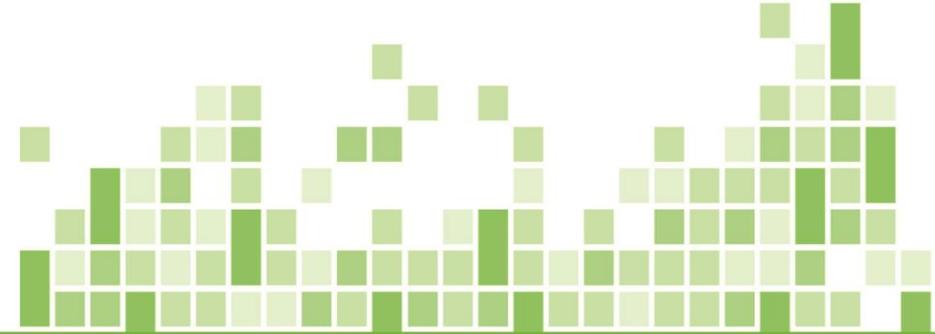




Институт физики
высоких технологий

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Дефекты кристаллической решетки

Лекция 3

Точечные (нульмерные) дефекты -

дефекты соизмеримы с размерами атомов, характеризуются малыми размерами во всех трех измерениях, их размеры не больше нескольких атомных диаметров.

Вакансии - свободные места в узлах кристаллической решетки.

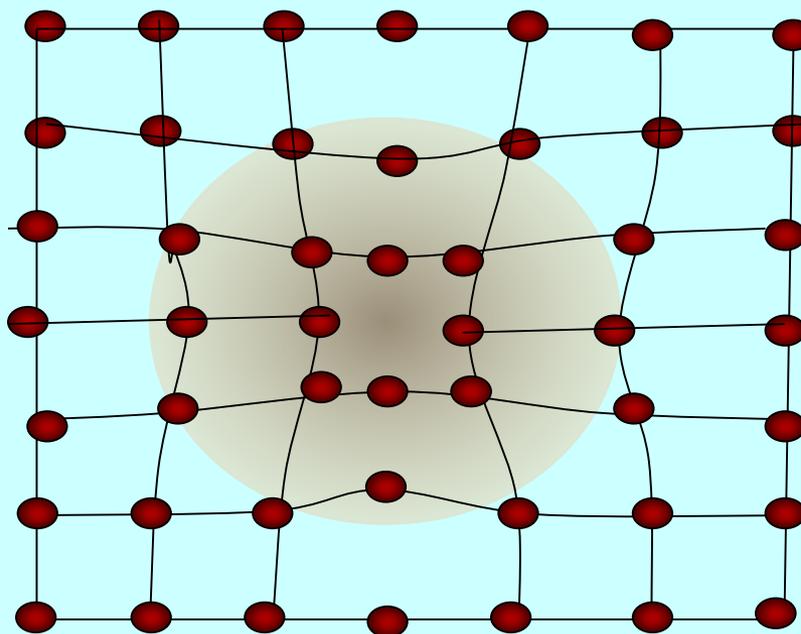


Рисунок - Образование вакансий в атомном кристалле

межузельные атомы данного металла - атомы, сместившиеся из узлов кристаллической решетки в междузельные промежутки.

