

# МАТЕРИАЛОВЕДЕН ИЕ

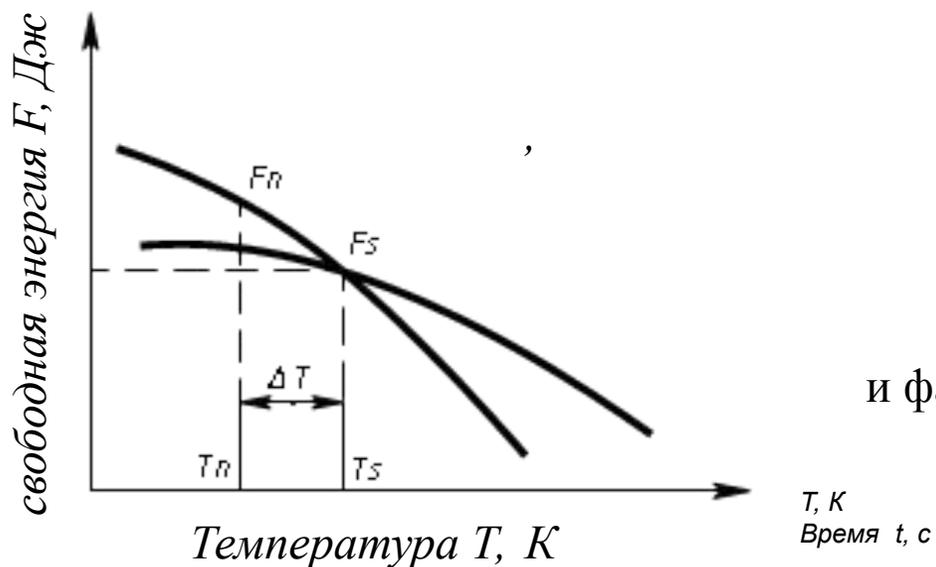
Лекция №2

## Кристаллизация металлов и сплавов

*системой* называют совокупность индивидуальных веществ (химические элементы, независимые химические соединения), между которыми или частями которых обеспечена возможность обмена энергией, а также процессов диффузии.

новое состояние в новых условиях является энергетически более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

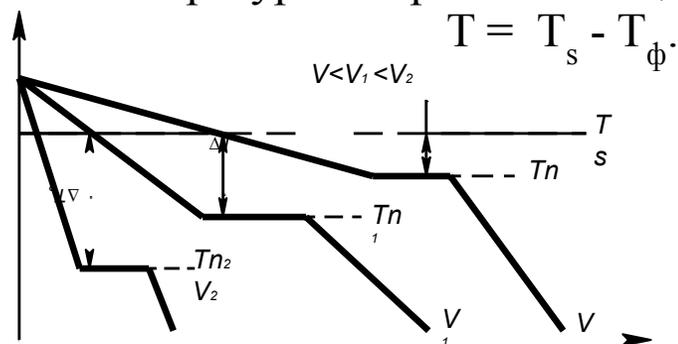
*свободная энергия* - термодинамическая функция (F)  $F = U - TS$ ,  
 где U – внутренняя энергия системы; T - абсолютная температура; S - энтропия



- температура  $T_s$  - *равновесная* или *теоретическая температура кристаллизации*

- температура, при которой практически начинается кристаллизация - *фактическая температура кристаллизации*

- *степень переохлаждения* называют разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации:



## Схема процесса кристаллизации



### Процессы кристаллизации :

- зарождение мельчайших частиц кристаллов (*зародыши* или *центры кристаллизации*)
- рост кристаллов из этих центров

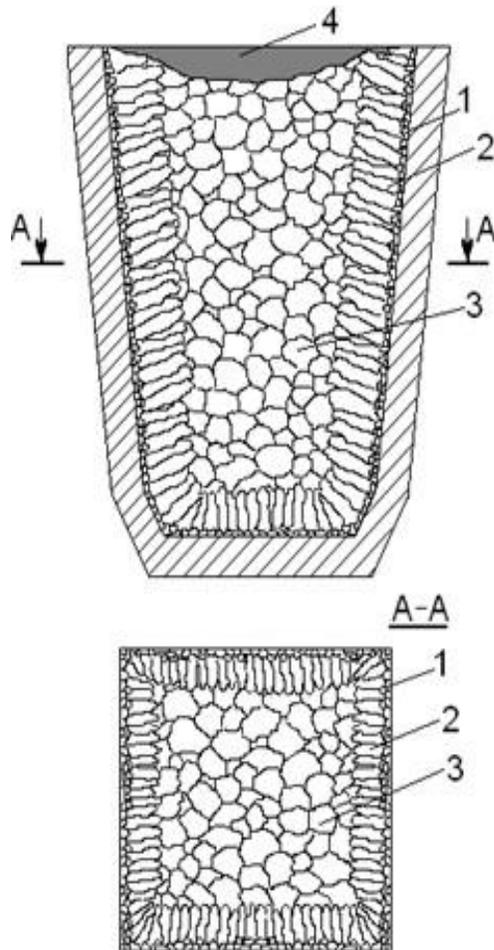
Минимальный размер способного к росту зародыша называется *критическим размером зародыша*.

