«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.

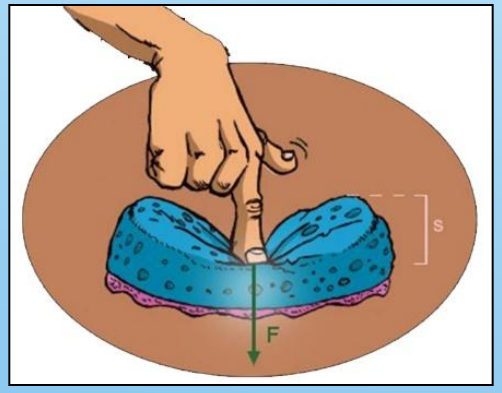
Сопутствуют упругие напряжения.

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

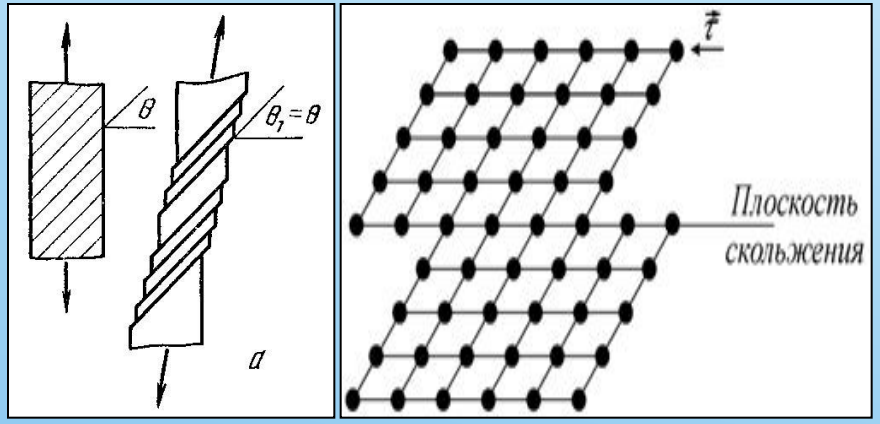
Основные механизмы пластической деформации

