



**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
Кафедра «Материаловедение и технология обработки материалов»**

---



**Дисциплины: «Материаловедение-1»,  
«Материаловедение и технологии конструкционных материалов»**

**Раздел -1  
Общие вопросы материаловедения**

**Лекция-2  
ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ  
ДЕФОРМАЦИИ И НАГРЕВЕ**

Гвоздева О.Н.

## 2.1. ПОНЯТИЕ О ДЕФОРМАЦИИ В МЕТАЛЛАХ

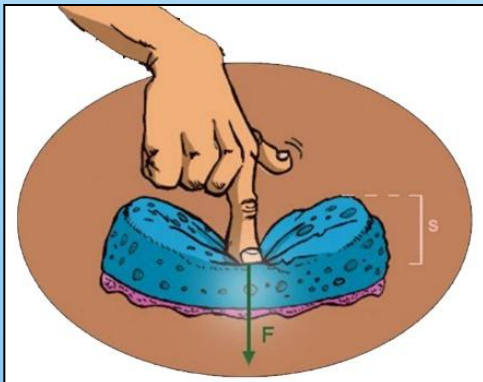
Характерной особенностью металлов и сплавов является способность непрерывно деформироваться вплоть до разрушения под воздействием внешних сил, приложенных к материалу. Процесс деформации складывается из упругой и пластической деформации и завершается разрушением.

### Деформация

#### Упругая (обратимая)

Полностью исчезает после снятия нагрузки.

Сопутствуют упругие напряжения.



#### Пластическая (необратимая)

Возникает при определенных напряжениях для каждого материала.

Характерно наличие остаточной деформацией после снятия нагрузки.

Вызывает изменения в структуре металла

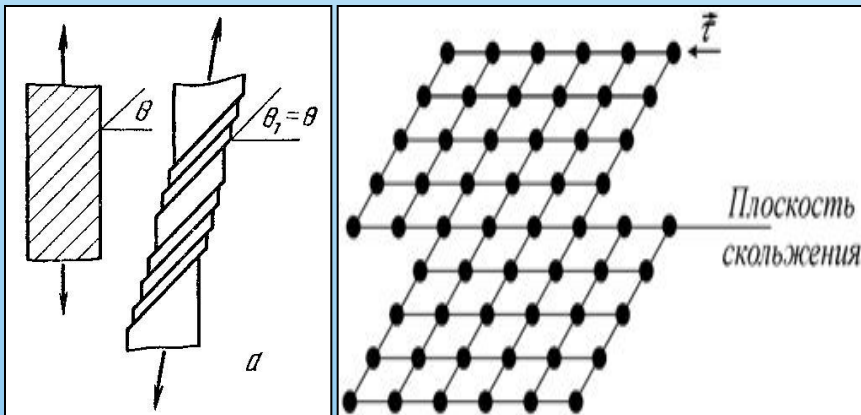


## 2.2. МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

### Основные механизмы пластической деформации

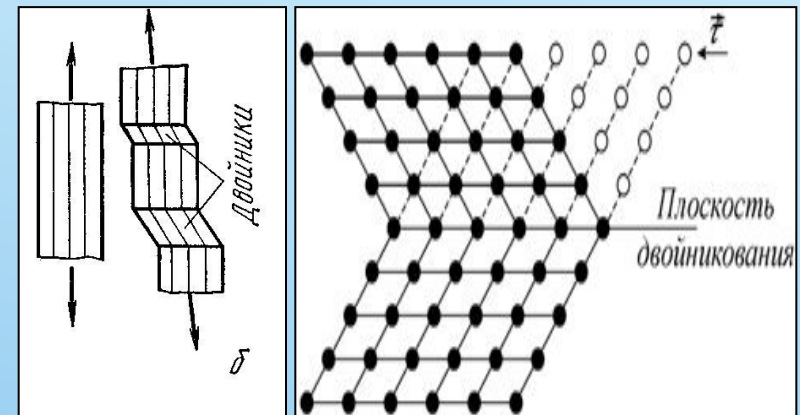
#### Скольжение

Происходит перемещение одной части кристалла относительно другой по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям, имеющим максимальную упаковку атомов.

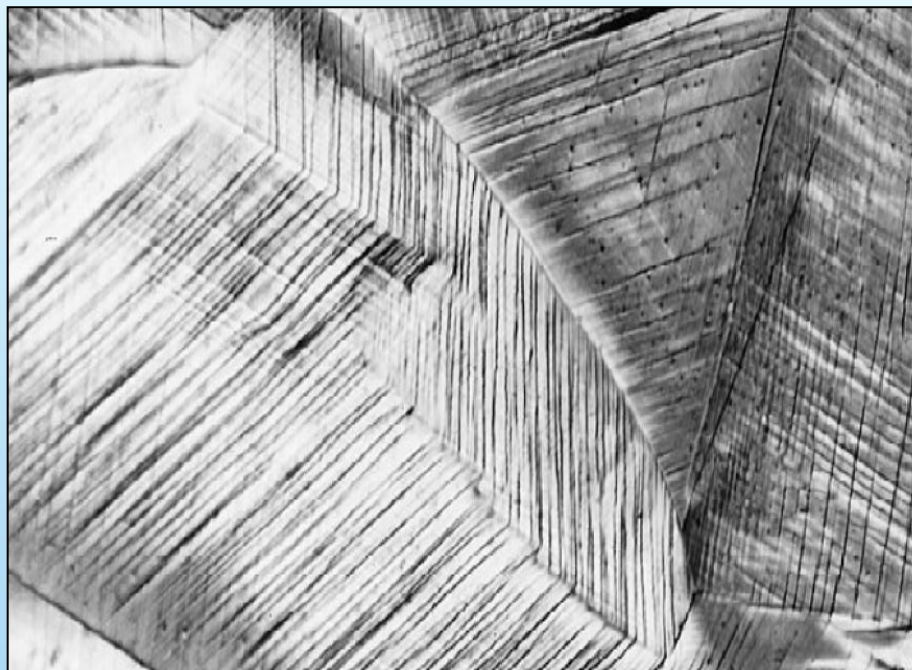


#### Двойникование

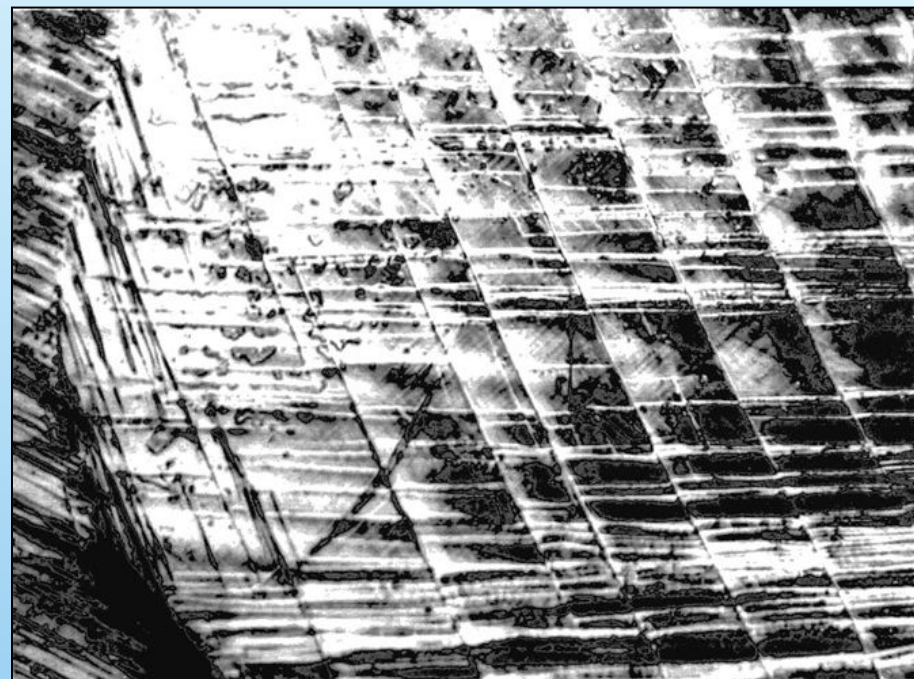
Осуществляется путем поворота одной части кристалла относительно другой и кристаллическая решетка этой части становится зеркальным отражением кристаллической решетки другой части.