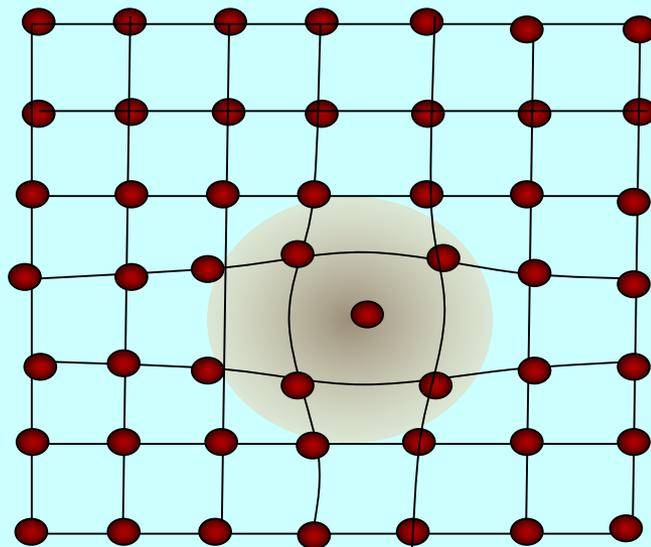


Рисунок - Образование междузельного дефекта в атомном кристалле

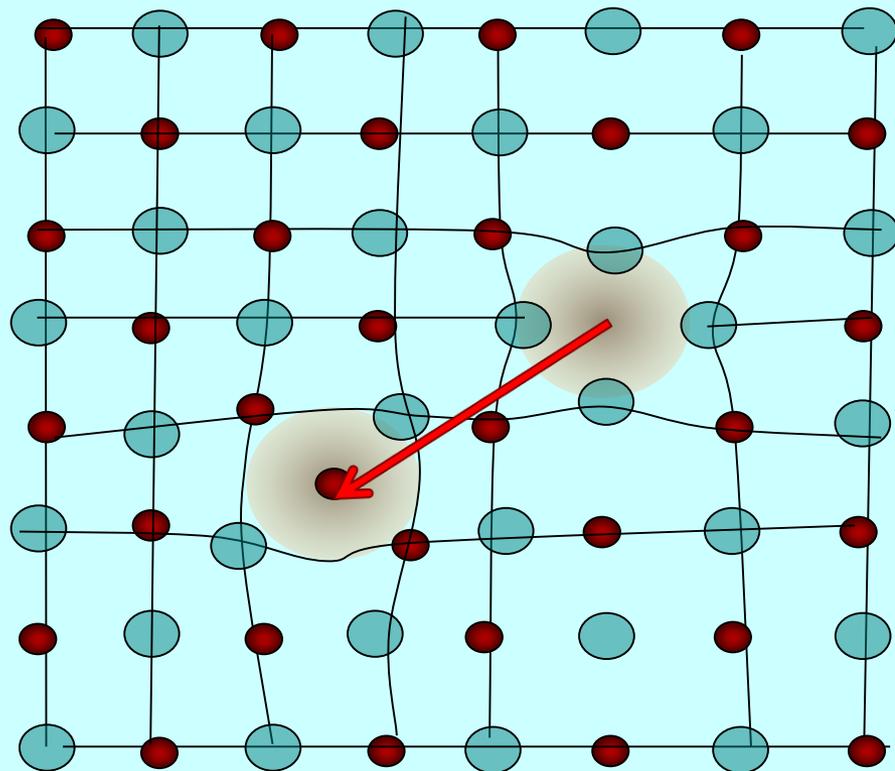


Рисунок - Точечные дефекты в кристалле АВ по Френкелю

При переходе атома из равновесного узла в междуузлие возникает пара *вакансия - межузельный атом*, которая называется **дефектом Френкеля**