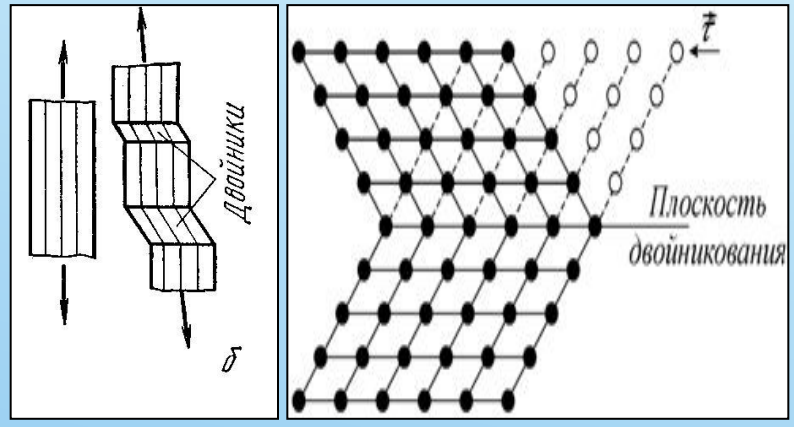
Скольжение

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

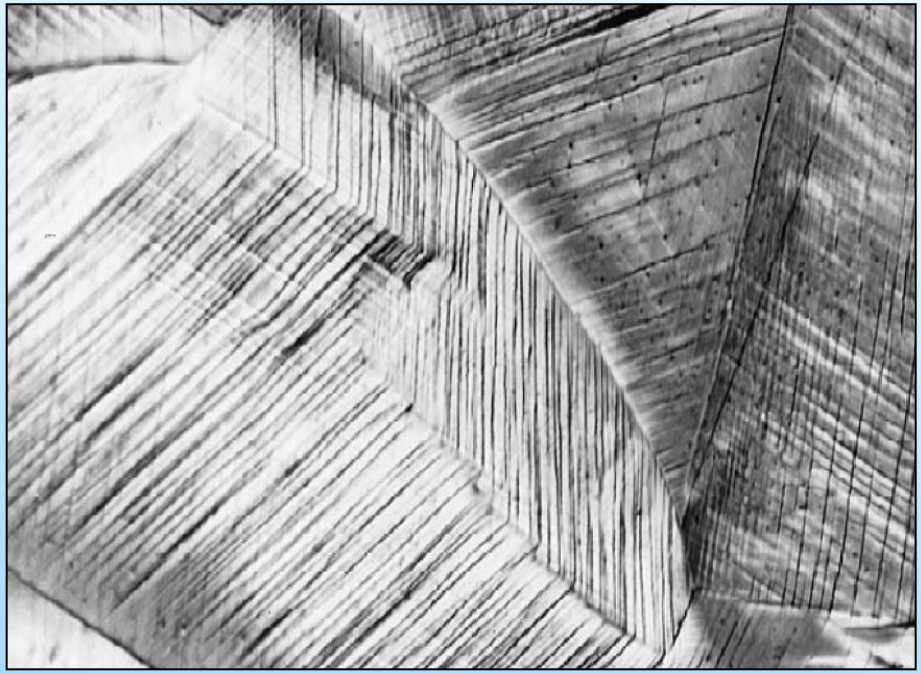
Двойникование

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

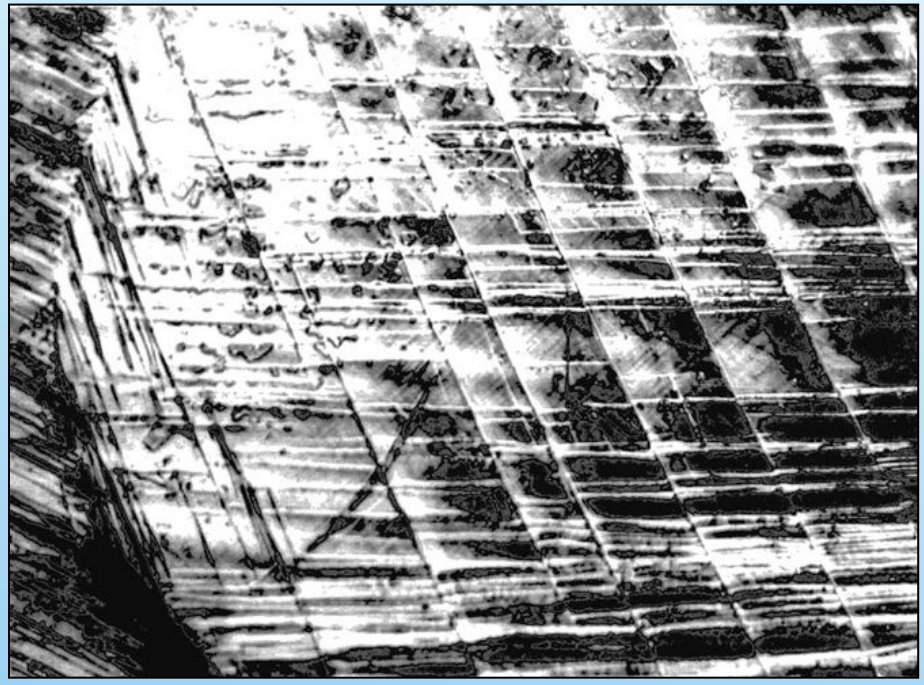




Линии скольжения на полированной поверхности деформированной меди, ×173

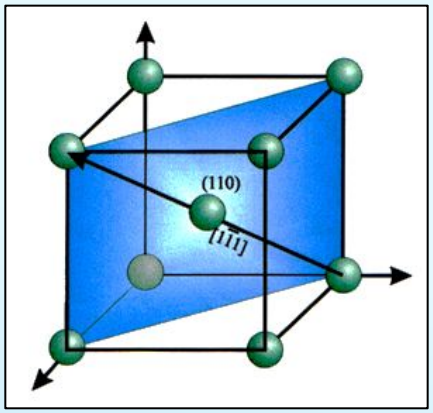


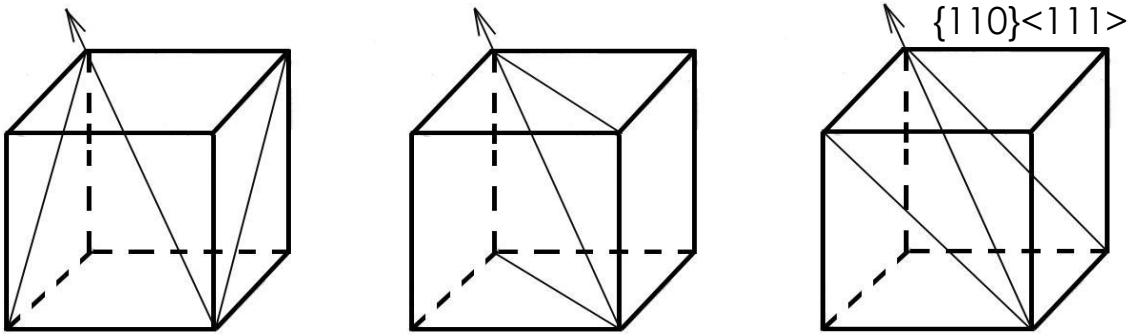
Двойники деформации на полированной поверхности в крупнозернисто литом рении, ×60



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].





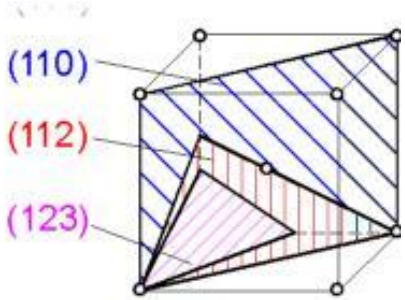
Примеры систем скольжения в кристаллах с ОЦК-решеткой

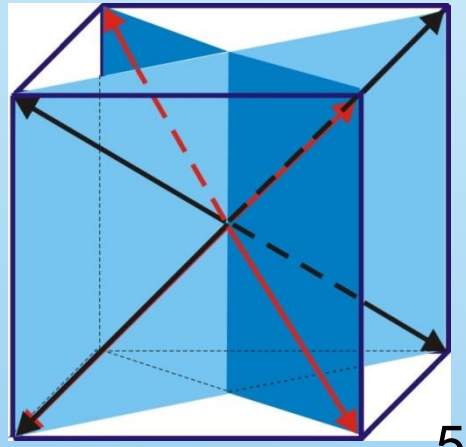
ОЦК

{110}<111>
12 основных из
48 возможных
систем скольжения

Всего в ОЦК металлах 48 систем скольжения:

- 12 систем типа {110}<111>,
- 12 систем типа {112}<111>,
- 24 системы типа {321}<111> .

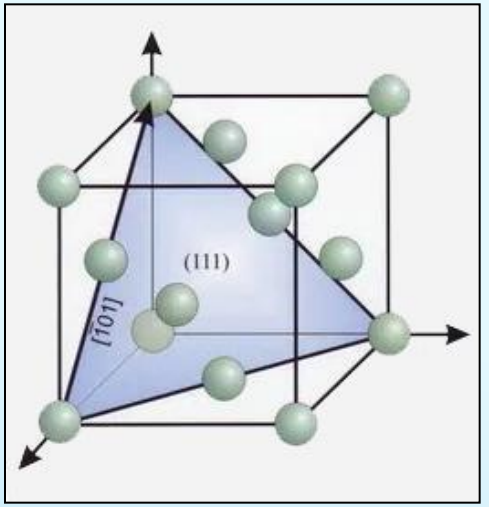




6 плоскостей семейства {110} и 2 направления семейства <111> образуют 12 систем скольжения.

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

Плоскости , направления и системы скольжения в ГЦК-решётки

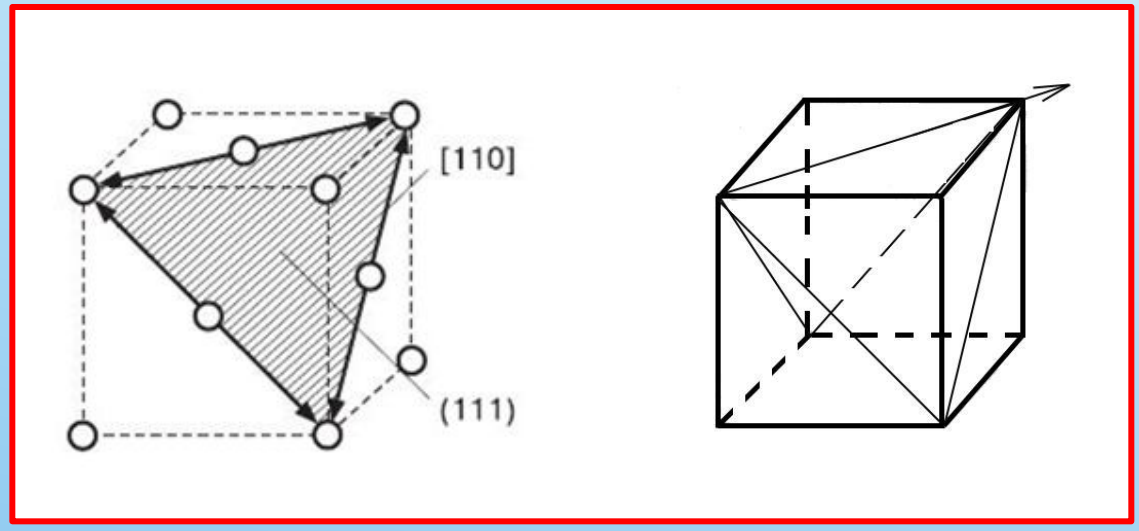


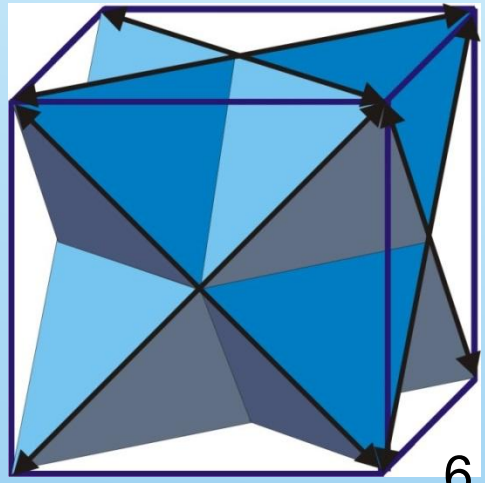
ГЦК

{111} <110>
12 систем скольжения

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 **<110>**.

Четыре плотноупакованные плоскости типа (111) могут скользить в трёх направлениях типа [110], поэтому в ГЦК металлах 3*4=**12** наиболее вероятных систем скольжения типа **{111}<110>**.