Линии скольжения на полированной поверхности деформированной меди,  $\times 173$



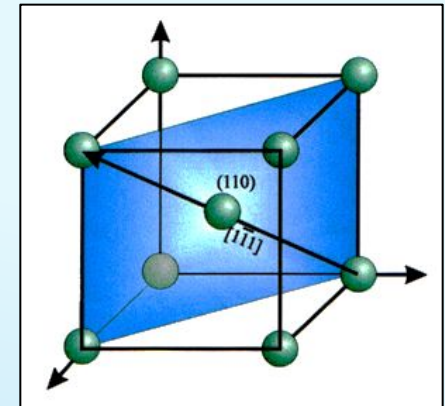
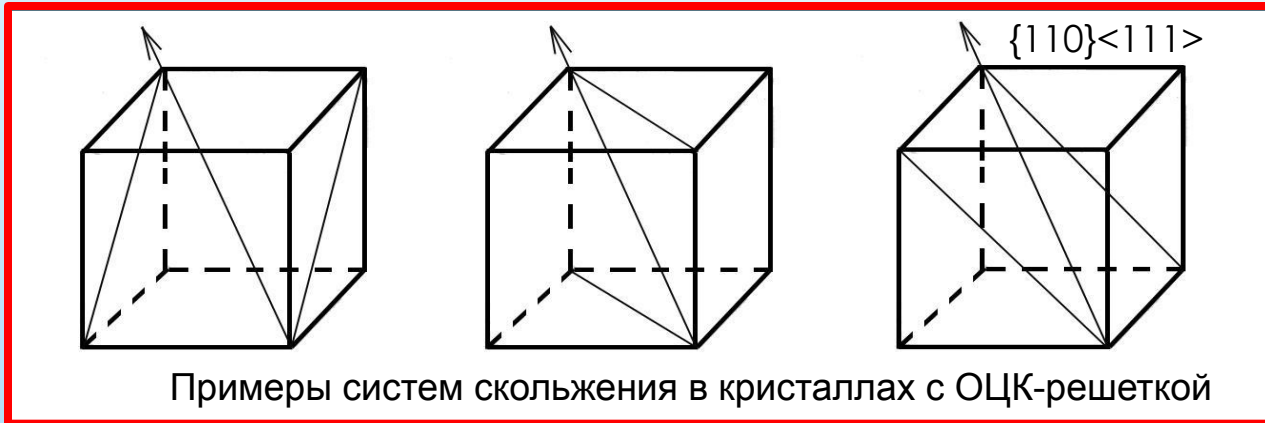
Двойники деформации на полированной поверхности в крупнозернисто литом рении,  $\times 60$





# Плоскости, направления и системы скольжения в ОЦК-решётки

В металлах с ОЦК решеткой направление плотной упаковки совпадает с направлением диагональной плоскости (110), а само скольжение – с направлением диагонали в этой плоскости [111].



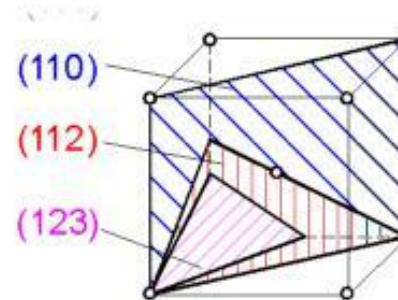
ОЦК

$\{110\}\langle 111\rangle$

12 основных из  
48 возможных  
систем скольжения

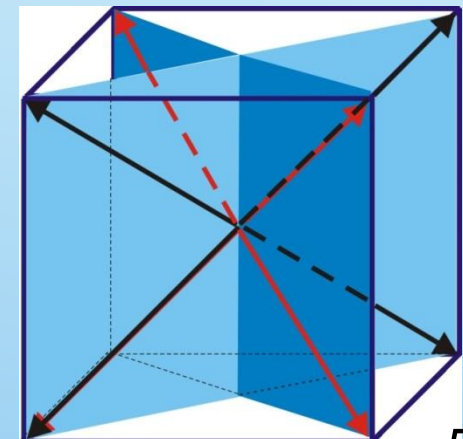
Всего в ОЦК металлах 48 систем скольжения:

- 12 систем типа  $\{110\}\langle 111\rangle$ ,
- 12 систем типа  $\{112\}\langle 111\rangle$ ,
- 24 системы типа  $\{321\}\langle 111\rangle$ .



**6 плоскостей семейства  $\{110\}$  и 2 направления семейства  $\langle 111\rangle$  образуют 12 систем скольжения.**

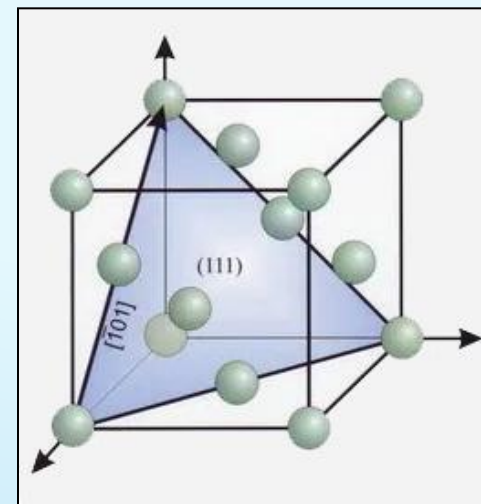
Чем больше число систем возможного скольжения, тем выше пластичность кристалла.



# Плоскости , направления и системы скольжения в ГЦК-решётки

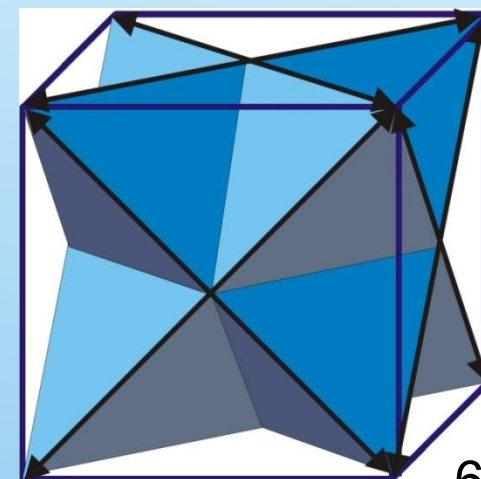
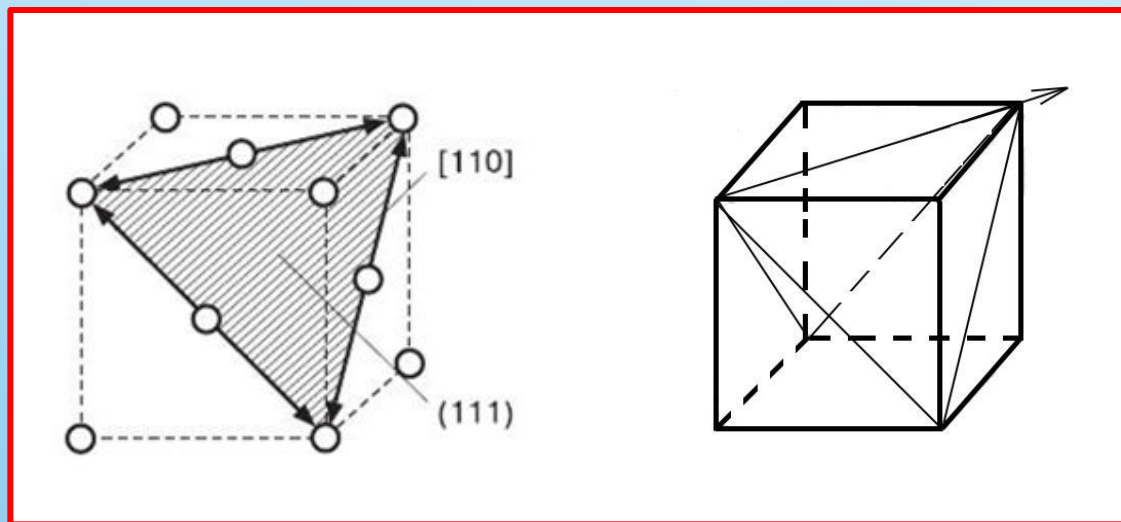
В металлах с ГЦК решеткой внутри элементарной ячейки имеется четыре различных октаэдрических плоскости семейства плоскостей  $\{111\}$  с наиболее плотной упаковкой атомов. В каждой из этих плоскостей имеются три направления плотной упаковки вдоль диагоналей граней  $\langle 110 \rangle$ .

Четыре плотноупакованные плоскости типа (111) могут скользить в трёх направлениях типа [110], поэтому в ГЦК металлах  $3 \cdot 4 = 12$  наиболее вероятных систем скольжения типа  $\{111\} \langle 110 \rangle$ .