### **Форма кристаллов и строение слитков**

Реально протекающий процесс кристаллизации усложняется действием различных факторов:

- скорости и направления отвода тепла;
- наличия нерастворившихся частиц (центров кристаллизации);
- конвекционных токов жидкости.

## Схема строения стального слитка



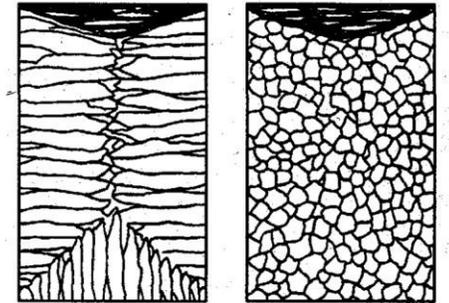
Первая зона — наружная *мелкозернистая корка I*, состоящая из дезориентированных мелких кристаллов — дендритов.

Вторая зона — зона *столбчатых кристаллов II*.

Третья зона слитка — зона *равноосных кристаллов III*.

Схемы макроструктур слитков:

а — столбчатые кристаллы; б — равноосные кристаллы



*Транскристаллическая* структура (слитки очень чистых металлов. Зона столбчатых кристаллов характеризуется

Для измельчения структуры металлов и сплавов широко применяют технологическую операцию, называемую *модифицированием*

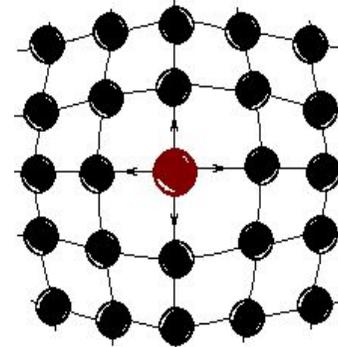
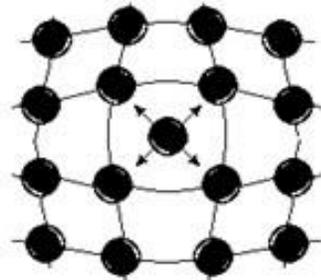
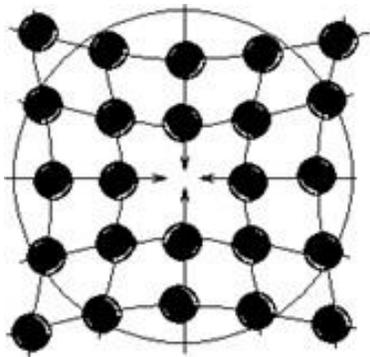
Неоднородность сплава по химическому составу, структуре и неметаллическим включениям, образующаяся при кристаллизации слитка, называется *ликвацией*.

Залитый в форму металл в процессе кристаллизации сокращается в объеме, что приводит к образованию пустот, называемых *усадочными раковинами*.

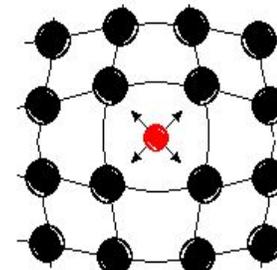
## Дефекты кристаллического строения

- точечные – малые во всех трех измерениях;
- линейные – малые в двух измерениях и сколь угодно протяженные в третьем;
- поверхностные – малые в одном измерении.

*Точечные дефекты* : вакансий, дислоцированные атомы и примеси



*примесь замещения*



*примесь внедрения*

**Линейные дефекты:** дислокации

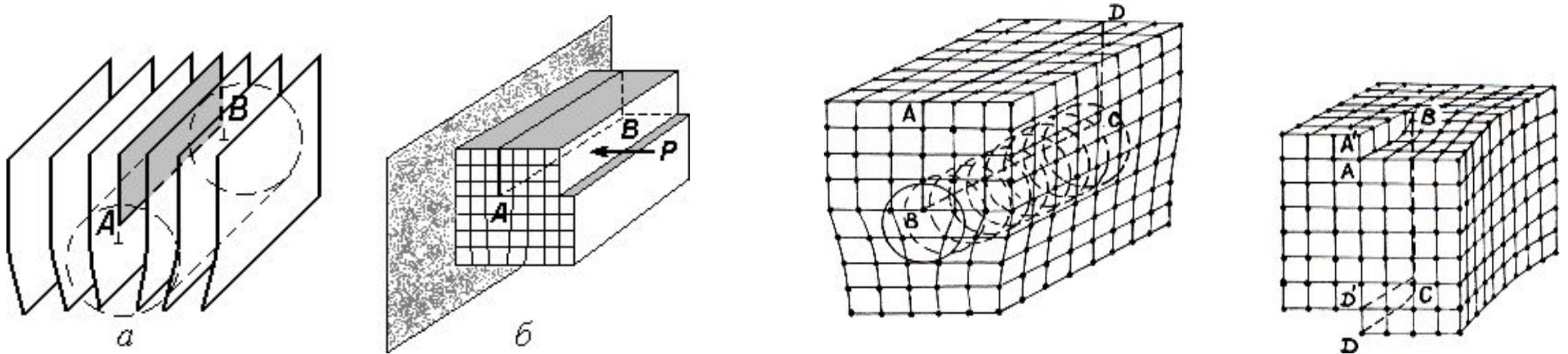
**Дислокация** – это дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей