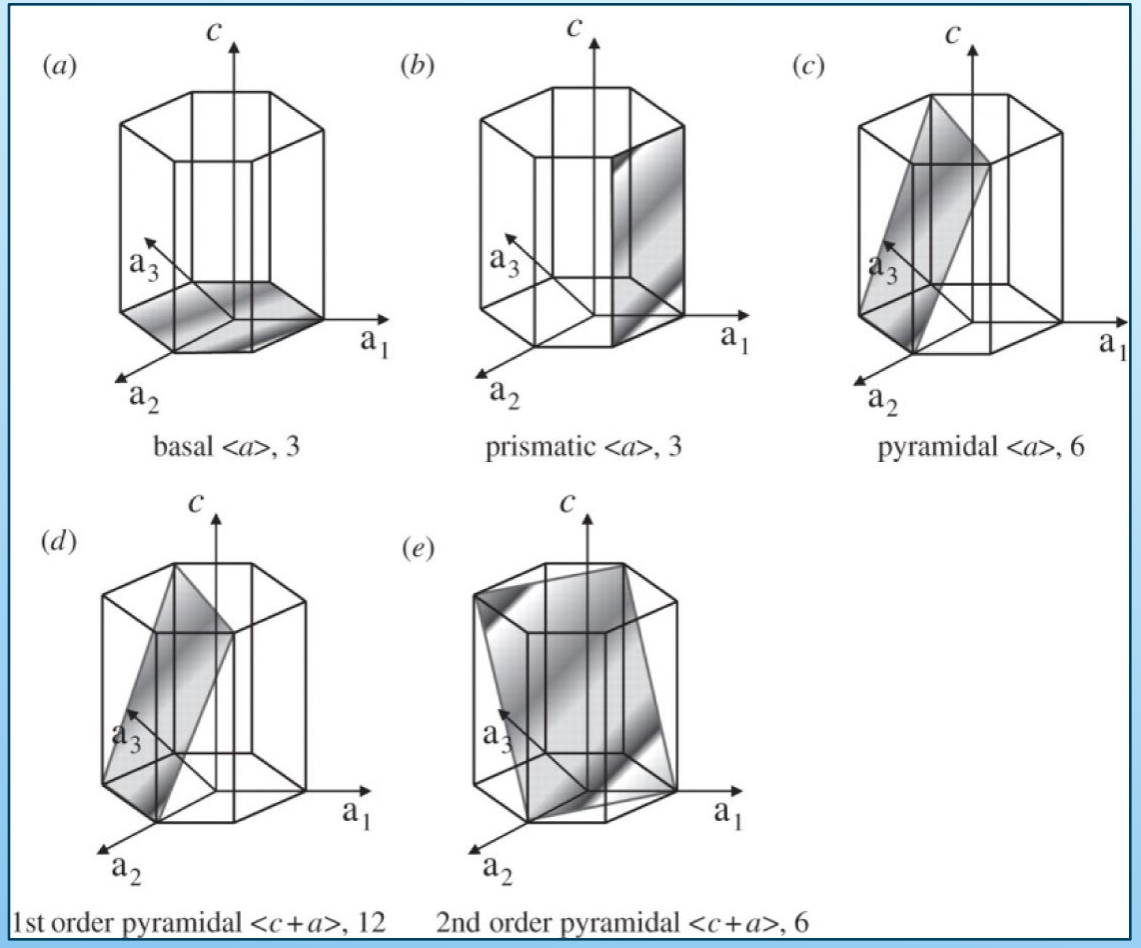


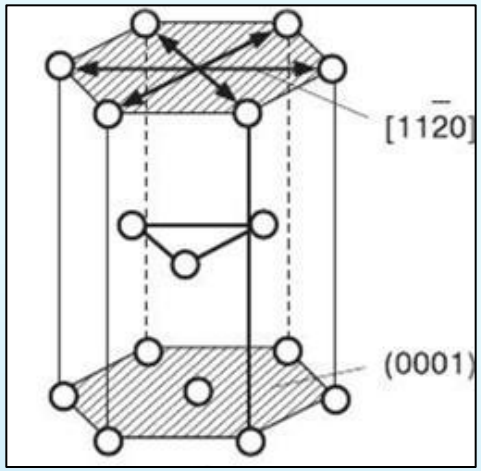
Плоскости , направления и системы скольжения в ГПУ-решётки

У металлов с ГПУ решеткой существуют базисные {0001}, призматические {10-10} и пирамидальные {10-11} 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 [1120] .

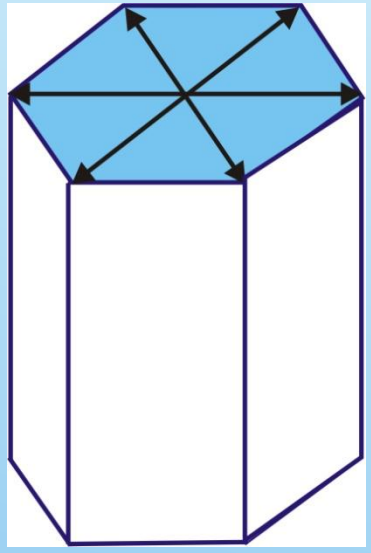
.





ГЦК

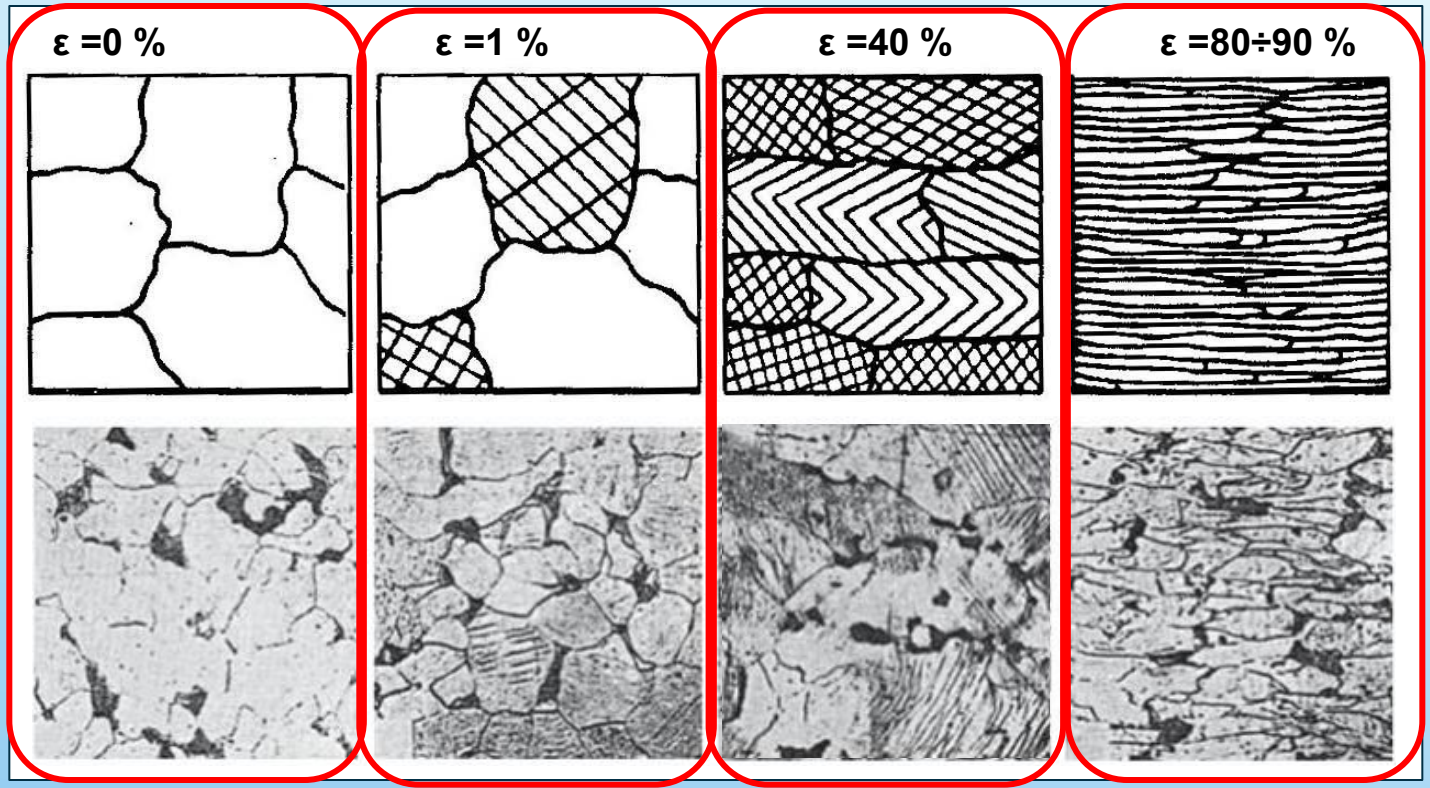
1 плоскость **{0001}**
3 направления **<1120>**
3 системы скольжения



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.