ГЦК

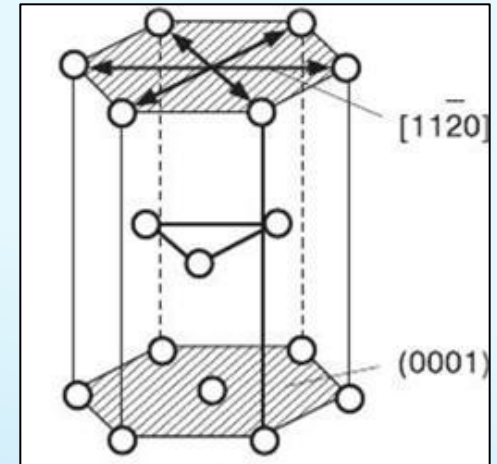
$\{111\} \langle 110 \rangle$   
12 систем  
скольжения



# Плоскости, направления и системы скольжения в ГПУ-решётки

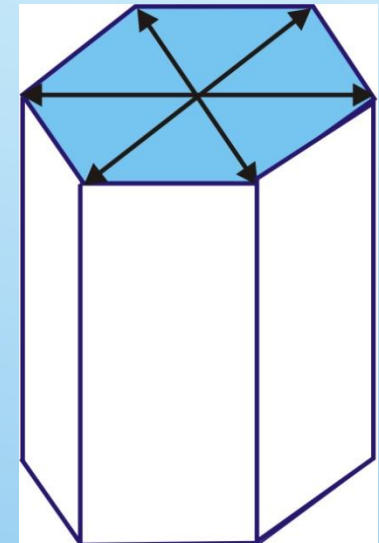
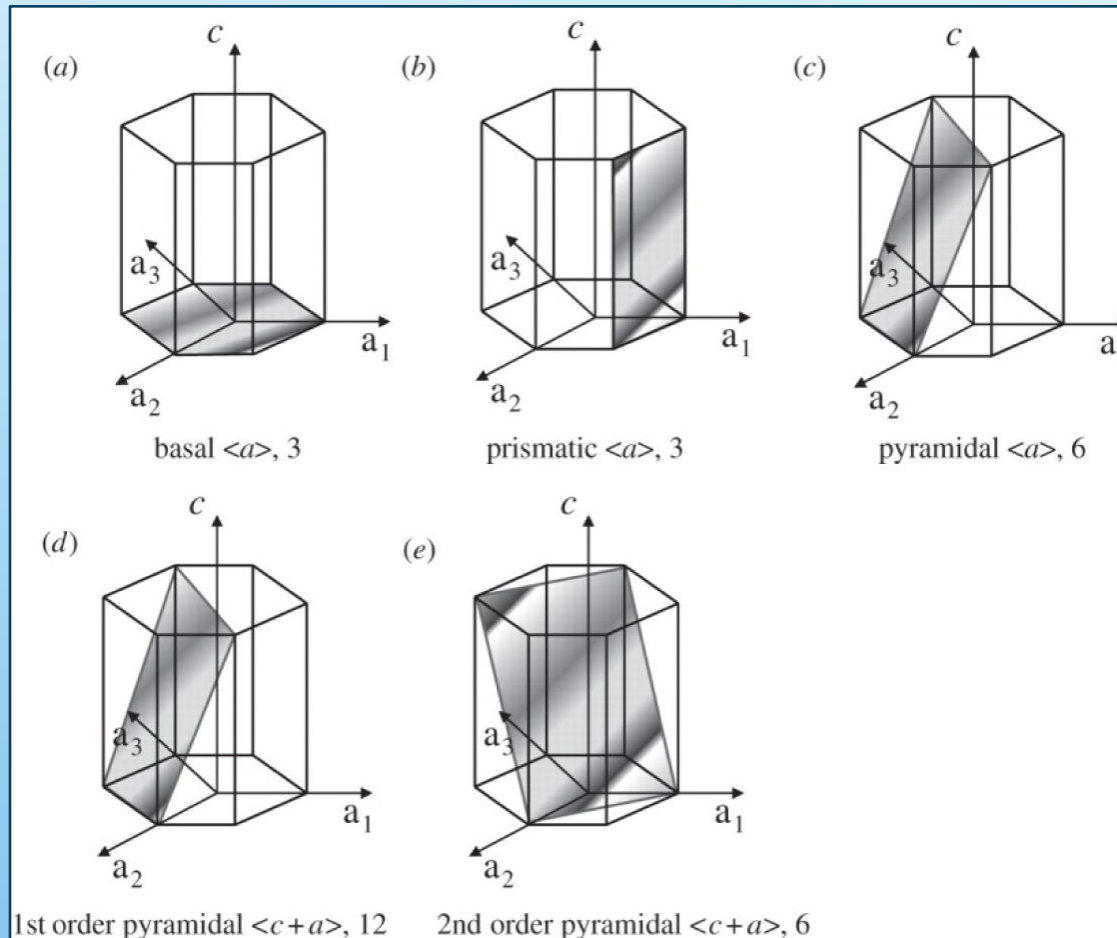
У металлов с ГПУ решеткой существуют базисные  $\{0001\}$ , призматические  $\{10\cdot10\}$  и пирамидальные  $\{10\cdot11\}$  системы скольжения.

В основном скольжение в ГПУ кристаллах совершается в плоскостях, параллельных основанию шестигранной призмы основной ячейки типа  $(0001)$ , в которой имеется три направления минимального расстояния между атомами типа  $[11\bar{2}0]$ .



**ГЦК**

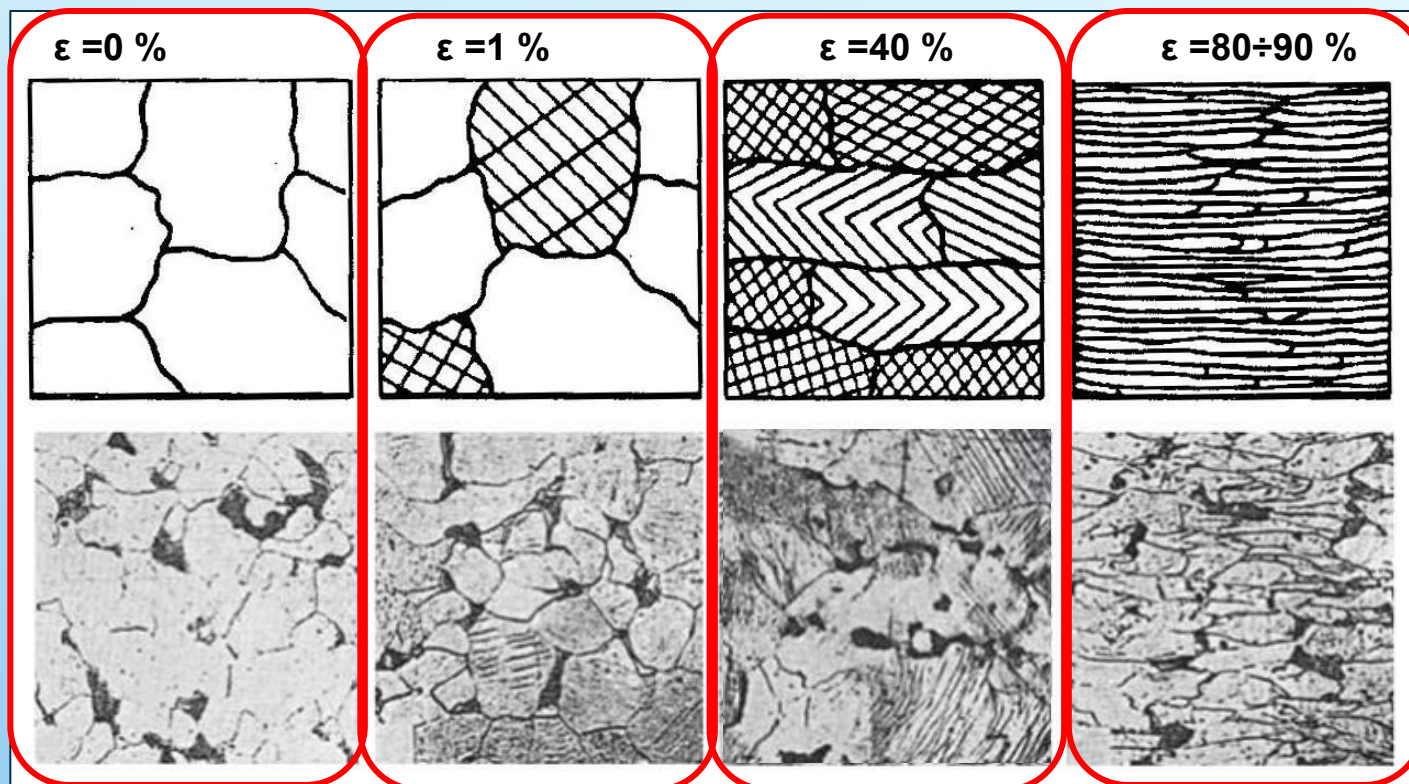
1 плоскость  $\{0001\}$   
 3 направления  $\langle 1120 \rangle$   
 3 системы скольжения



## 2.3. ПОВЕДЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

### Изменение структуры металлов при ПД

При высоких степенях деформации в деформированных полуфабрикатах возникает волокнистая структура с определенной кристаллографической ориентировкой - **текстурой деформации**. Она вызывает **анизотропию свойств** деформированного полуфабриката.