Простейшие виды дислокаций – краевые и винтовые .      Неполная плоскость называется *экстраплоскостью*

**Краевая дислокация** представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край — лишней полуплоскости

**Винтовая дислокация**

Винтовая дислокация получена при помощи частичного сдвига по плоскости вокруг линии ВС



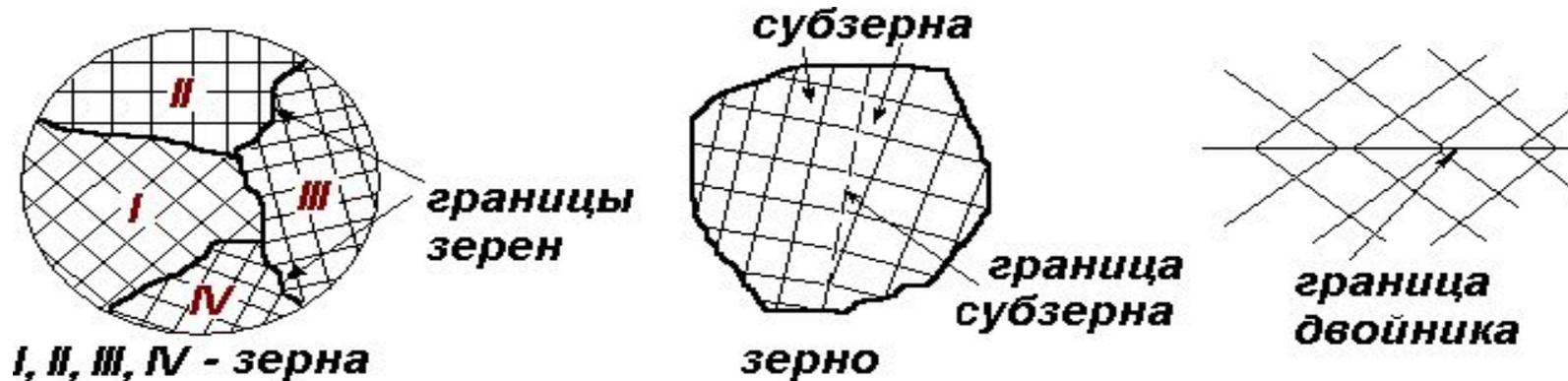
Дислокационная структура материала характеризуется **плотностью дислокаций**

Плотность дислокаций в кристалле определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью  $1 \text{ м}^2$ , или как суммарная длина линий дислокаций в объеме  $1 \text{ м}^3$

$$\rho = \frac{\sum l}{V} \quad (\text{см}^{-2}; \text{м}^{-2})$$

С увеличением плотности дислокаций возрастает внутреннее, изменяются оптические свойства, повышается электросопротивление металла, увеличивается средняя скорость диффузии в кристалле, ускоряется старение и другие процессы, уменьшается химическая стойкость.

**Поверхностные (двумерные) дефекты** - нарушения кристаллического строения, которые обладают большой протяженностью в двух измерениях и протяженностью лишь в несколько межатомных расстояний в третьем измерении. К поверхностным дефектам относят границы зерен, фрагментов, блоков



Размеры *зерен* составляют до 1000 мкм. Углы разориентации составляют до нескольких десятков градусов

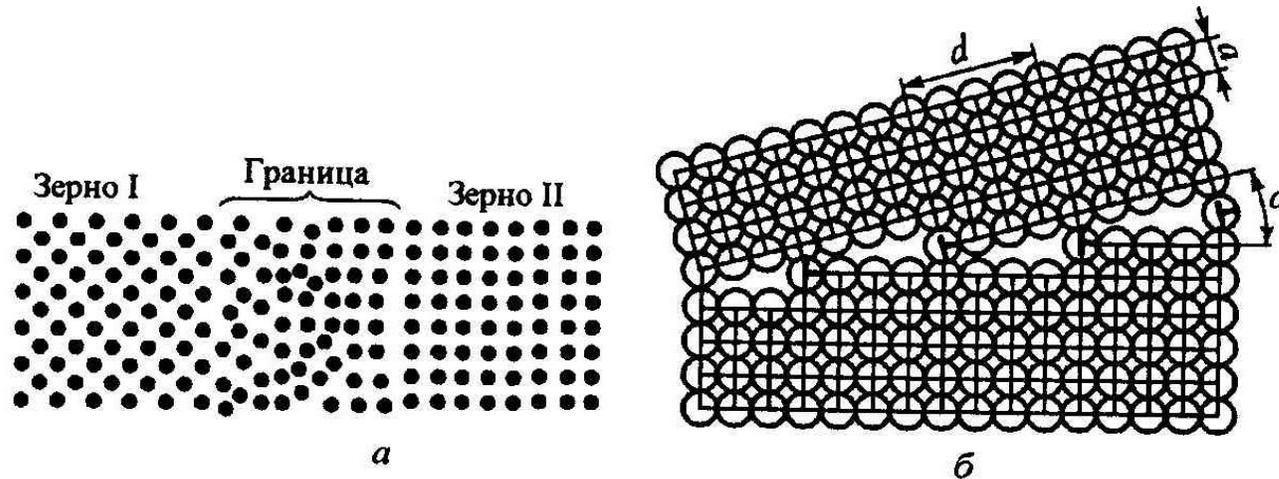
Граница между зёрнами представляет собой тонкую в 5 – 10 атомных диаметров поверхностную зону с максимальным нарушением порядка в расположении атомов