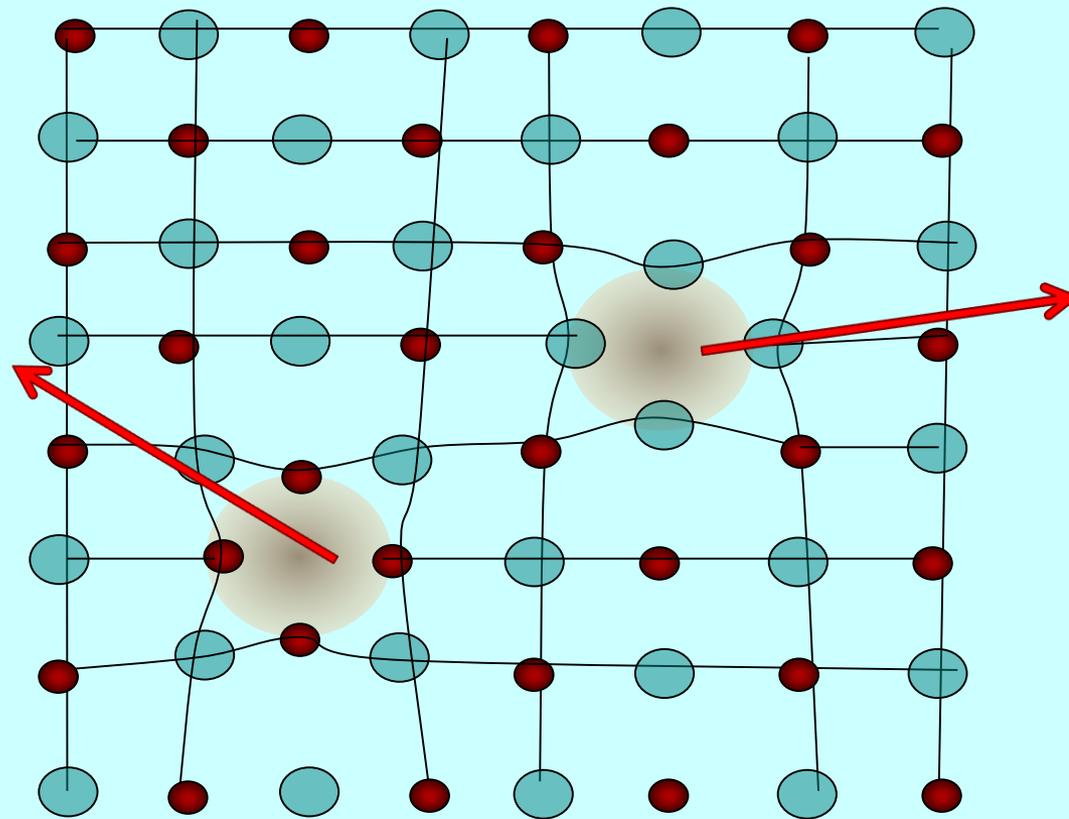
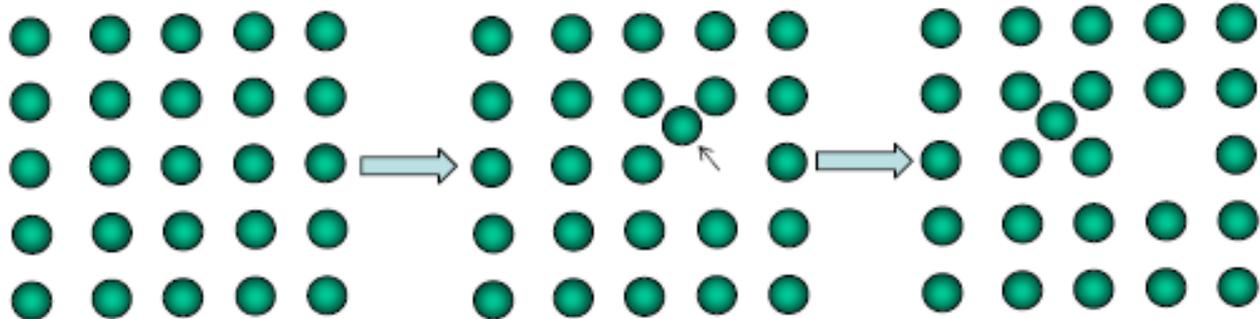


Рисунок - Точечные дефекты в кристалле АВ по Шоттки

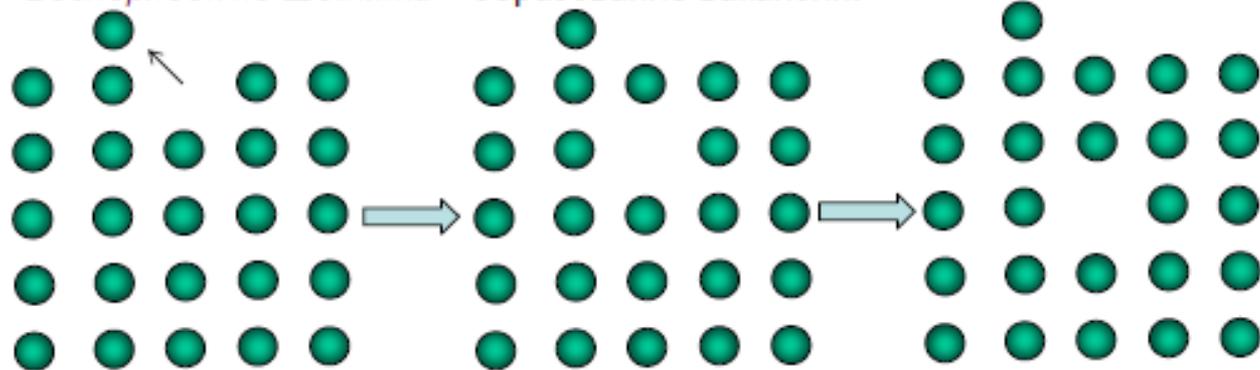
Если атом из своего узла *выходит на поверхность кристалла*, то образующийся дефект называется **дефектом Шоттки**. Вышедший из равновесного положения атом называют **дислоцированным**, а оставшееся пустое место в узле решетки - **вакансией**.