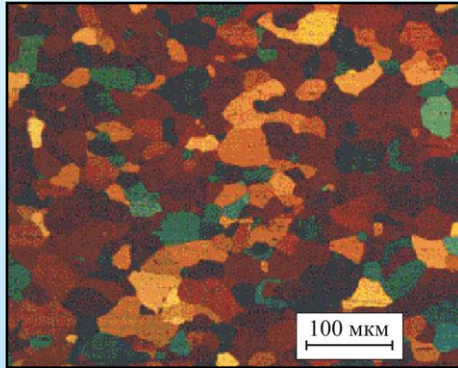
Малоуглеродистая сталь 45  
Структура: (Ф+П),  $\times 250$





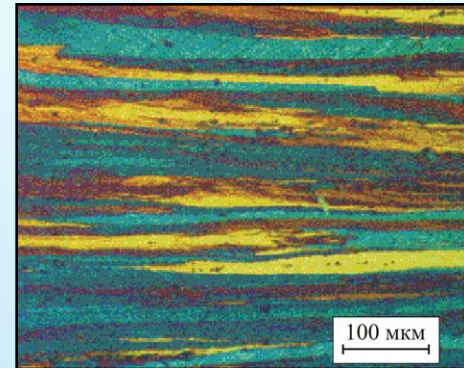
# Структура до и после деформации

Микроструктура алюминиевого сплава ДО деформации

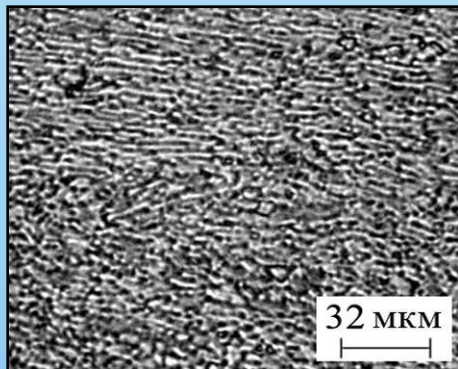


Деформация

Микроструктура алюминиевого сплава ПОСЛЕ деформации

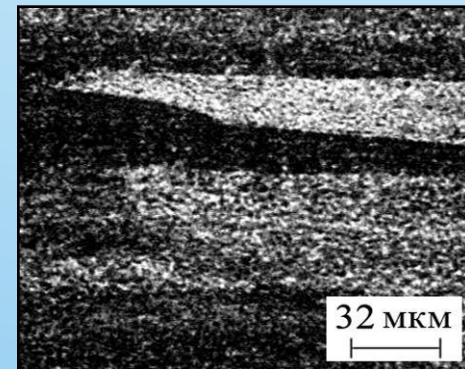


Микроструктура титанового сплава ВТ6 ДО деформации



Деформация

Микроструктура титанового сплава ВТ6 ПОСЛЕ деформации

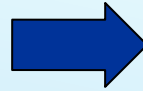


# Изменение свойств металлов при пластической деформации

При пластической деформации происходит не только движение имеющихся дислокаций, но и **образуется огромное количество новых дислокаций** в различных кристаллографических плоскостях и направлениях. Механизм образования - источник Франка-Рида.

Недеформированный кристалл

$$\epsilon=0\%, \rho \approx 10^6 \text{ см}^{-2}$$

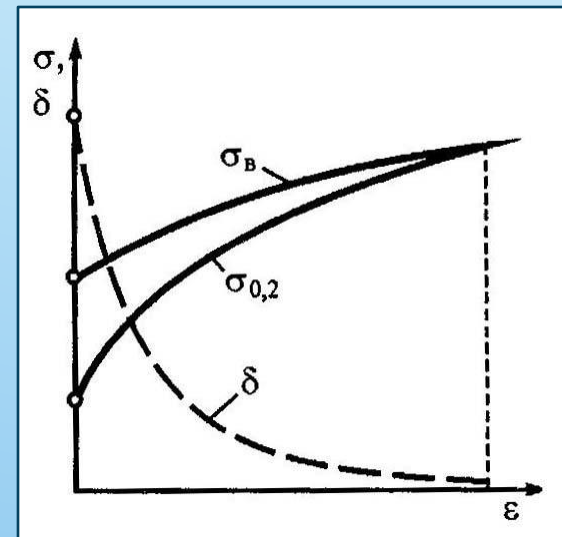
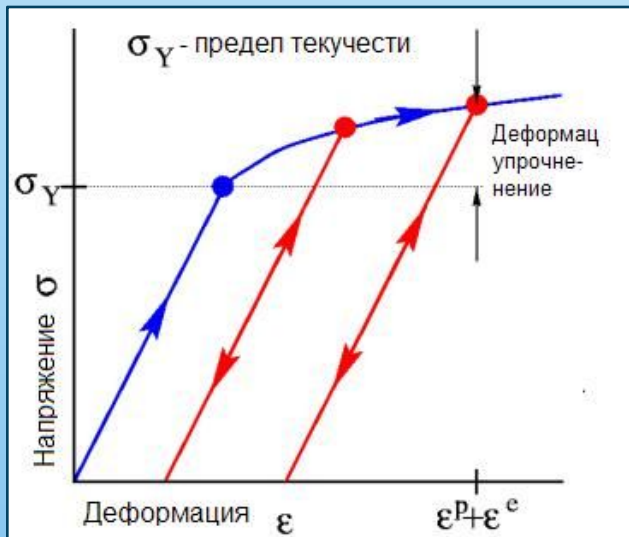


Сильнодеформированный кристалл

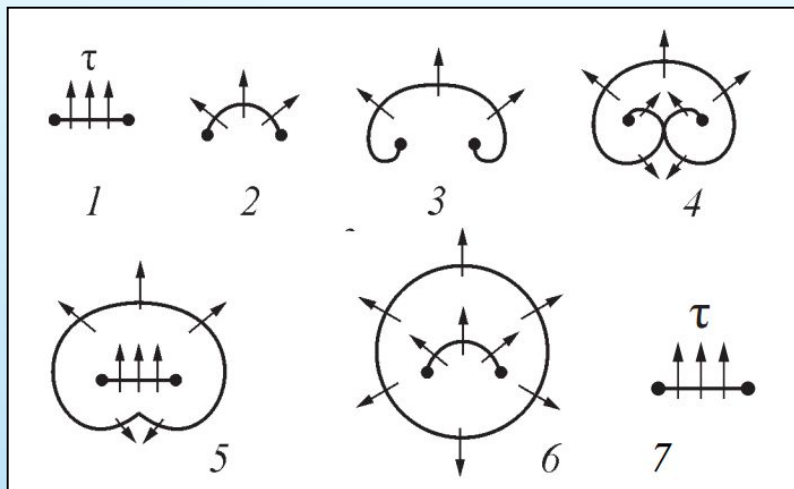
$$\epsilon=70\%, \rho \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$$

Если на пути движения дислокаций встречается препятствие в виде другой дислокации или дефектов другого рода, то процесс движения дислокаций тормозится и необходимы более высокие внешние напряжения, чтобы продеформировать материал. Т.о. происходит **деформационное упрочнение** (наклеп, нагартовка, упрочнение). Оно проявляется в процессе деформации и сохраняется по окончании деформирования.

**Наклеп - это упрочнение и снижение пластичности металла при деформации.**



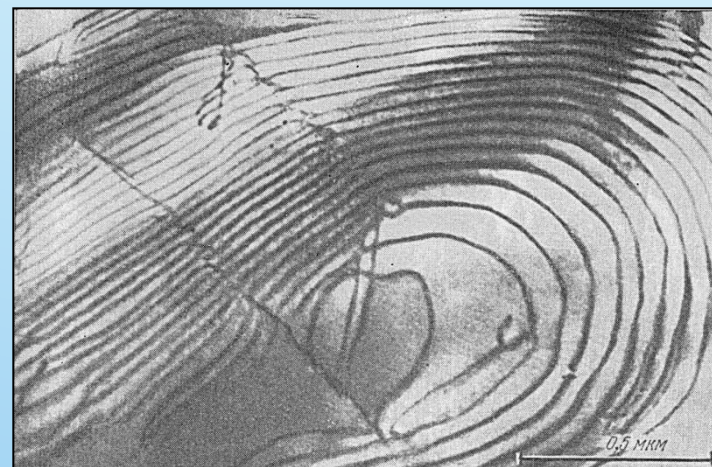
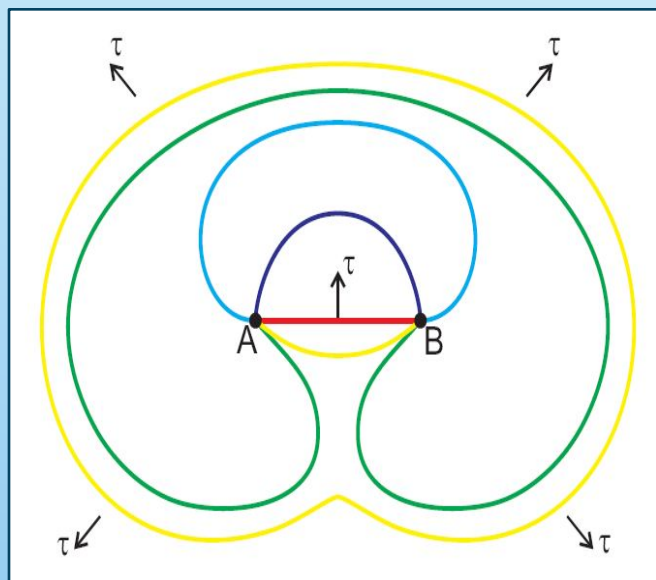
# ИСТОЧНИК ФРАНКА-РИДА



## Последовательность образования новой дислокации при действии источника Франка – Рида:

- Под действием касательного напряжения закрепленная дислокация (1) выгибается, пока не примет форму полуокружности (2).
- С этого момента изогнутая дислокация распространяется самопроизвольно в виде двух спиралей (4).
- При встрече спиралей возникают расширяющаяся дислокационная петля и отрезок дислокации (5, 6).
- Отрезок распрямляется, занимает исходное положение (7), и генератор дислокаций готов к повторению цикла.