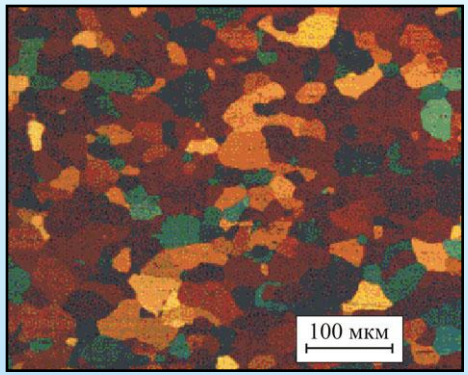


Малоуглеродистая сталь 45
Структура: **(Ф+П),** ×250

ДЕФОРМАЦИЯ

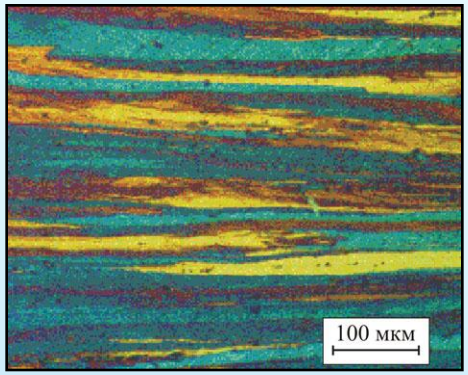
Структура до и после деформации

Микроструктура алюминиевого сплава ДО деформации

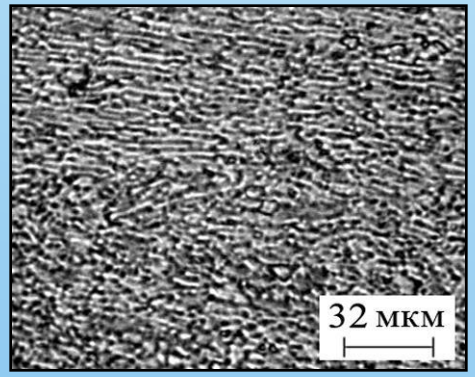


Деформация

Микроструктура алюминиевого сплава ПОСЛЕ деформации

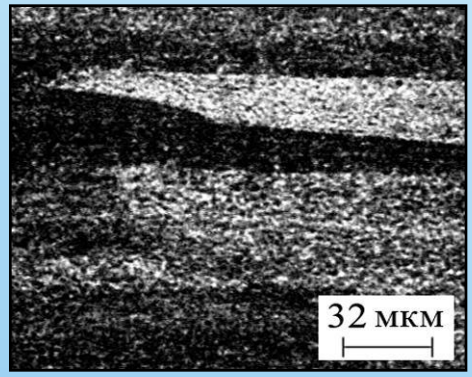


Микроструктура титанового сплава ВТ6 ДО деформации



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

$\varepsilon=0\%$, $\rho\approx10^{6}$ см$^{-2}$

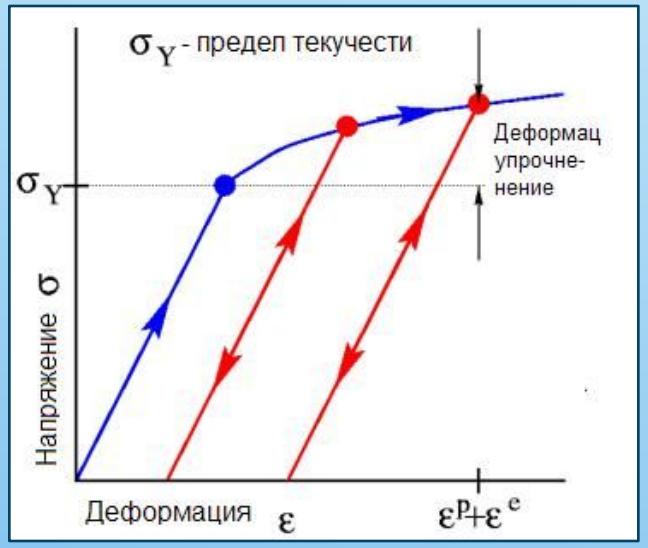
→

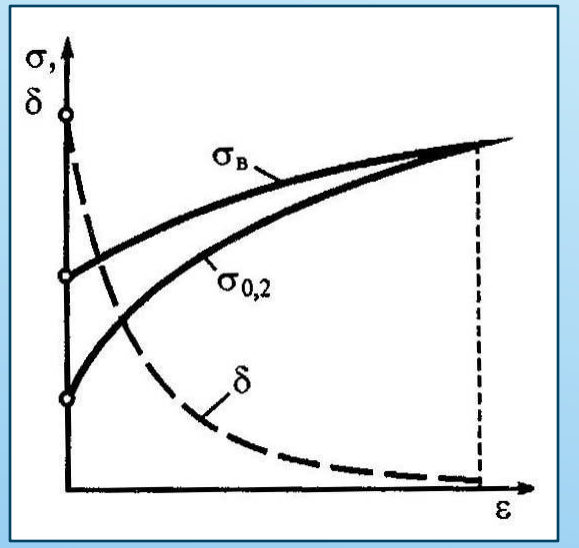
Сильнодеформированный кристалл

$\varepsilon=70\%$, $\rho\approx10^{12}$ см$^{-2}$

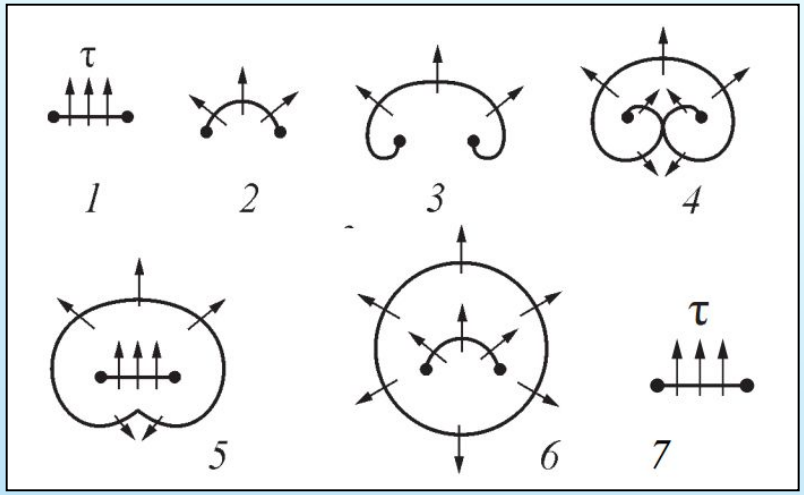
Если на пути движения дислокаций встречается препятствие в виде другой дислокации или дефектов другого рода, то процесс движения дислокаций тормозится и необходимы более высокие внешние напряжения, чтобы продеформировать материал. Т.о. происходит **деформационное упрочнение** (наклеп, нагартовка, упрочнение).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

Наклеп - это упрочнение и снижение пластичности металла при деформации.