Беспорядок по Френкелю – образование вакансии и межузельного атома.



Беспорядок по Шоттки – образование вакансий.



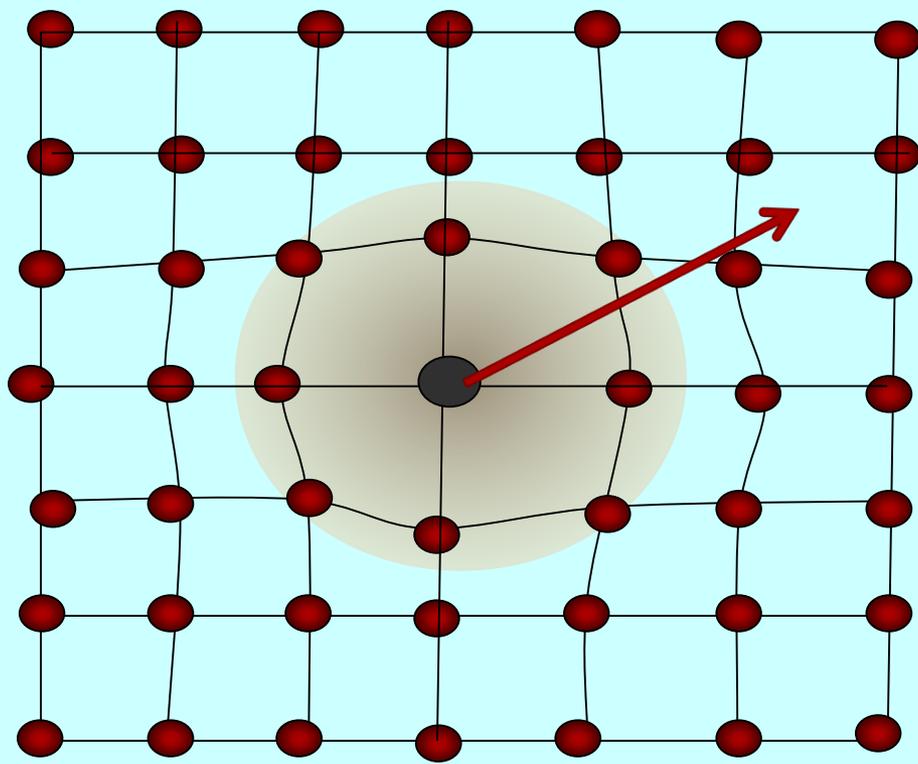


Рисунок - Примесные дефекты замещения

примесные атомы замещения - атомы, по диаметру соизмеримые с атомами данного металла, поэтому замещают атомы основного металла.