**Один источник Франка–Рида способен образовывать сотни новых дислокаций**

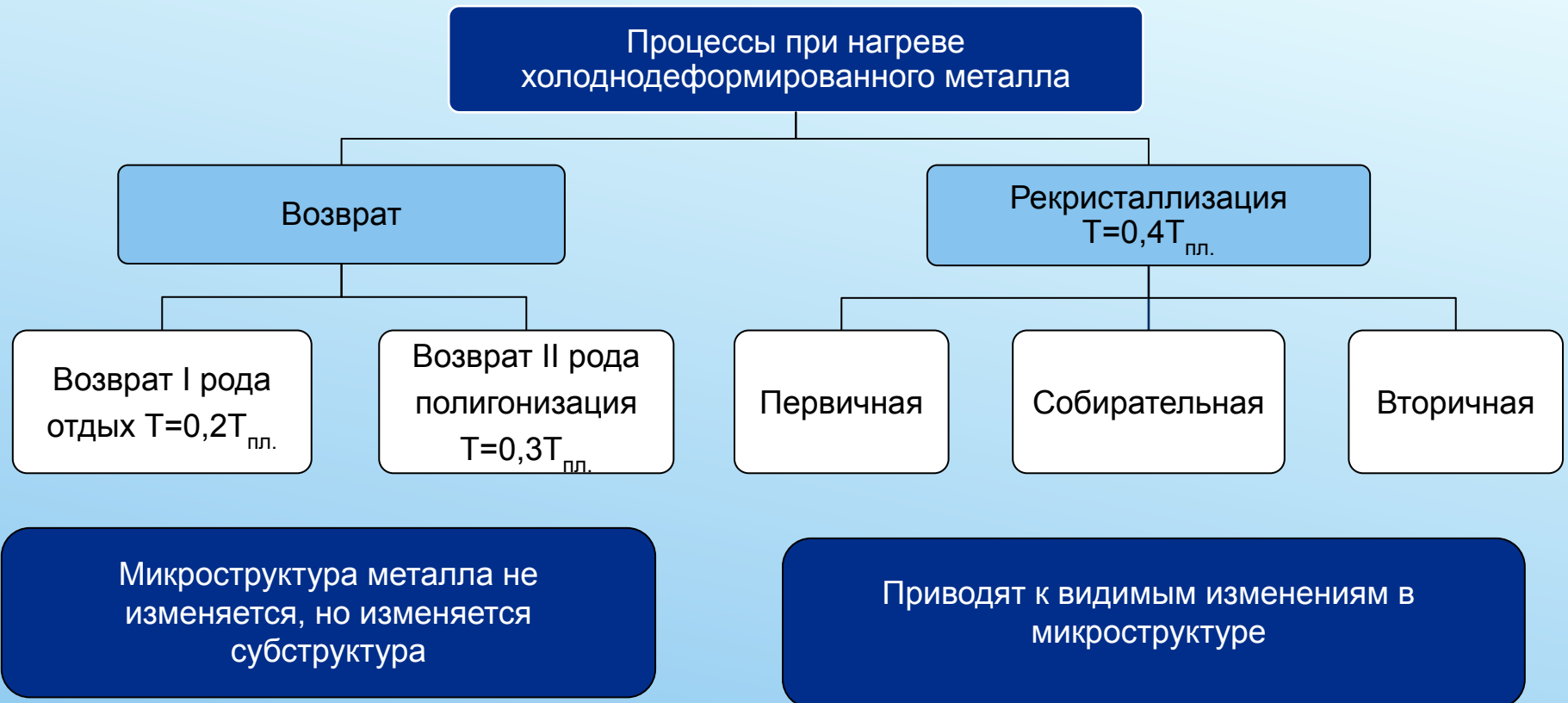


Фотография источника Франка-Рида в сплаве Ni-Fe

**Увеличение количества (плотности) дислокаций в структуре деформированного металлического материала в процессе пластической деформации ведет к повышению прочности.**

## 2.4. ПОВЕДЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА ПРИ НАГРЕВЕ

В термодинамическом отношении холодно деформированные металлы и сплавы являются системой неустойчивой. При воздействии температуры в таком металле будут возникать процессы, ведущие к понижению свободной энергии, изменению структуры и свойств. Эти процессы подразделяют на явления **возврата и рекристаллизации**.





# ПРОЦЕССЫ ВОЗВРАТА ПРИ НАГРЕВЕ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

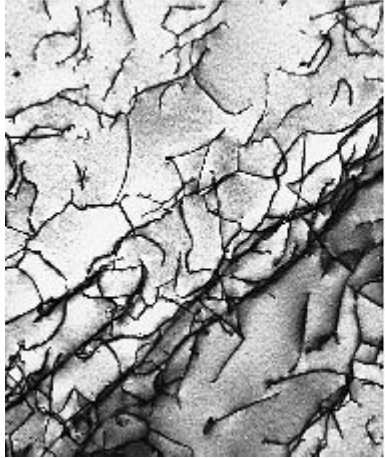
При нагреве  
холоднодеформированного  
металла на  $T=0,2T_{\text{пл}}$  в нем  
развиваются процессы  
**возврат I рода** или **отдыха**

Этим процессам соответствуют: перемещение и аннигиляция точечных дефектов (вакансий), в результате «отдыха» частично снимается напряжение, микроструктура и уровень механических свойств материала практически не изменяются.

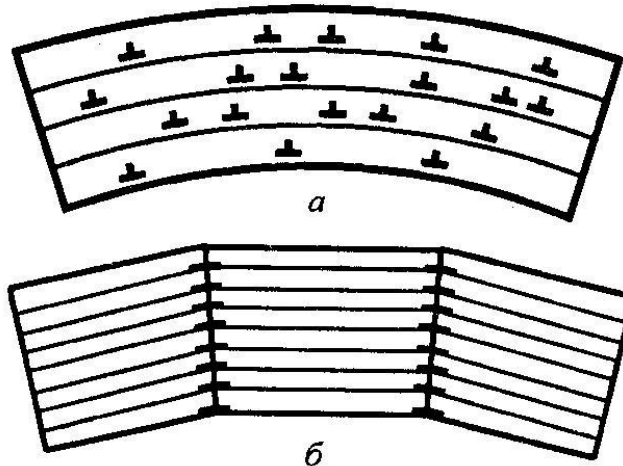
При нагреве  
холоднодеформированного  
металла на  $T=0,3T_{\text{пл}}$  в нем  
возникают процессы  
**возврат II рода** или  
**полигонизации**

- Происходит перемещение дислокаций, дислокации разных знаков аннигилируют (путем слияния в плоскостях скольжения), в результате чего снимается часть напряжений, накопленных металлом в процессе холодной пластической деформации.
- Избыточные дислокации одного знака выстраиваются в дислокационные стенки, что приводит к образованию в зернах поликристалла субзерен (полигонов), свободных от дислокаций и отделенных друг от друга малоугловыми дислокационными границами.

# ПОЛИГОНИЗАЦИЯ И СУБСТРУКТУРА



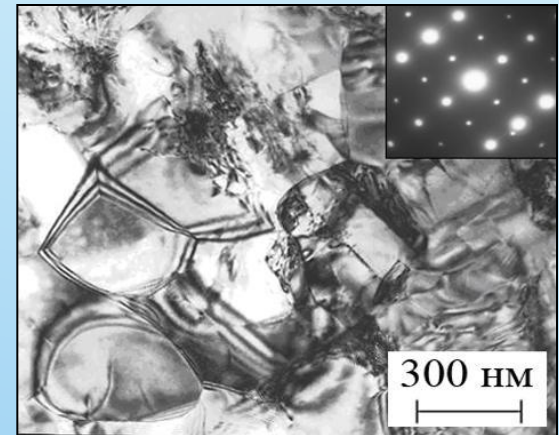
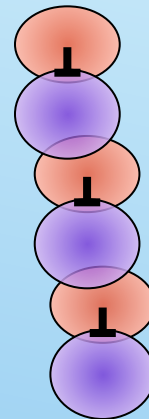
$$\rho_{\perp} = 10^{10-11}/\text{cm}^2$$



Дислокации с противоположными знаками, лежащие в одной плоскости скольжения, при сближении уничтожают друг друга – происходит их **аннигиляция**.

Если такие дислокации лежат в разных плоскостях скольжения, для аннигиляции требуется переползание дислокаций.