Участки, разориентированные один относительно другого на несколько градусов - *фрагменты*

Процесс деления зёрн на фрагменты называется *фрагментацией* или *полигонизацией*

Каждый фрагмент состоит из блоков, размерами менее 10 мкм, разориентированных на угол менее одного градуса -

*блочная или мозаичная структура*



## Упругая и пластическая деформации

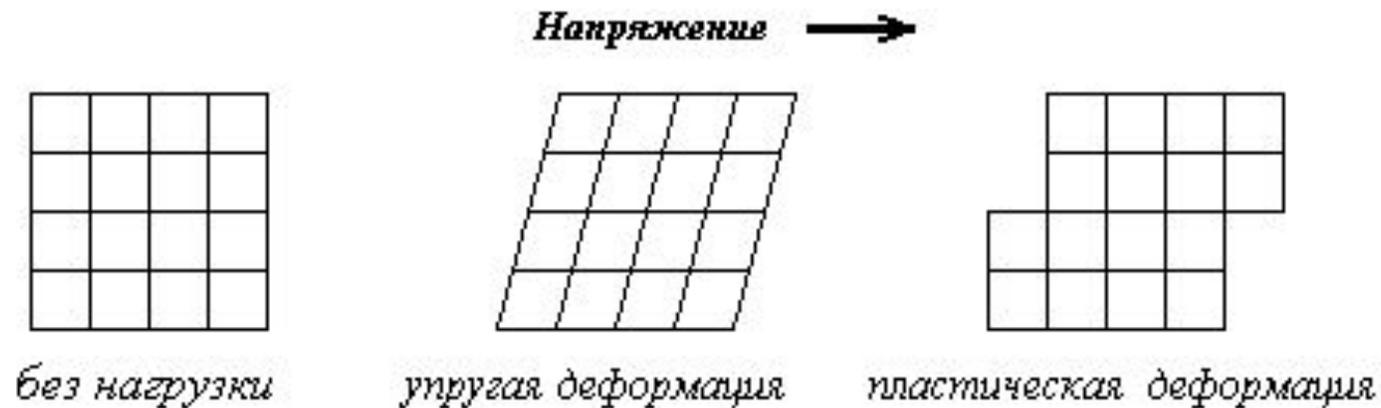


Рис. 1. Схема деформирования кристаллической решетки

Основным механизмом пластической деформации является движение дислокаций (dislocatio – смещение, перемещение)