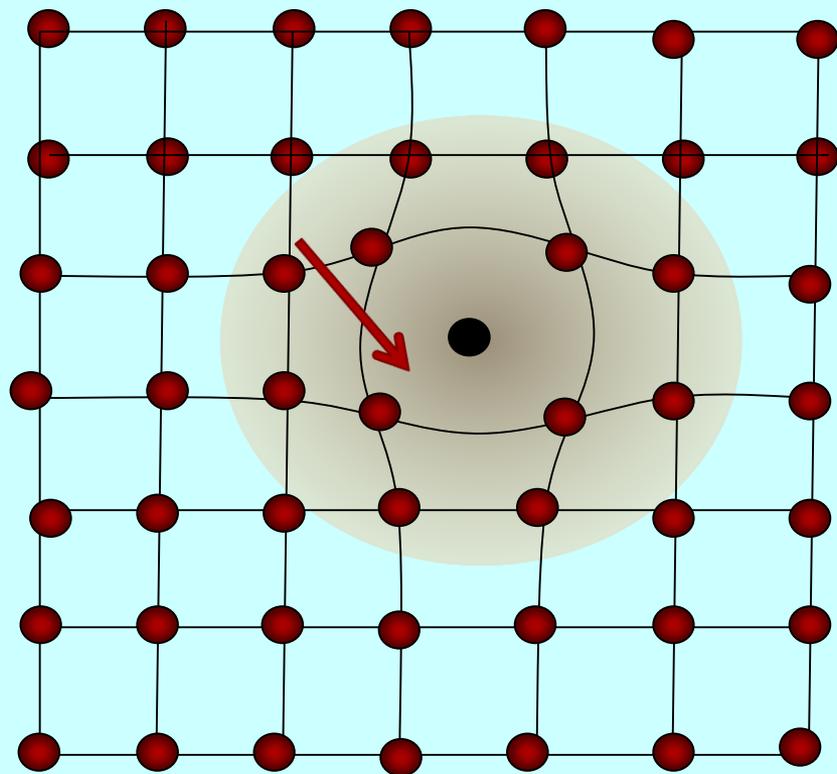


Рисунок - Примесные дефекты внедрения

примесные атомы внедрения имеют очень малые размеры и поэтому находящиеся в междоузлиях .

Линейные (одномерные) дефекты

малы в двух направлениях, а в третьем направлении они соизмеримы с длиной кристалла

- краевые дислокации
- винтовые дислокации
- смешанные дислокации
- Микротрещины
- Ряды вакансий и междоузельных атомов

Дислокации (лат. dislocation — смещение) - линии, вдоль и вблизи которых нарушено правильное периодическое расположение атомных плоскостей кристалла.

Краевые (линейные) дислокации

образуется в результате возникновения в решетке полуплоскости или **экстраплоскости**. Нижний ряд *экстраплоскости* называется **дислокацией**.

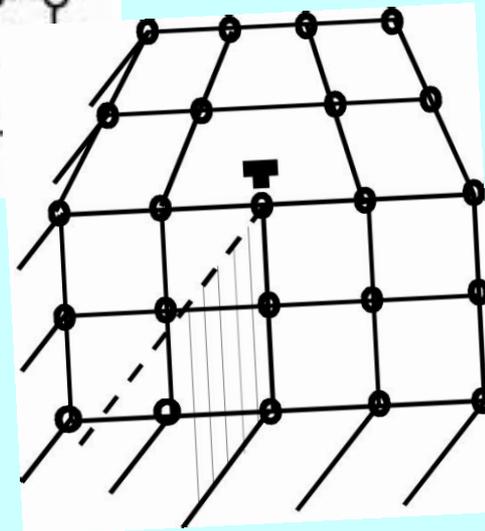
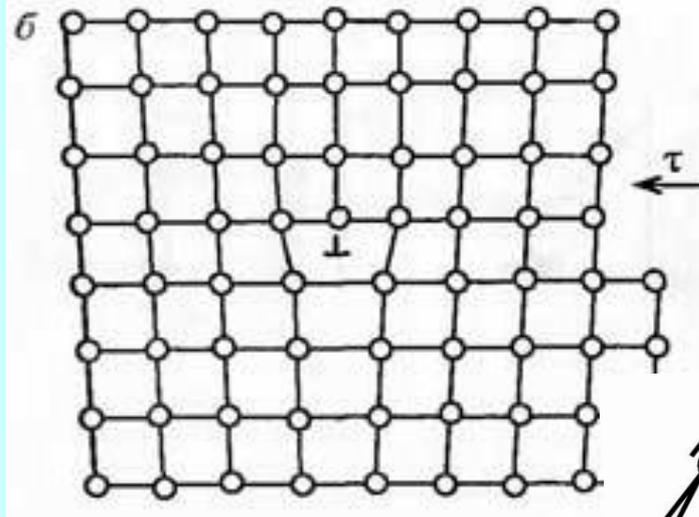
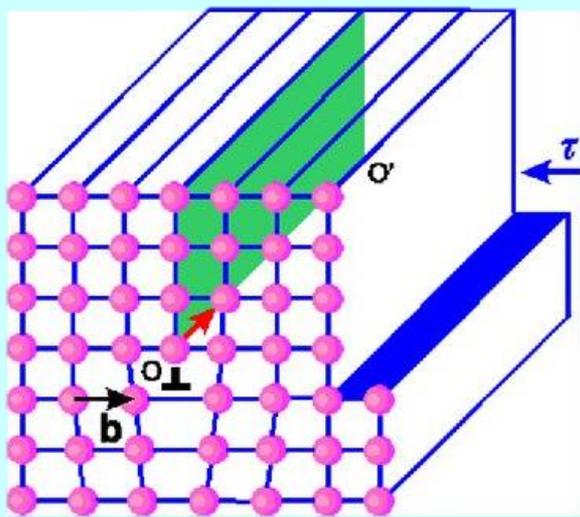


Рисунок - Краевая дислокация – b -вектор Бюргера, экстраплоскость показана зеленым цветом, а плоскость скольжения - синим

Краевая дислокация представляет собой локализованное искажение кр.решетки, вызванное наличием в ней лишней атомной полуплоскости (экстраплоскости). Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то дислокацию называют – положительной и обозначают \perp , и наоборот \top – если в нижней.