Оставшимся дислокациям одного знака энергетически выгодно выстроиться друг под другом в дислокационные стенки - границы полигонов (субзерен) свободных от дислокаций. Угол разориентировки соседних субзерен менее  $5^\circ$  (малоугловые границы).



$$\rho_{\perp} = 10^8 - 10^9 / \text{cm}^2$$

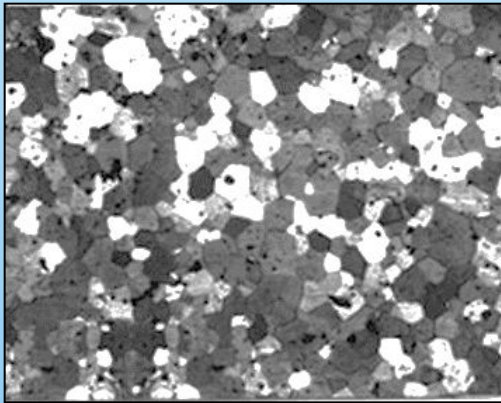
Субструктура в сплаве ВТ6

Изменения субструктуры можно наблюдать с помощью электронного микроскопа.

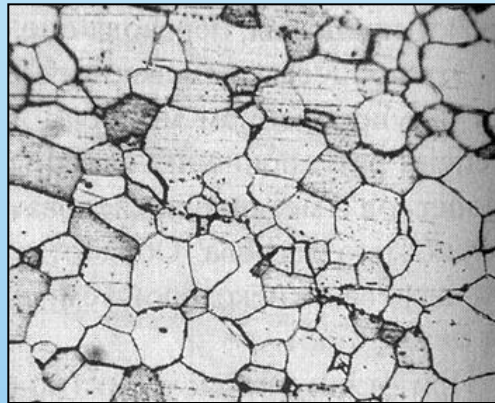
# ПРОЦЕССЫ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

При нагреве  
холоднодеформированного  
металла на  $T=0,4T_{\text{пл}}$  и **выше** в  
нем развиваются процессы  
рекристаллизации

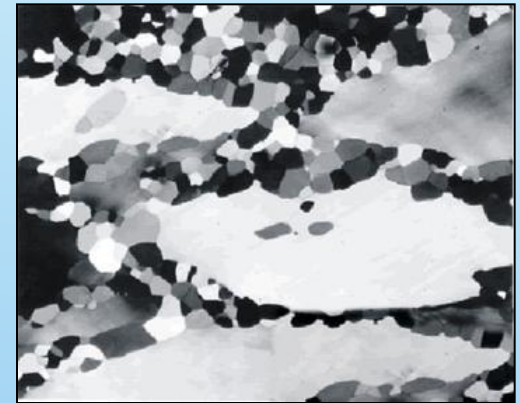
Всего обычно выделяют три кристаллизации: кристаллизация недеформированных зерен, первичную кристаллизацию, подразделяющуюся на первичную, собирательную и вторичную.



Первичная  
рекристаллизация



Собирательная  
рекристаллизация



Вторичная  
рекристаллизация

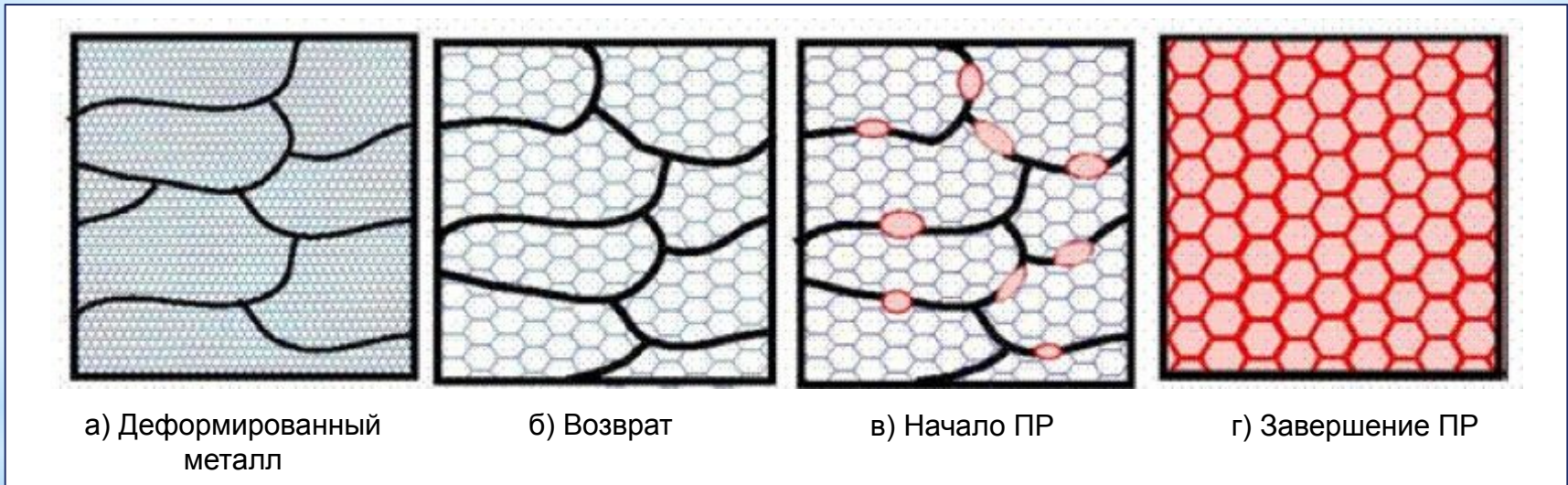
# ПЕРВИЧНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

**Первичная рекристаллизация (ПР)** – это процесс образования и роста новых, недеформированных зерен, отделенных от волокнистой матрицы высокоугловыми границами.

Движущей силой процесса первичной рекристаллизации является энергия, накопленная металлом в процессе пластической деформации.

Величина рекристаллизованного зерна зависит:

- от степени деформации,
- температуры нагрева
- времени выдержки при этой температуре.



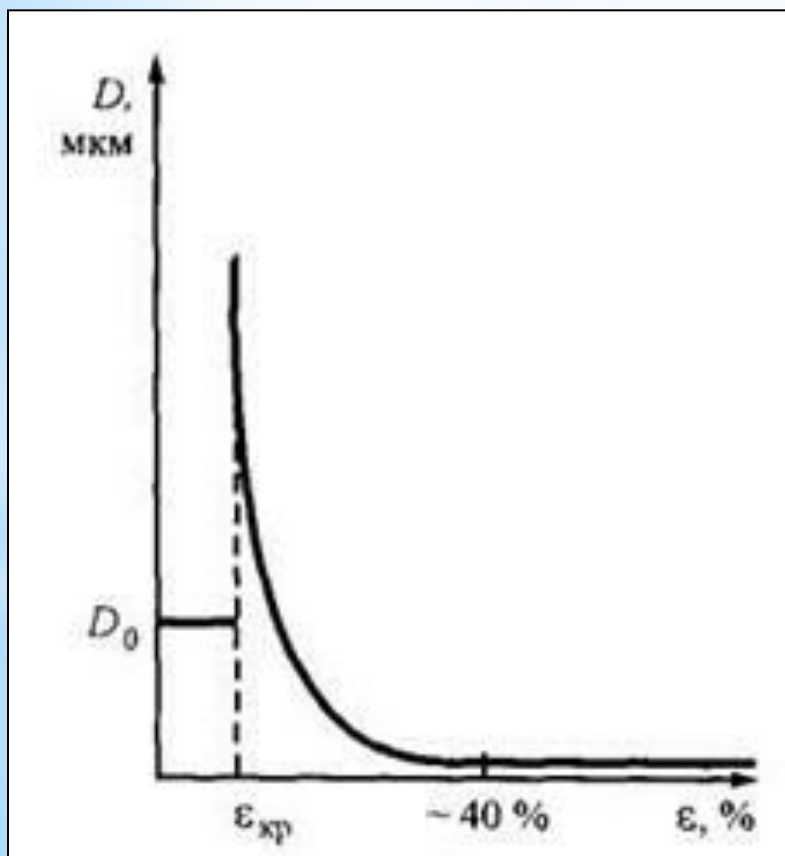
Новые рекристаллизованные зерна в первую очередь возникают в волокнистой структуре холоднодеформированного металла в местах с максимальной плотностью дислокаций: на межзеренных и на межфазных границах. В результате протекания процесса первичной рекристаллизации волокнистая структура деформированного металла заменяется на мелкозернистую равноосную - рекристаллизованную структуру.



## Температурный порог рекристаллизации

**Температура начала рекристаллизации металла** – это температура, при которой в структуре деформированного металла появляются первые рекристаллизованные зерна.

**Температурный порог рекристаллизации** – минимальная температура начала первичной рекристаллизации, протекающей в структуре холоднодеформированных металлов со степенями деформации порядка 70 %.