Осуществляется пластическая деформация скольжением и двойникованием

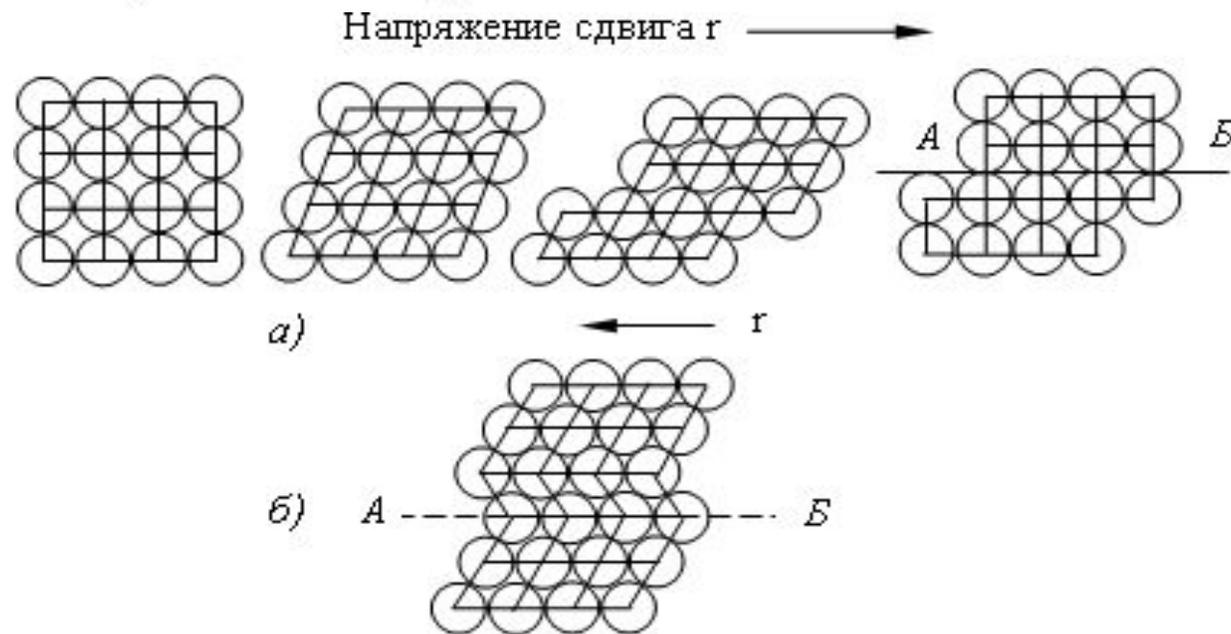


Схема пластической деформации скольжением (а) и двойникованием (б).

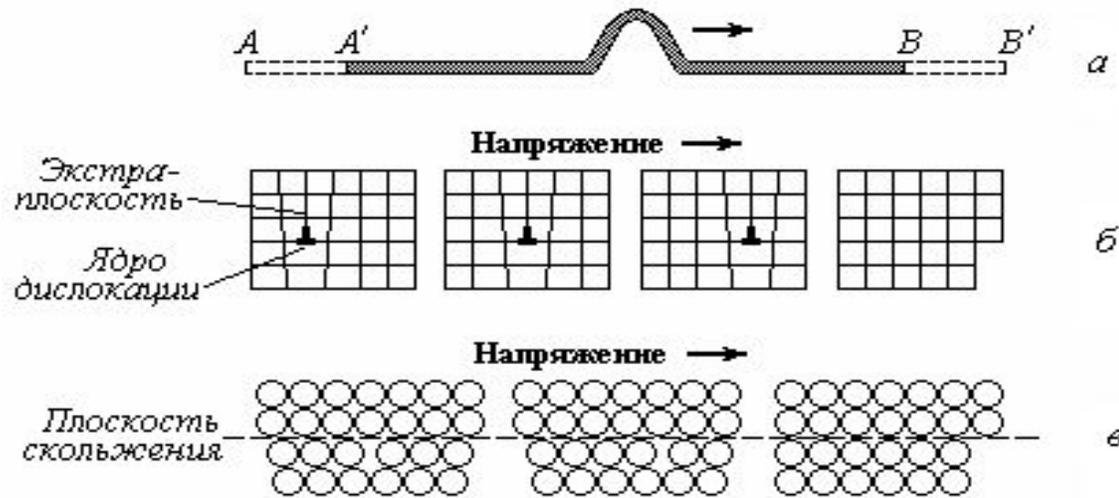


Рис. 2. Схема пластической деформации скольжением дислокаций:  
 а - складка ковра в качестве модели скольжения (AA' - начальное положение, BB' - конечное положение); б - перемещение дислокации при скольжении; в - смещение атомов вблизи ядра дислокации

Механизм пластической деформации, основанный на скольжении дислокаций, может быть сопоставлен с перемещением по полу ковра, на котором специально сделана складка

Пластичность металлов (возможность сдвига) обусловлена наличием в них дислокаций и зависит от подвижности дислокаций

- В пластичных металлах дислокации легко подвижны
- --- - Затруднение движения дислокаций любыми методами приводит к упрочнению (границы зерен и субзерен, упругие искажения кристаллической решетки, дисперсные включения, другие дислокации)

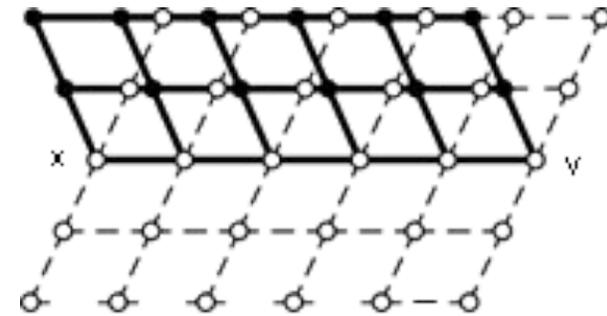
Это наиболее характерный вид деформации при обработке давлением

**Двойникование** – поворот одной части кристалла в положение симметричное другой его части. Плоскостью симметрии является плоскость двойникования

Двойникование чаще возникает при пластической деформации кристаллов:

- с объемно-центрированной и гексагональной решеткой,
- с повышением скорости деформации
- с понижением температуры склонность к двойникованию возрастает.
- может возникать не только в результате действия внешних сил, но и в результате отжига пластически деформированного тела.