Дислокации можно легко представить путем смещения одной части кристалла по отношению к другой, но не по всей плоскости, а только по ее части.

При этом часть соседних атомов в плоскости смещается по отношению к своим соседям, а часть плоскости остается без нарушения взаимного расположения атомов

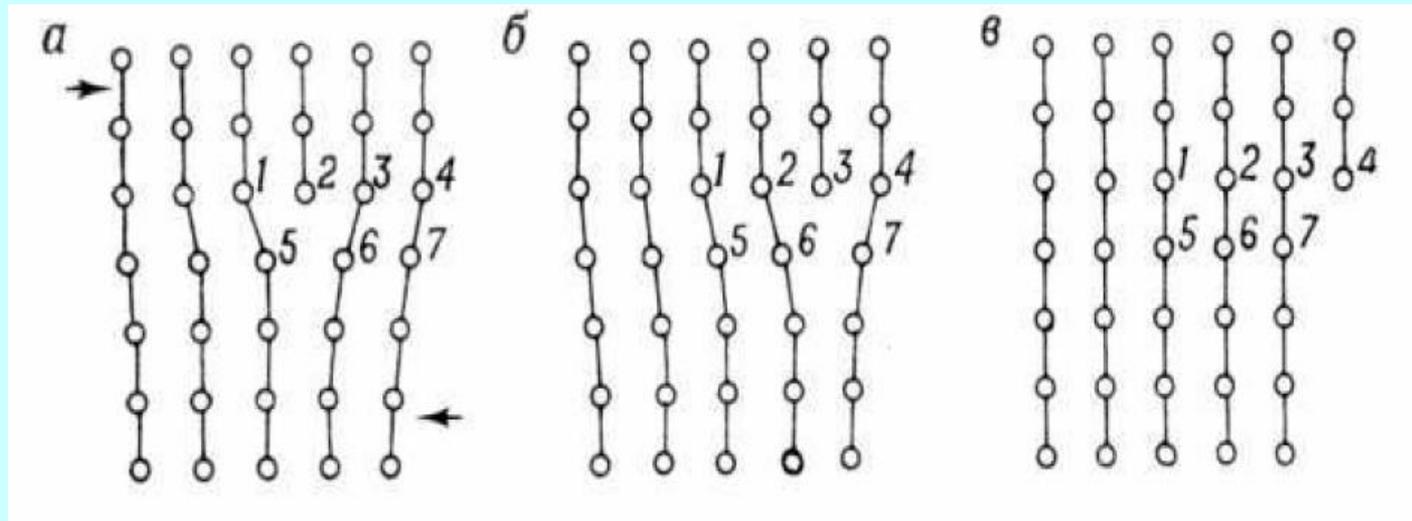


Рисунок - Перемещение линейной дислокации под действием сдвигового напряжения



Силы упругого взаимодействия между дислокациями зависят от знака дислокации: **одноименные отталкиваются, разноименные притягиваются.**

Под действием внешнего напряжения дислокации в кристалле могут двигаться. Т.к. знаки напряжений, создаваемых (+) и (-) дислокациями, противоположны, разноименные дислокации движутся в разные стороны под действием одного и того же внешнего напряжения.

Разноименные дислокации, движущиеся в одной плоскости, при встрече аннигилируют, в результате чего восстанавливается целостность решетки.



