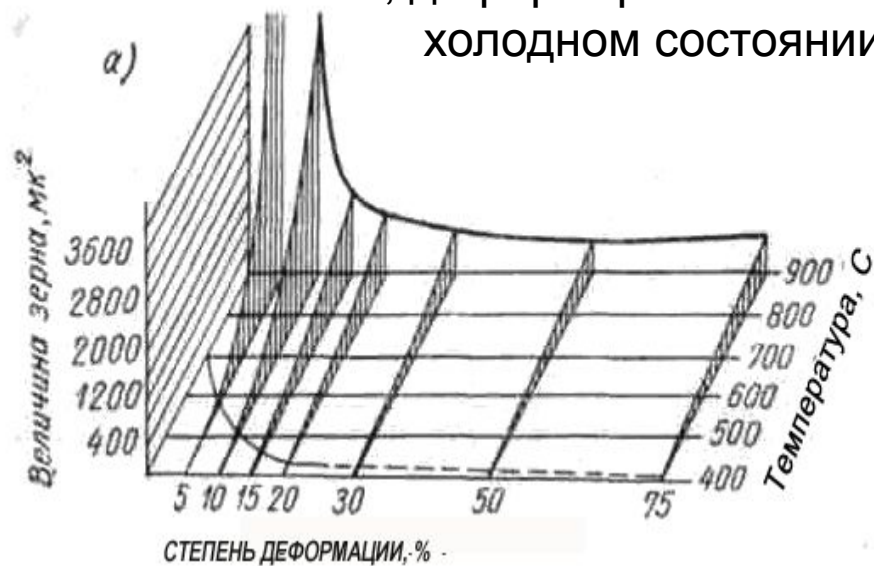
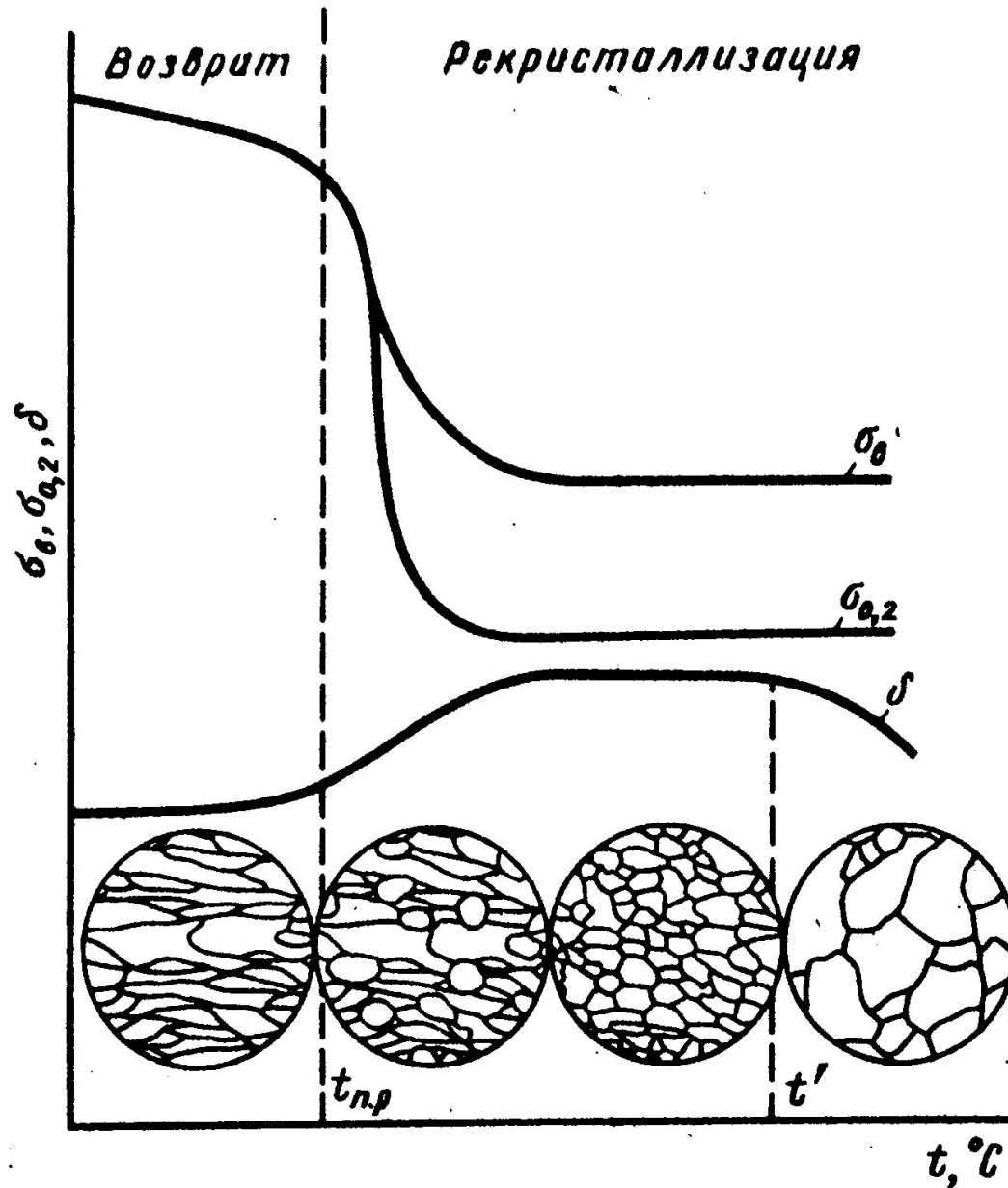