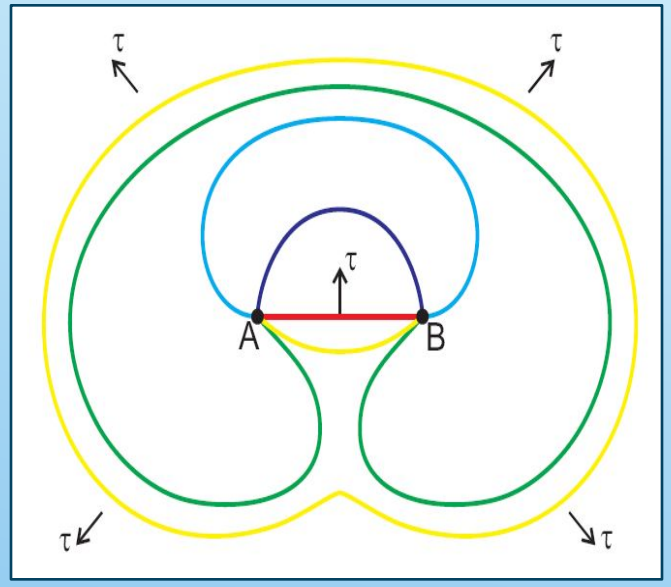
ИСТОЧНИК ФРАНКА-РИДА

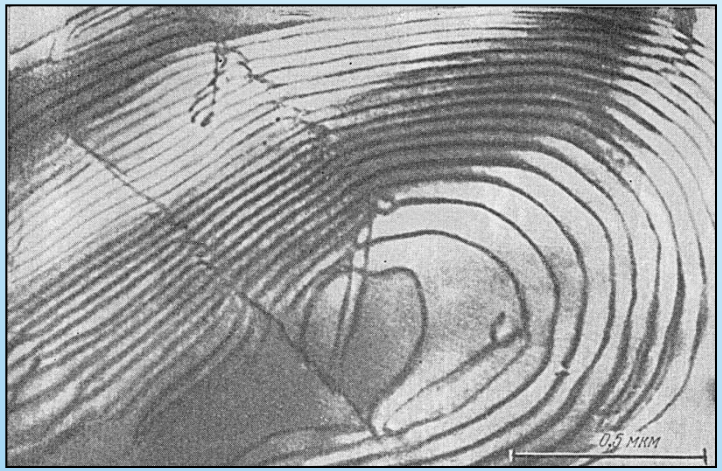


Последовательность образования новой дислокации при действии источника Франка – Рида:

- 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



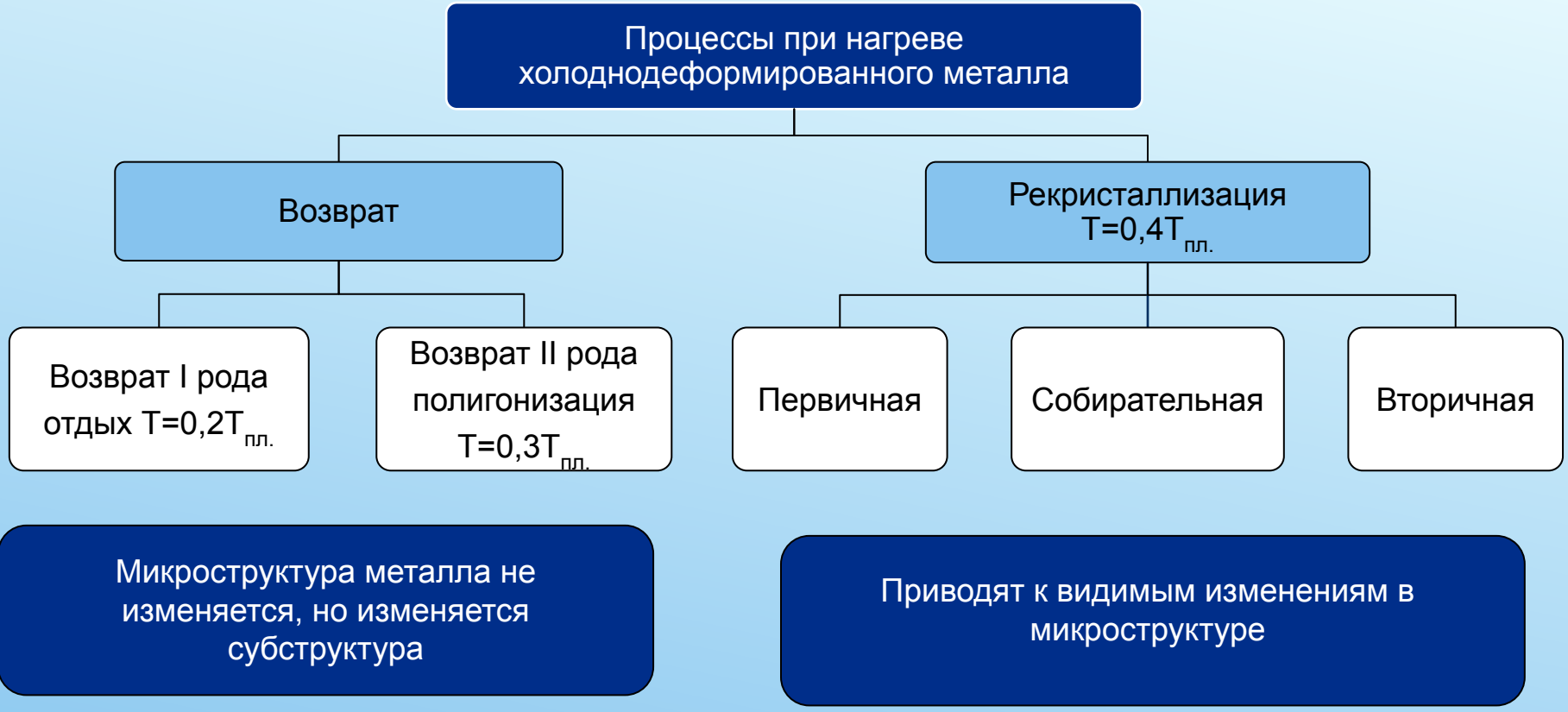


Фотография источника Франка-Рида в сплаве Ni-Fe

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

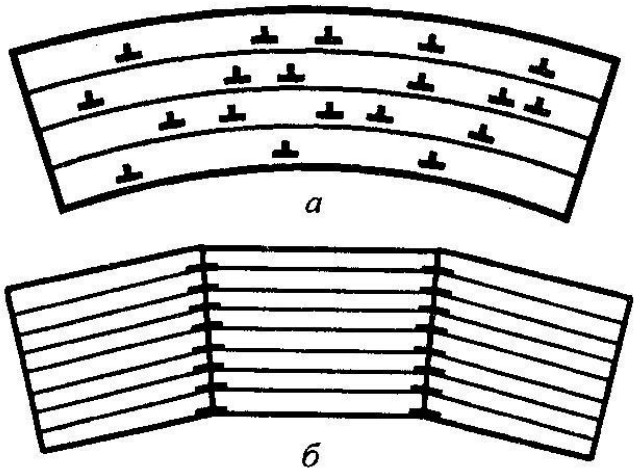
При нагреве холоднодеформированного металла на **$T=0,2T_{пл.}$** в нем развиваются процессы **возврат I рода** или **отдыха**

- Этим процессам соответствует перераспределение и аннигиляция точечных дефектов. В результате отдыха частично снимаются искажения кристаллической решетки, микроструктура и уровень механических свойств материала практически не изменяются.