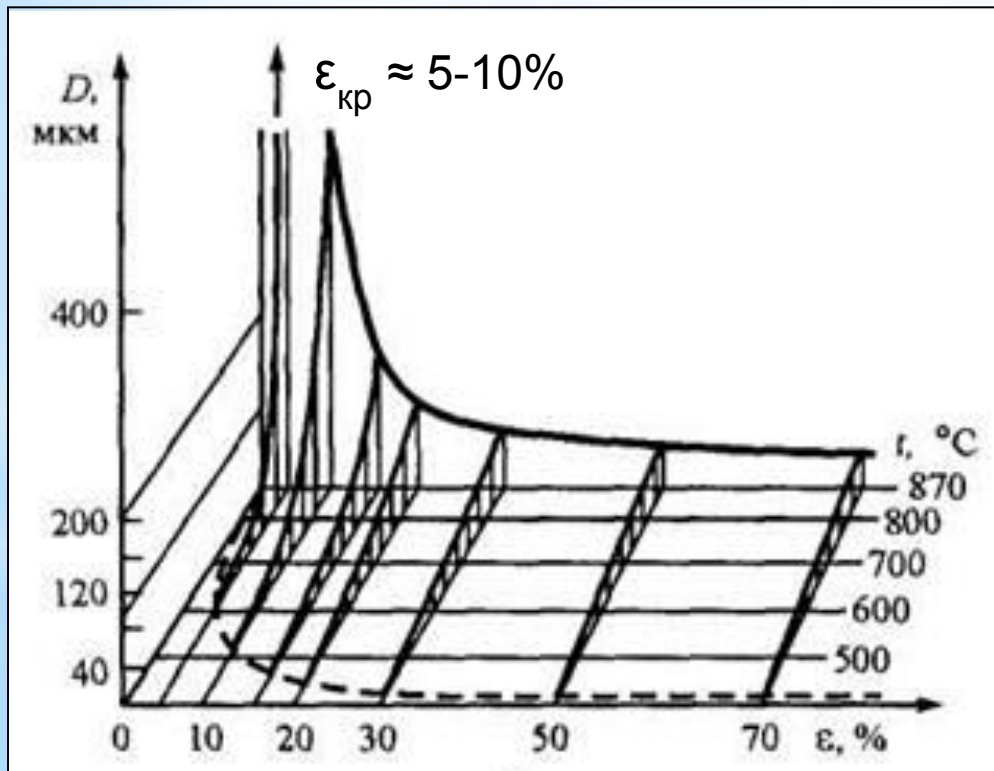
**Чем выше степень предварительной холодной пластической деформации, тем ниже температура начала первичной рекристаллизации и мельче рекристаллизованное зерно.**

Зависимость размера зерна рекристаллизованного металла от степени деформации:

- $D_0$  – размер исходного зерна;
- $\epsilon_{кр}$  – критическая степень деформации (1-15%);
- $\epsilon < \epsilon_{кр}$  – докритическая степень деформации;
- $\epsilon > \epsilon_{кр}$  – закритическая степень деформации.

## Зависимость размера зерна рекристаллизованного металла от степени деформации и температуры

**Критическая степень деформации** – это минимальная степень деформации, при которой накапливается достаточное количество избыточной свободной энергии, необходимой для протекания процессов рекристаллизации при нагреве холоднодеформированного полуфабриката. При критических степенях деформации после отжига в структуре наблюдается максимальный размер зерна.



При  $\epsilon_{кр}$  плотность дислокаций еще не так велика и неодинакова в соседних зернах. Поэтому происходит слияние нескольких мелких зерен в одно большое (коалесценция) за счет аннигиляции дислокаций разных знаков и «исчезновения» таким путем границ между зернами.

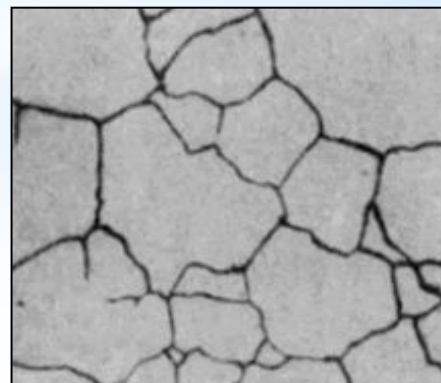
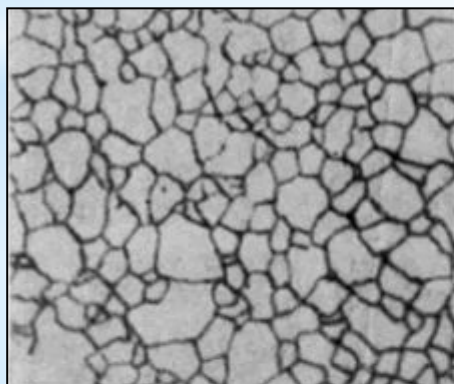
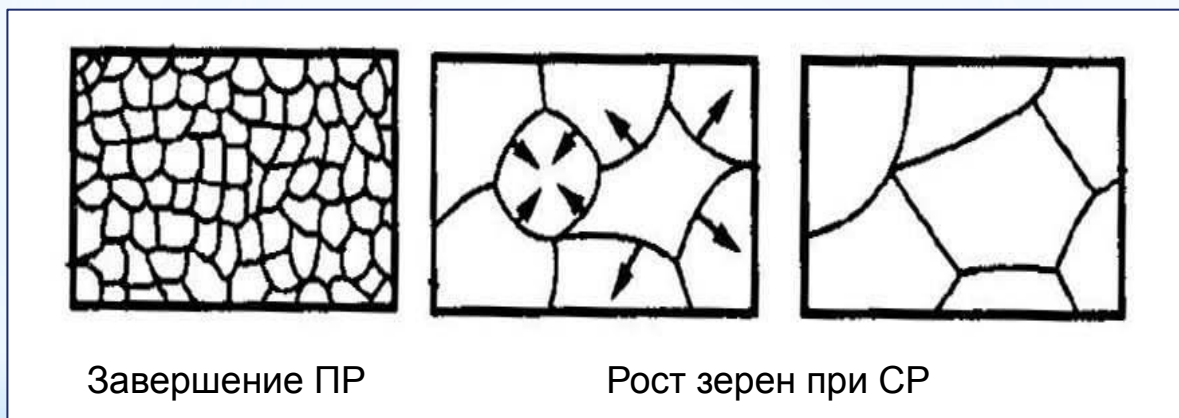
При большей степени деформации этот механизм постепенно сменяется нормальным механизмом первичной рекристаллизации.

# СОБИРАТЕЛЬНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Повышение температуры нагрева и времени выдержки вызывает **самопроизвольный рост рекристаллизованного зерна** – в структуре происходят процессы **собираательной либо вторичной рекристаллизации**.

Это самопроизвольные процессы, определяемые стремлением к уменьшению свободной энергии системы, за счет уменьшения поверхностной энергии границ зерен, которая понижается с увеличением размера зерен, т.к. уменьшается протяженность границ.

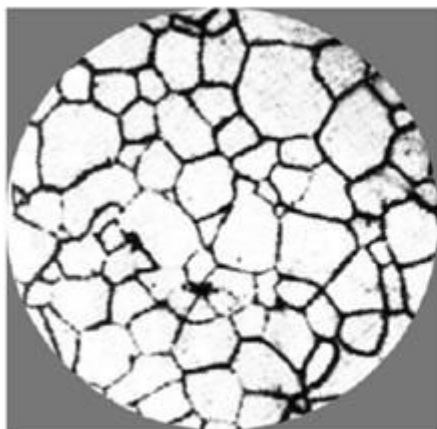
**Собираательная рекристаллизация (СР)** – это процесс нормального одновременного роста рекристаллизованных зёрен



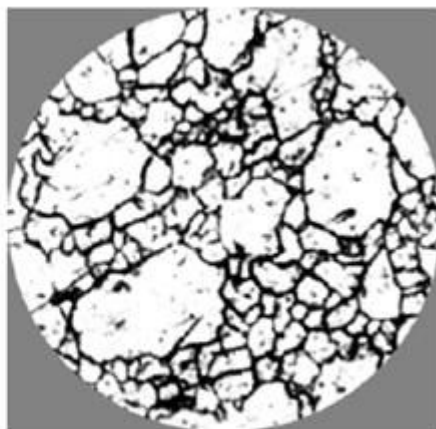


## ВТОРИЧНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

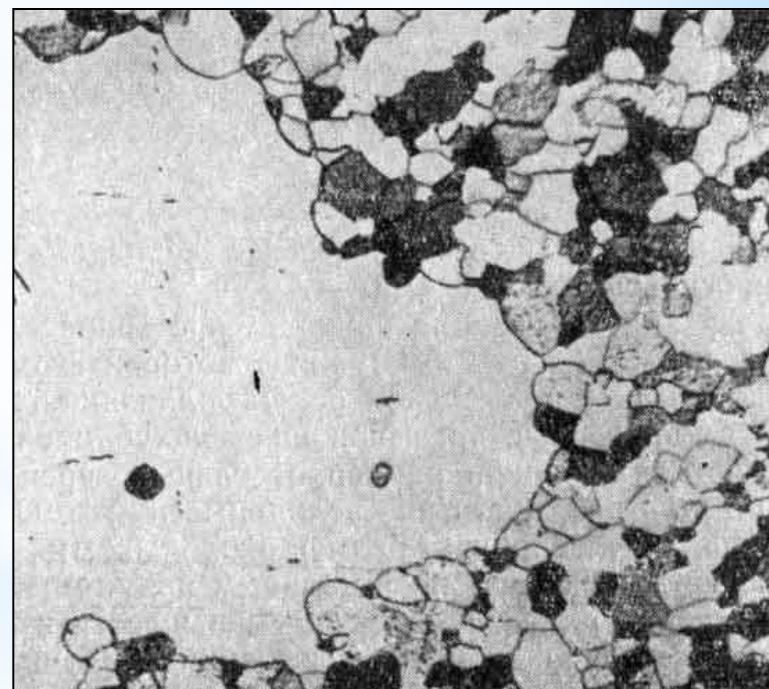
**Вторичная рекристаллизация (ВР)** характеризуется тем, что нормальный рост рекристаллизованных зерен внезапно прерывается очень быстрым ростом нескольких зерен до размера ~см. Остальные рекристаллизованные зерна остаются очень мелкими и затем постепенно поглощаются большими зернами.