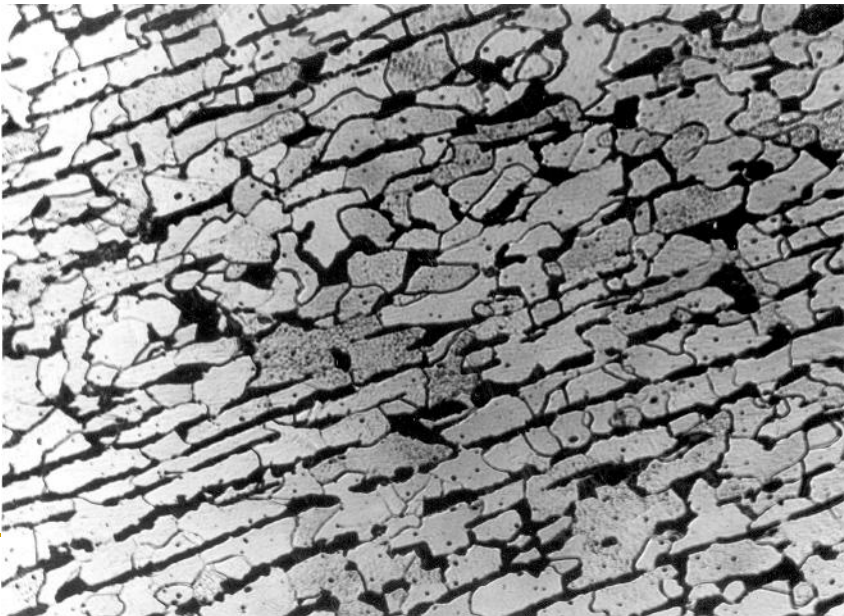
Схема влияния нагрева на механические свойства и структуру деформационно-упрочненного металла



## Микроструктура стали 20 (0,2 % С) после горячей деформации



**Охлаждение на воздухе после горячей прокатки** Твердость НВ 112.  
Полосчатая структура в стали после горячей деформации. Шлиф с боковой поверхности (направление прокатки горизонтально относительно фото; обжатие при прокатке - вертикально). Избыточный феррит (матрица) и перлит (темный)



# Заключение

- При относительно низких приложенных напряжениях у многих материалов наблюдается заметная необратимая (пластическая) деформация
- При нагружении образца осуществляется скольжение
- Сравнение экспериментальных данных и теоретических оценок приводит к выводу о существовании дислокационного механизма пластичности
- Кроме дислокационного имеются диффузионные механизмы пластичности
- Имеются определённые направления скольжения вдоль некоторых кристаллографических плоскостей. Эти направления и плоскости составляют системы скольжения
- Движение дислокаций может осуществляться скольжением и переползанием