При нагреве холоднодеформированного металла на **$T=0,3T_{пл.}$** 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

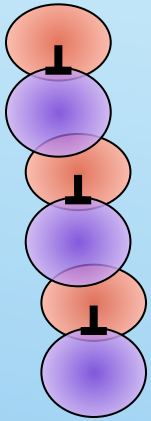


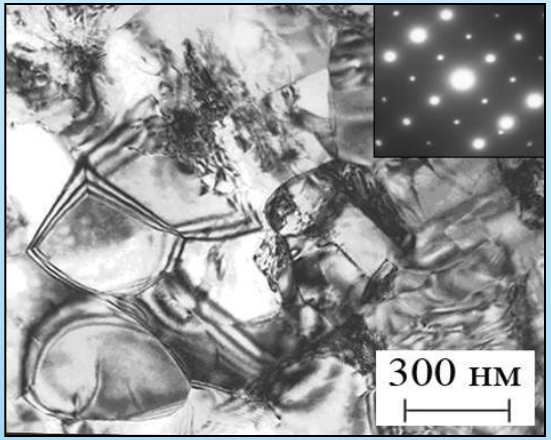
$r_{\perp} = 10^{10-11}/cm^2$

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 выстроится друг под другом в дислокационные стенки - границы полигонов (субзерен) свободных от дислокаций. Угол разориентировки соседних субзерен менее 5° (малоугловые границы).





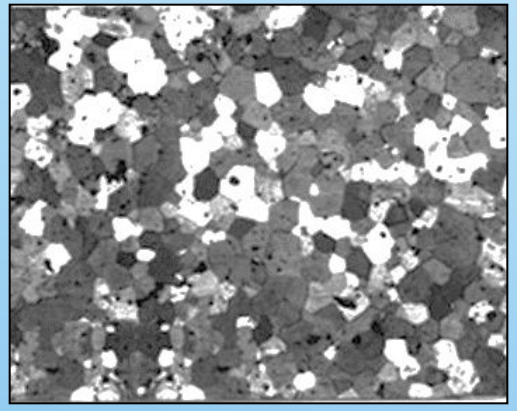
$r_{\perp} = 10^{9-10}/cm^2$

Субструктура в титановом сплаве ВТ6

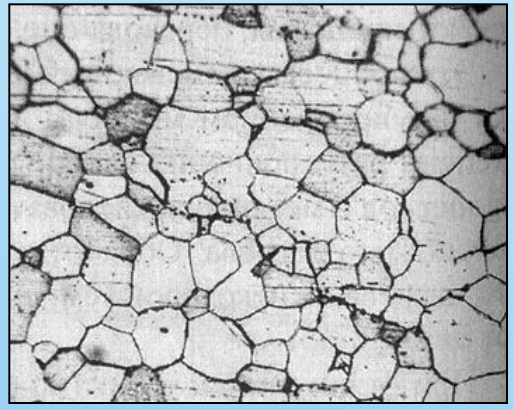
Изменения субструктуры можно наблюдать с помощью электронного микроскопа.

ПРОЦЕССЫ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО МЕТАЛЛА

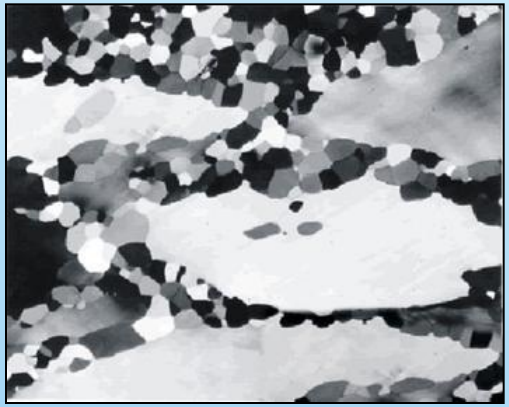
При нагреве холоднодеформированного металла на **$T=0,4T_{пл.}$** и **выше** в нем развиваются процессы **рекристаллизации**



Первичная рекристаллизация



Собирательная рекристаллизация



Вторичная рекристаллизация

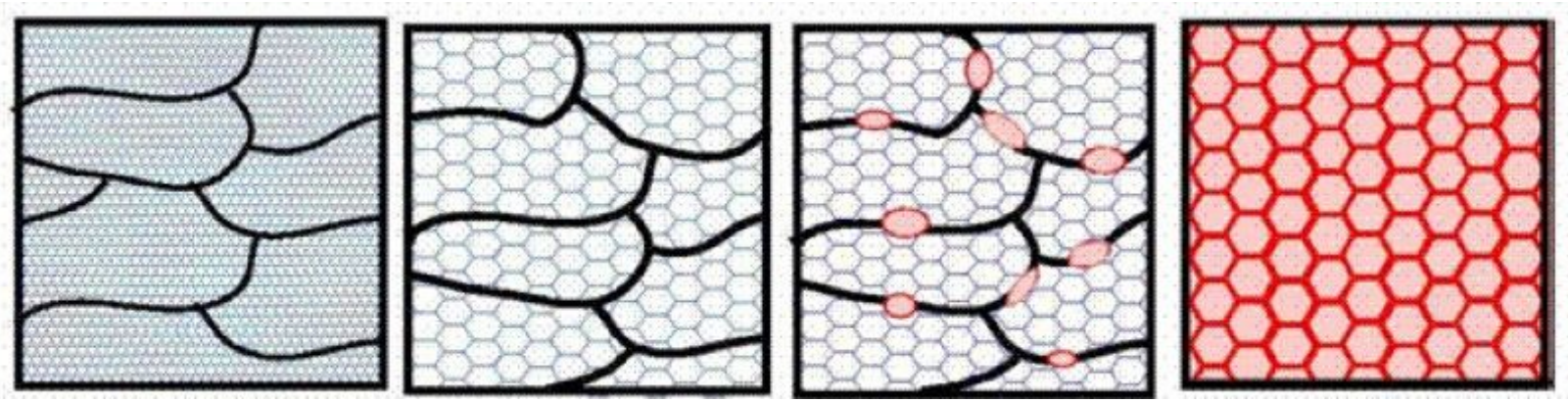
ПЕРВИЧНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

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.



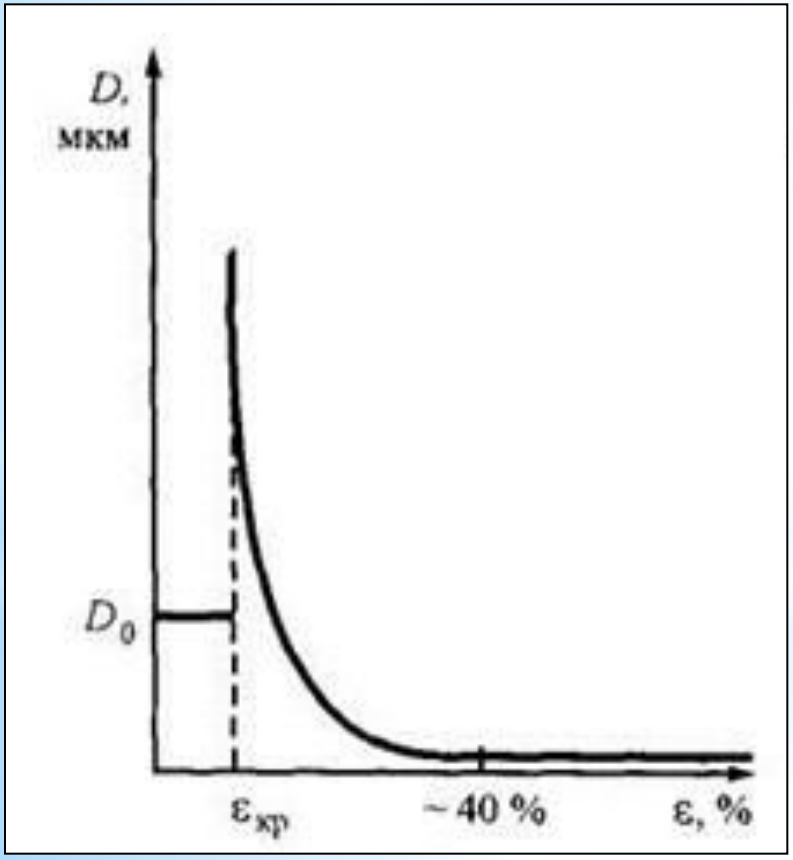
а) Деформированный металл | б) Возврат | в) Начало ПР | г) Завершение ПР

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 %.