Результат СР



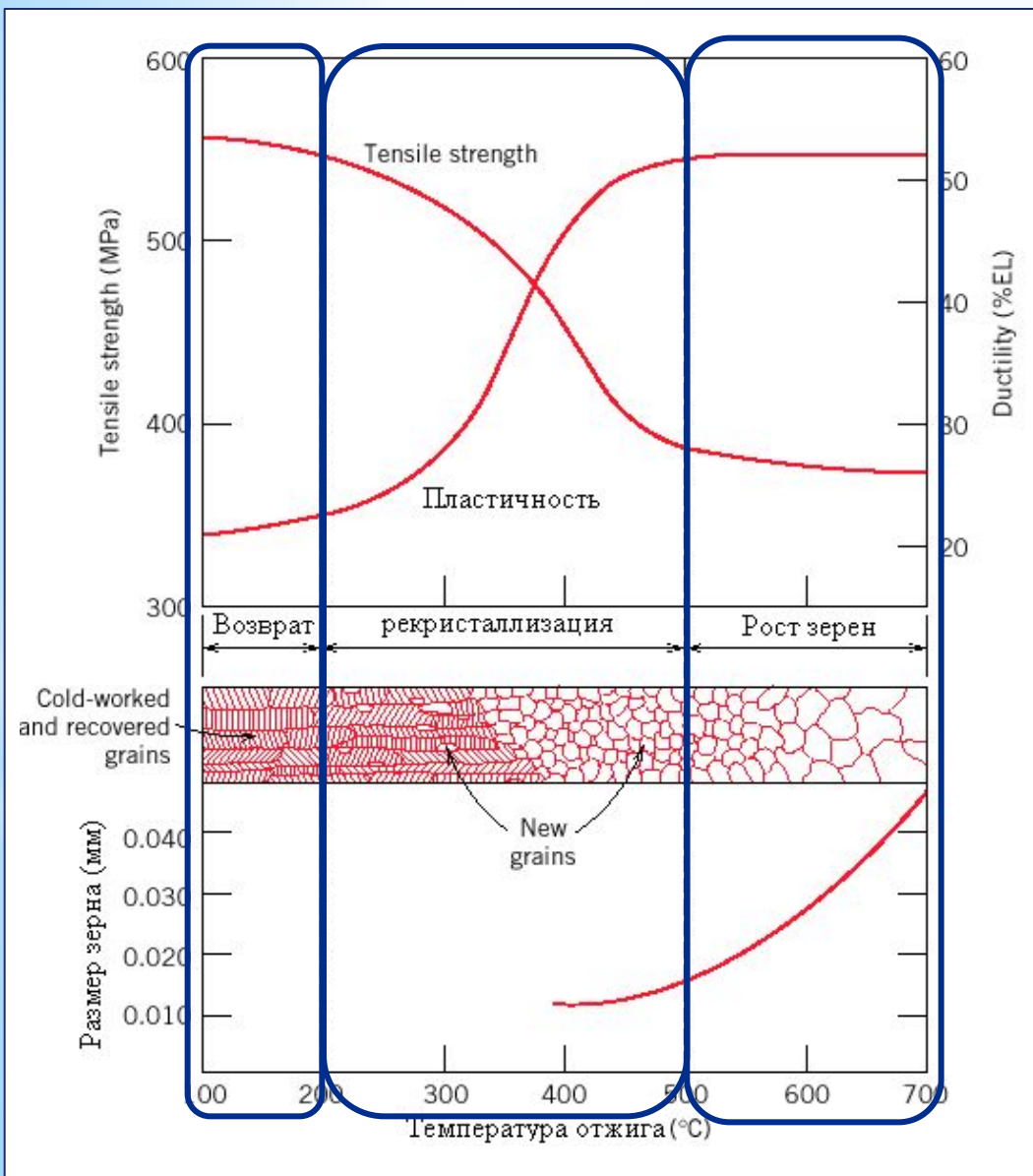
Результат ВР





# Изменение свойств металла при рекристаллизации

При нагреве пластически деформированного металла наряду с изменением его структуры происходит изменение свойств.



При температурах возврата (отдыха и полигонизации):

- наблюдается некоторое разупрочнение;
- характеристики пластичности несколько повышаются
- Видимых изменений в структуре нет

При температуре первичной рекристаллизации:

- резко снижаются показатели прочности,
- сильно повышается пластичность
- зёрна приобретают равноосную форму

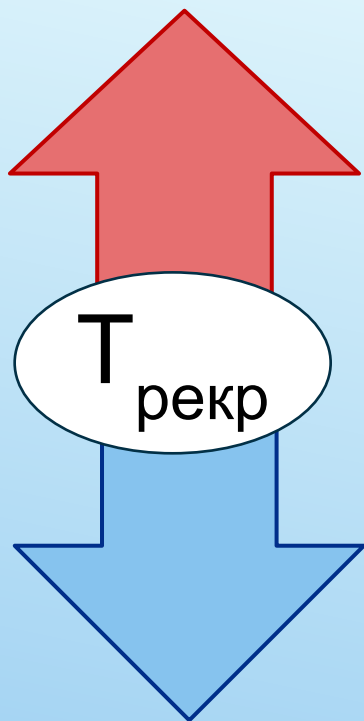


**Первичная рекристаллизация приводит к полному снятию наклепа (упрочнения), созданного при пластической деформации.**

При температурах собирательной и вторичной рекристаллизации (дальнейший нагрев или увеличение времени выдержки):

- пластичность плавно снижается,
- зёрна укрупняются

## 2.5. РАЗДЕЛЕНИЕ НА ХОЛОДНУЮ И ГОРЯЧУЮ ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛОВ



**Горячая пластическая деформация** – это деформация, которая осуществляется при температурах выше температуры рекристаллизации.

- Такая деформация сопровождается рекристаллизацией, в результате которой наклеп устраняется.
- Обработку давлением при температурах выше температуры рекристаллизации называют горячей обработкой давлением.

**Холодная пластическая деформация** – это деформация, которая происходит при температурах ниже температуры рекристаллизации.

- Такая деформация приводит к наклепу металла или сплава.
- Обработку давлением при температурах ниже температуры рекристаллизации называют холодной обработкой давлением.

При нагреве металла выше  $t_{\text{рекр}}$  увеличивается способность к ПД и уменьшается сопротивление деформации  $\Rightarrow$

**+** снижается трудоёмкость и энергоёмкость обработки.

Нагрев до высоких температур приводит к наличию окалины на поверхности детали  $\Rightarrow$  Хуже качество поверхности, меньше точность геометрических размеров, возникает необходимость в механической обработке **-**

## Примеры холодной и горячей обработке давлением

Границей между горячей и холодной обработкой давлением является температура рекристаллизации материала

$$T_{\text{рекр}} = 0,4 \cdot T_{\text{пл}}$$

**Свинец (Pb)**

$$t_{\text{пл}} = 327^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{рекр}} = -30^{\circ}\text{C}$$

**Олово (Sn)**

$$t_{\text{пл}} = 232^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{рекр}} = -70^{\circ}\text{C}$$

**Вольфрам (W)**

$$t_{\text{пл}} = 3380^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{рекр}} = 1200^{\circ}\text{C}$$

Поэтому обработка давлением  
при комнатной температуре  
является для этих металлов  
горячей.

Поэтому обработка давлением  
при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$   
является для этого металла  
холодной.

**Для большинства металлов обработка давлением при комнатной температуре является холодной.**

# ВИДЕОСЮЖЕТЫ К САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ПРОСМОТРУ

по лекции – 2 «Поведение металлов при деформации и нагреве»

[https://www.youtube.com/watch?v=MHtJLSJ8\\_30](https://www.youtube.com/watch?v=MHtJLSJ8_30)

Пластическая деформация металлов

<https://www.youtube.com/watch?v=332CFFMY1Rc>

Рекристаллизация металлов