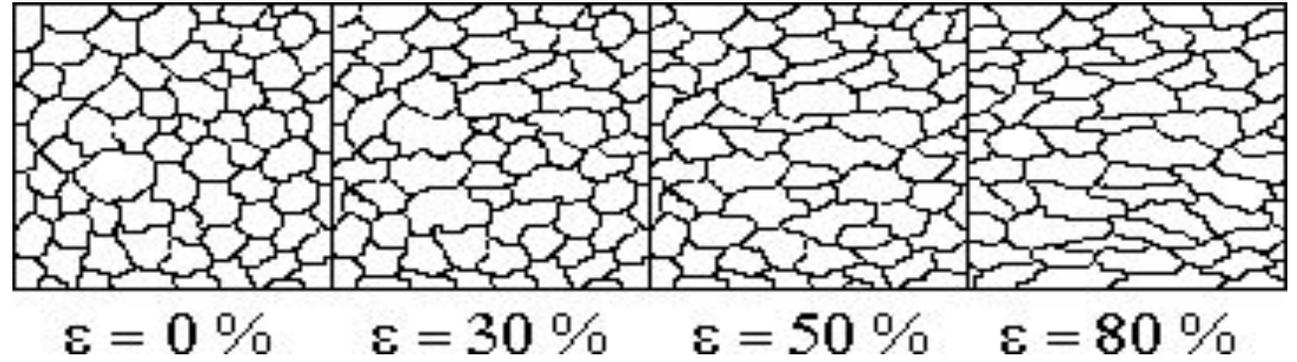
В результате смещения кристаллографических плоскостей происходит увеличение плотности дислокаций, которые приводят к упрочнению металла или сплава. Деформационное упрочнение кристаллических тел называется **наклепом** (**нагартовкой**).



Деформация начинается в зернах, плоскости скольжения которых составляют угол  $45^\circ$  с направлением усилия

## Наклеп и рекристаллизация

**Наклепом** называется упрочнение металлов, происходящее в результате пластической деформации при процессах холодной обработки давлением (холодная прокатка, штамповка, протяжка, волочение).



### Изменение механических свойств металла при наклепе

упрочняемость металла зависит:

- от количества дислокаций, участвующих в процессе пластической деформации,

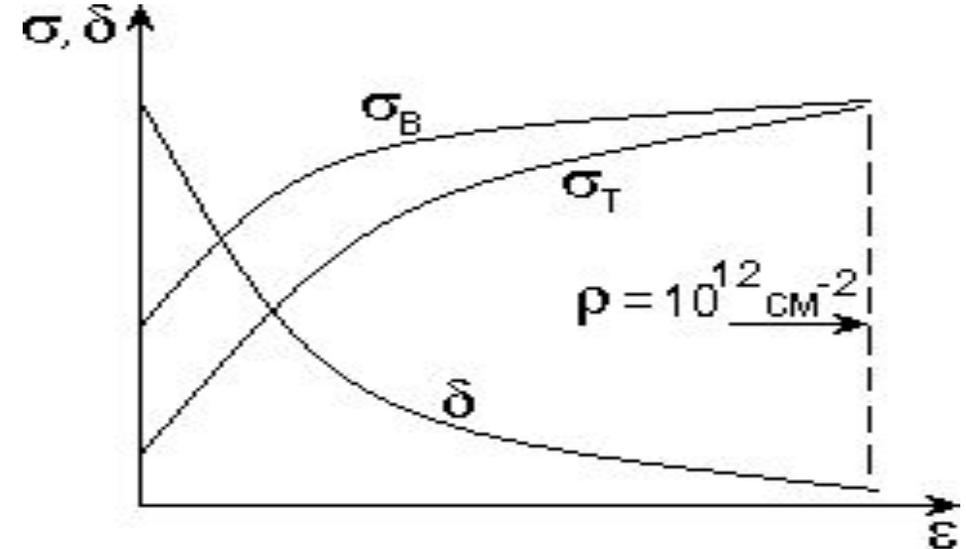
- от характера движения дислокаций

Упрочнение при пластической деформации обусловлено:

- образованием малоподвижных порогов и барьеров при

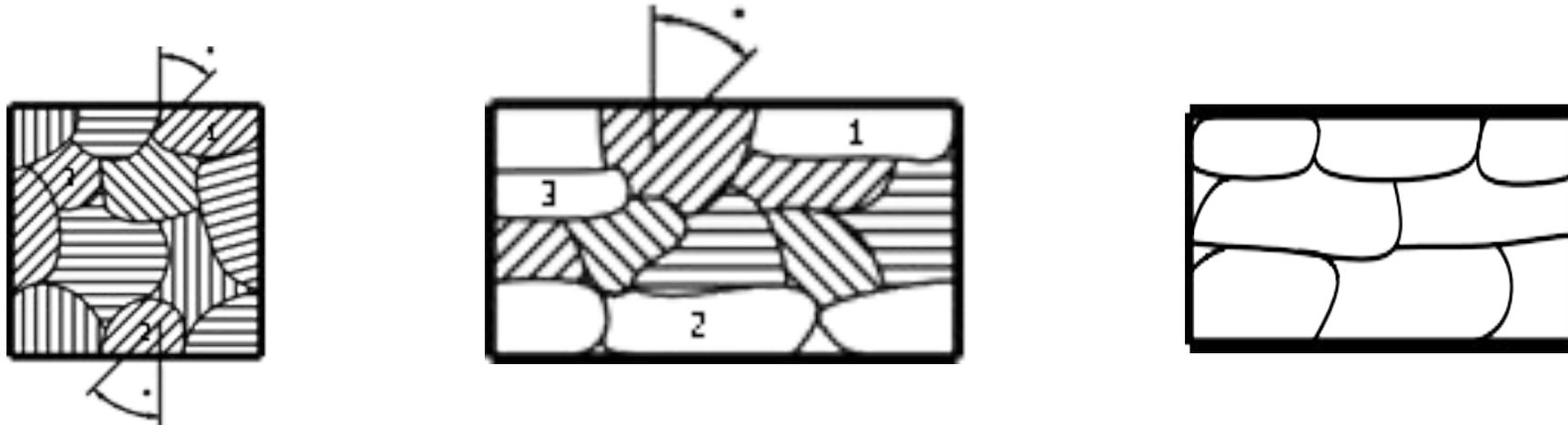
пересечении дислокаций,

- увеличением плотности дислокаций,
- измельчением зерна.



## Схема образования текстуры в поликристаллитном теле

Деформация начинается в зернах, плоскости скольжения которых составляют угол  $45^\circ$  с направлением усилия



а– расположение зерен; б – изменение формы зерен в направлении главной деформации; в - текстура анизотропии свойств металла.

С ростом степени деформации возрастают удельное электрическое сопротивление, понижаются плотность, магнитная проницаемость и остаточная индукция. Из-за неоднородности деформации в объеме металла различны изменения плотности, что служит причиной появления остаточных напряжений – как растягивающих, так и сжимающих. Наклепанные металлы легче корродируют и склонны к коррозионному растрескиванию.

## Зависимость сопротивления деформированию от плотности дислокаций

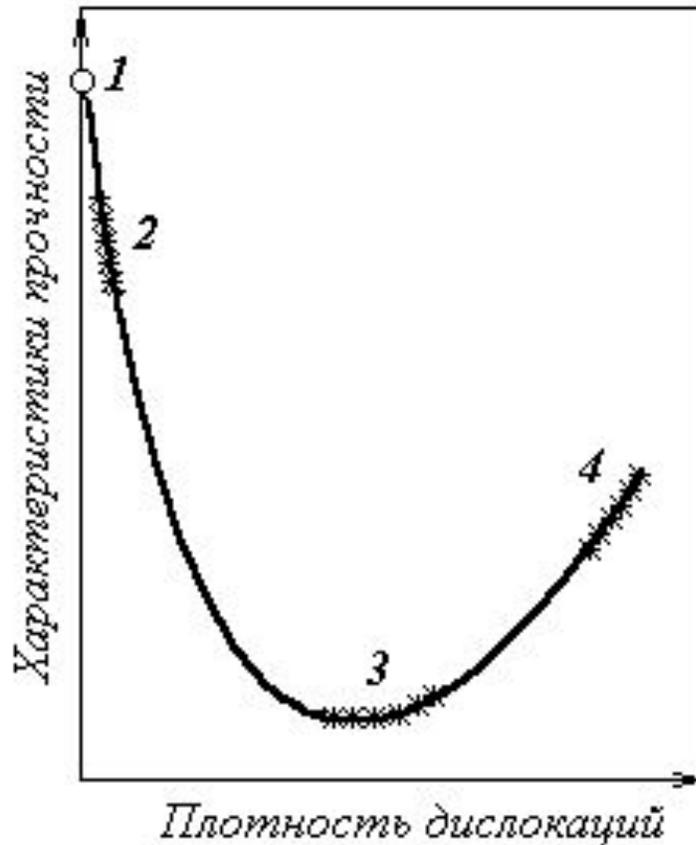


Рис. 3. Зависимость прочности металлов от плотности дислокаций (кривая Одингга): 1 - идеальный кристалл без дефектов; 2 - нитевидные кристаллы ("усы"); 3 - отожженные металлы; 4 - металлы, упрочненные холодной деформацией и другими способами, обеспечивающими высокую плотность дефектов кристаллического строения

1. создание металлов и сплавов с бездефектной структурой, – более прогрессивный.

получают кристаллы небольших размеров (длиной 2–10 мм и толщиной 0,5–2,0 мкм), так называемые «усы», практически без дислокаций, с прочностью близкой к теоретической. Такие кристаллы нашли свое применение для армирования волокнистых композиционных материалов, в микроэлектронике и т. д.