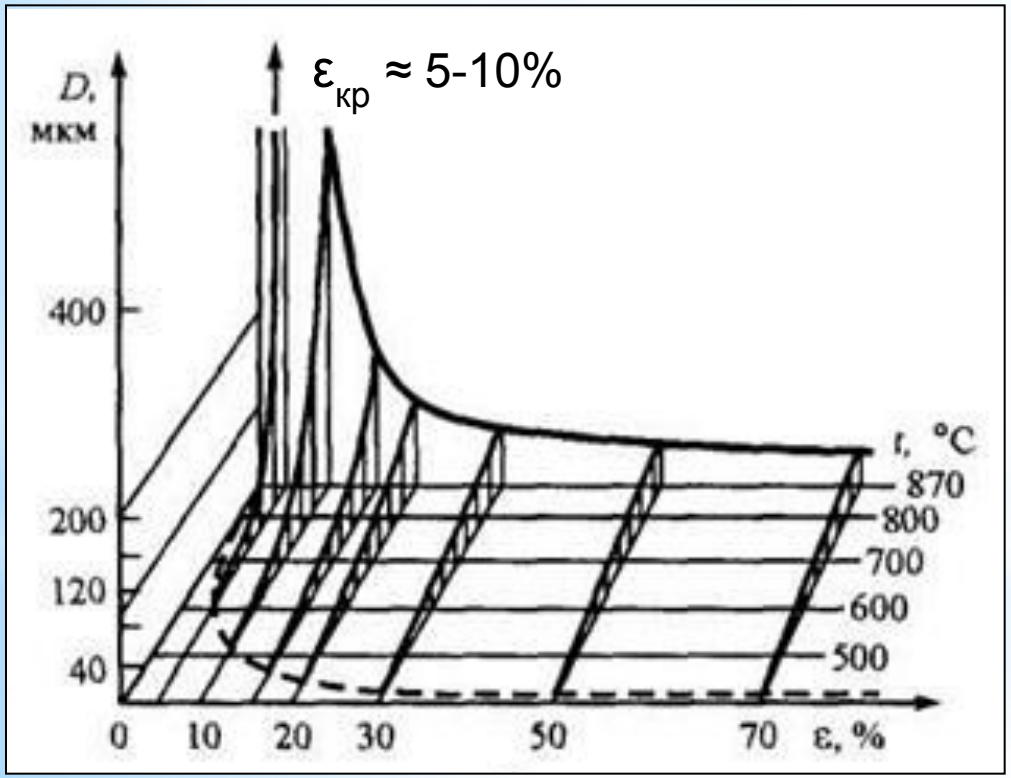
Чем выше степень предварительной холодной пластической деформации, тем ниже температура начала первичной рекристаллизации и мельче рекристаллизованное зерно.

Зависимость размера зерна рекристаллизованного металла от степени деформации:

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

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 $\varepsilon_{кр}$ 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.

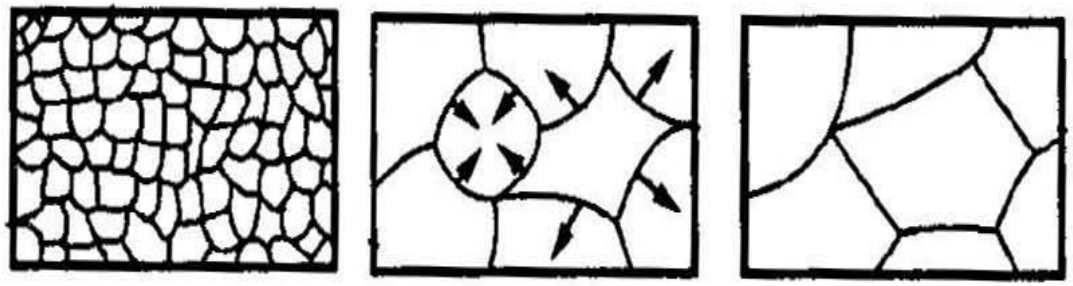
При большей степени деформации этот механизм постепенно сменяется нормальным механизмом первичной рекристаллизации.

СОБИРАТЕЛЬНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

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

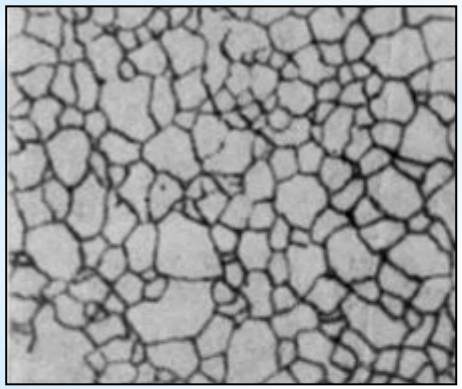
Это самопроизвольные процессы, определяемые стремлением к уменьшению свободной энергии системы, за счет уменьшения поверхностной энергии границ зерен, которая понижается с увеличением размера зерен, т.к. уменьшается протяженность границ.

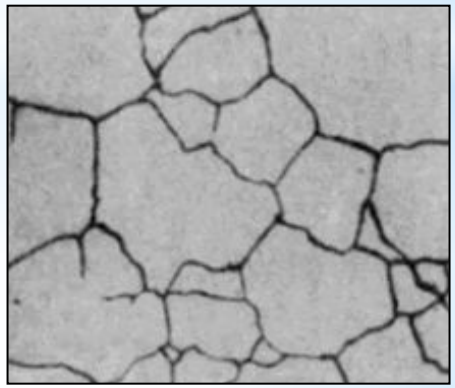
Собирательная рекристаллизация (СР) – это процесс нормального одновременного роста рекристаллизованных зёрен



Завершение ПР

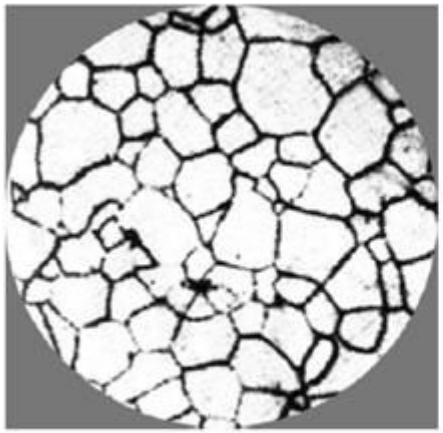
Рост зерен при СР



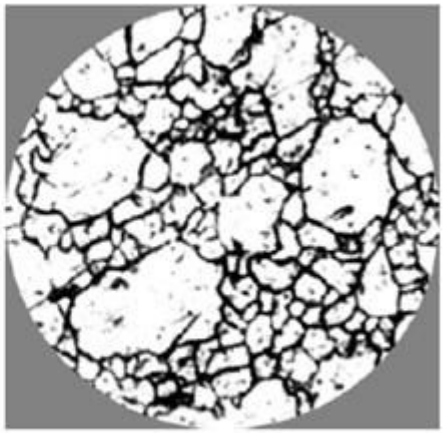


ВТОРИЧНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

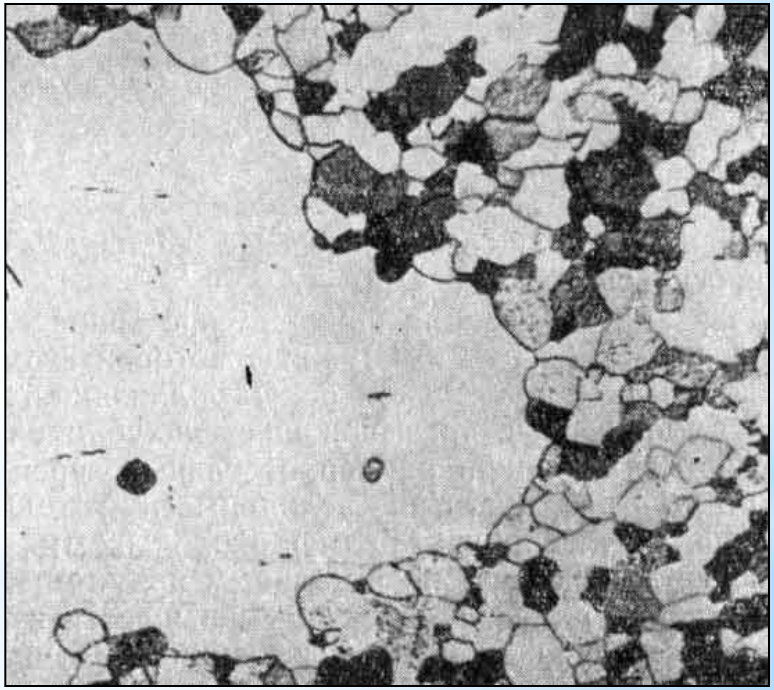
Вторичная рекристаллизация (ВР) характеризуется тем, что нормальный рост рекристализованных зерен внезапно прерывается очень быстрым ростом нескольких зерен до размера ~см. Остальные рекристаллизованные зерна остаются очень мелкими и затем постепенно поглощаются большими зернами.



Результат СР

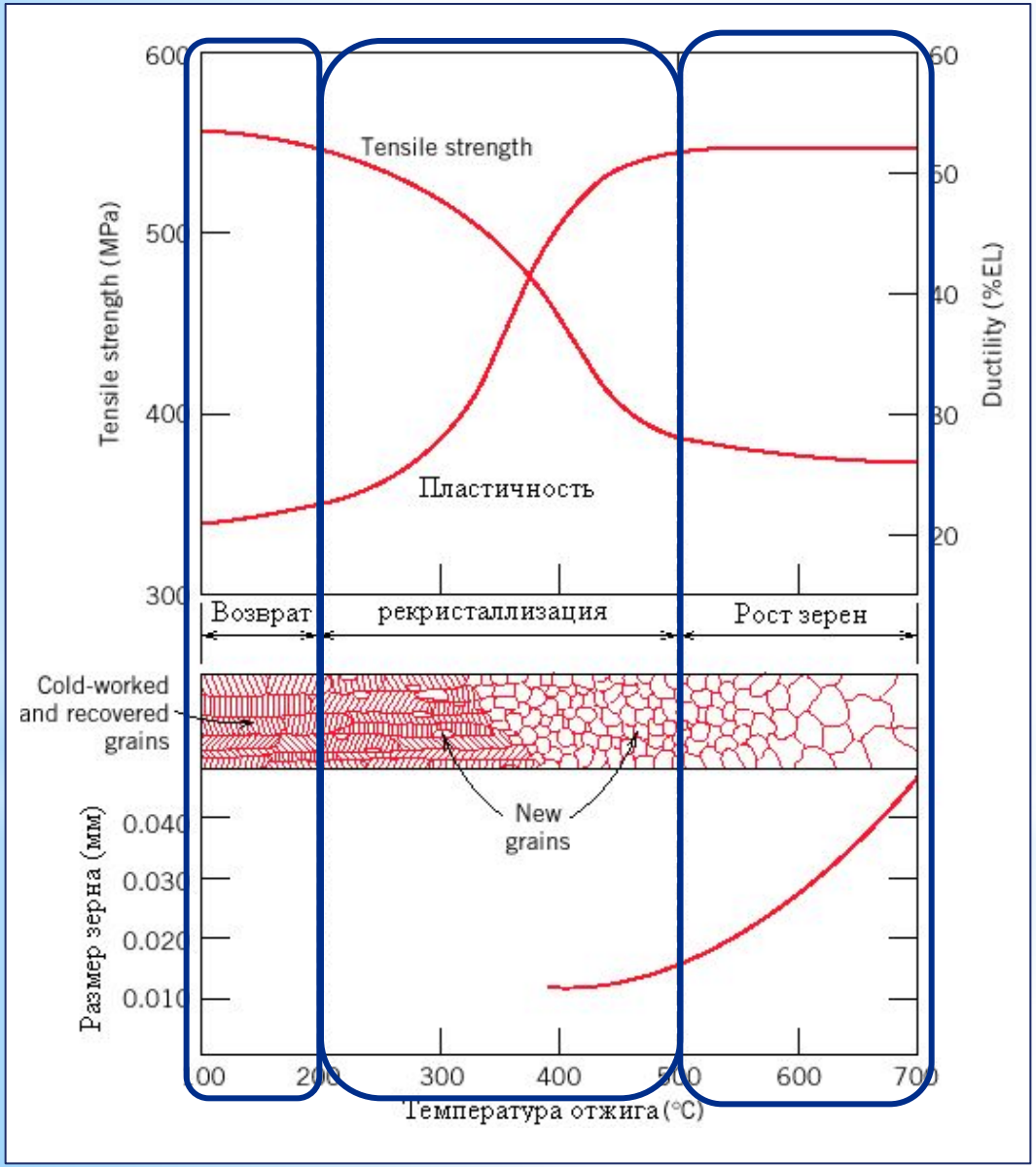


Результат ВР



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:

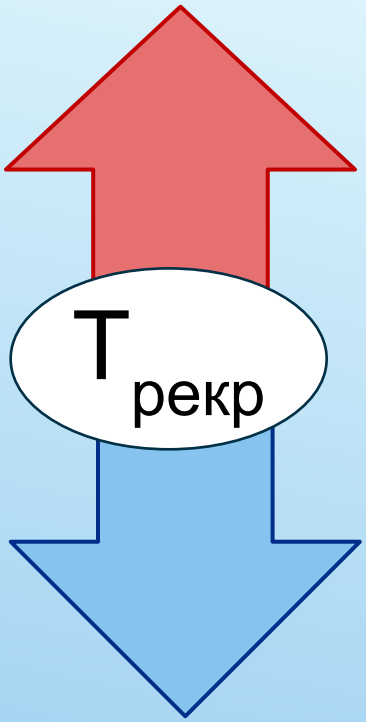
- резко снижаются показатели прочности,
- сильно повышается пластичность
- зёрна приобретают равноосную форму

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

При температурах собирательной и вторичной рекристаллизации (дальнейший нагрев или увеличении 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 $t_{рекр}$ увеличивается способность к ПД и уменьшается сопротивление деформации ⇒ снижается трудоёмкость и энергоёмкость обработки. +

Нагрев до высоких температур приводит к наличию окалины на поверхности детали ⇒ 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

$$T_{рекр}=0,4 \cdot T_{пл}$$

Свинец (Pb)
$t_{пл}$=327°C
$t_{рекр}$=-30°C

Олово (Sn)
$t_{пл}$=232°C
$t_{рекр}$=-70°C

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

Вольфрам (W)
$t_{пл}$=3380°C
$t_{рекр}$=1200°C

Поэтому обработка давлением при температуре 1000°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
Пластическая деформация металлов

https://www.youtube.com/watch?v=332CFFMY1Rc
Рекристаллизация металлов