2. наклеп

Методы упрочняющего воздействия можно разделить на поверхностные (обкатка роликами, дробеструйная обработка) и сквозные (прокатка листов, волочение проволоки). Обработка металлов резанием также приводит к наклепу и изменению структуры в тонком поверхностном слое, что необходимо учитывать при последующей эксплуатации изделий.

# Изменение прочности, пластичности и зернистого строения в процессе нагрева деформированного металла

- Для снятия наклепа и возвращения металлу способности деформироваться применяют *рекристаллизационный отжиг*,

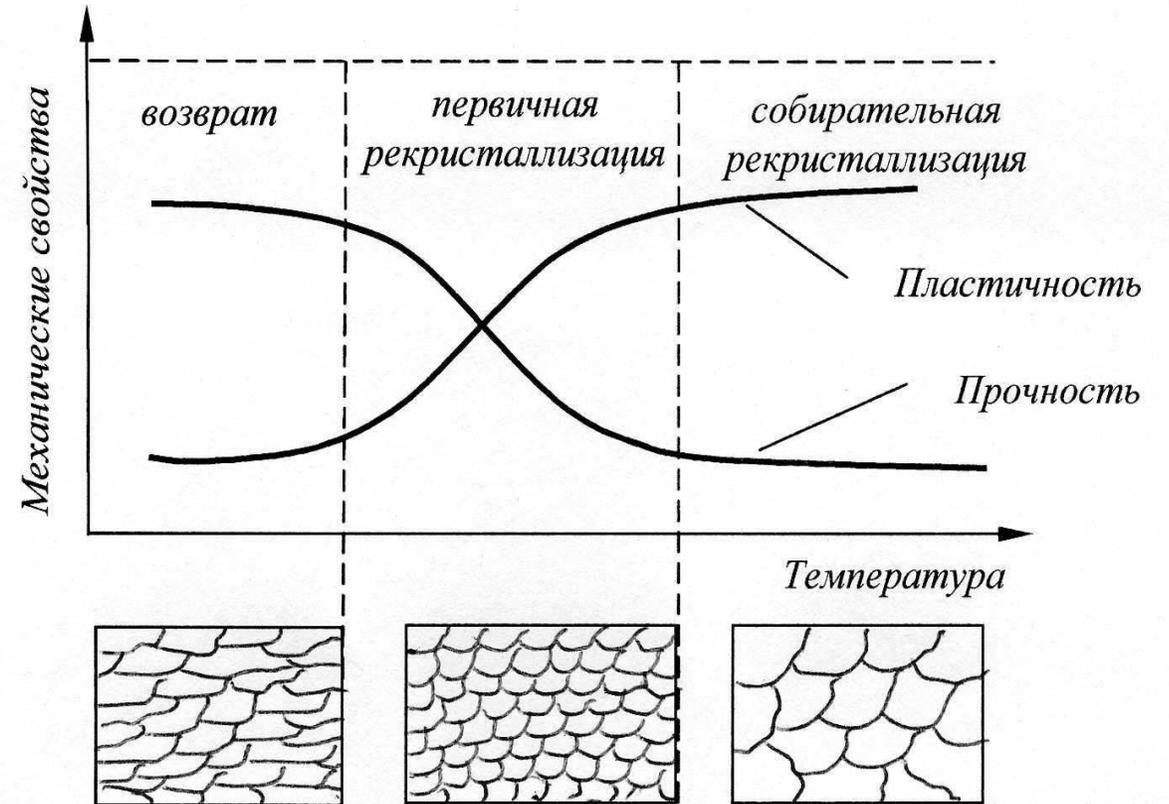
- Температуру начала рекристаллизации, при которой протекает разупрочнение холоднодеформированного металла и восстановление его пластичности называют *температурным порогом рекристаллизации  $T_{ПР}$*

постоянной физической величиной она зависит:

- от длительности нагрева
- степени предварительной деформации,
- величины зерна до деформации и т. д.

Температурный порог рекристаллизации снижается:

- с повышением степени деформации,
- с увеличением длительности нагрева
- с уменьшением величины зерна до деформации



- $T_{ПР}$  для технически чистых металлов составляет примерно  $0,4T_{ПЛ}$ ,
- для чистых металлов снижается до  $(0,1-0,2)T_{ПЛ}$
  - для сплавов возрастает до  $(0,5-0,6)T_{ПЛ}$ .

## Понятие о холодной и горячей деформации

*Холодной деформацией* называют обработку давлением при температурах ниже температуры начала рекристаллизации

При холодной деформации:

- рекристаллизация не происходит
- металл упрочняется, приобретает волокнистое строение
- зерна вытягиваются в направлении действующей силы (образуется текстура деформации).

*Горячей деформацией* называют обработку давлением при температурах выше температуры начала рекристаллизации.

При горячей деформации:

- одновременно с деформацией происходит рекристаллизация металла
- деформированные зерна практически мгновенно заменяются новыми равноосными
- высокая пластичность и низкая твердость и прочность сохраняются в течение всего процесса деформации
- наклепа не происходит.