Винтовые (спиральные) дислокации

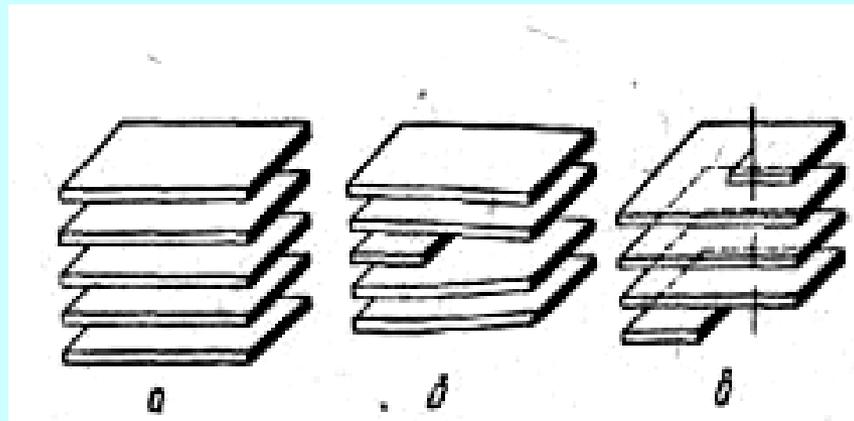
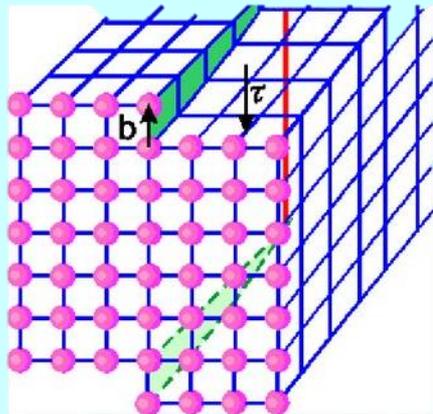
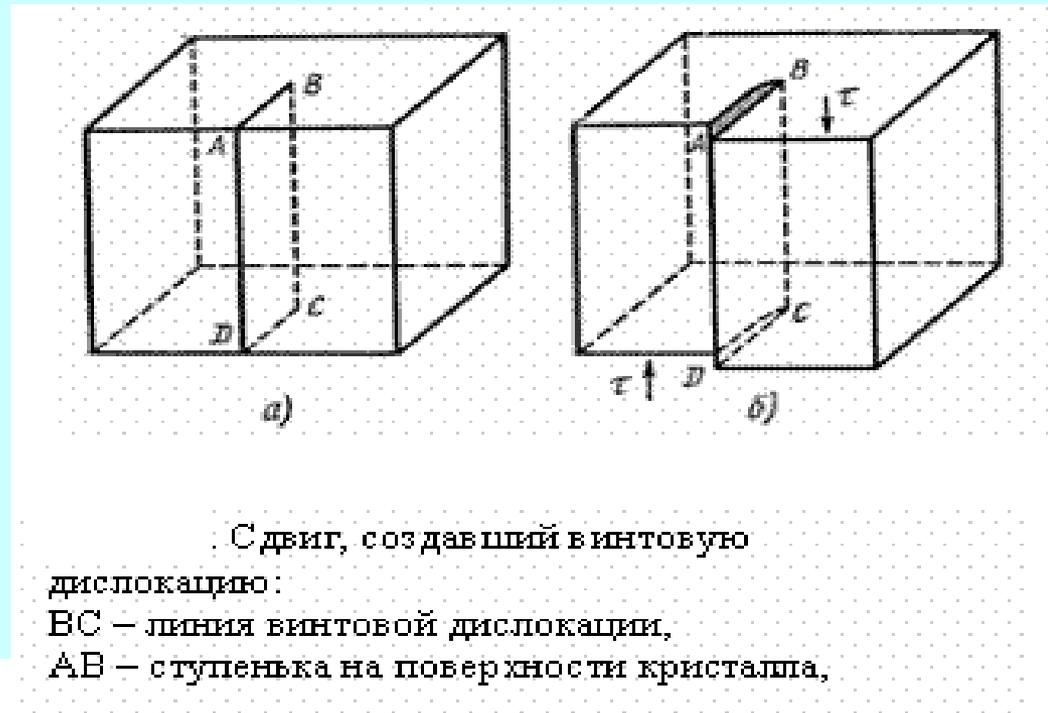


Рисунок - Винтовая дислокация – b -вектор Бюргерса, экстра-плоскость показана зеленым цветом

При образовании винтовой дислокации, линия дислокации (красная) параллельно вектору сдвига τ . Если представить кристалл состоящим из одной атомной плоскости, то винтовая дислокация будет подобна винтовой лестнице. Если винтовая дислокация образована по часовой стрелке, то ее называют – **правой**, против – **левой**.

Винтовая дислокация в кристалле тоже возникает при сдвиге одной части кристалла относительно другой параллельна вектору сдвига. Можно представить, что в кристалле произведен разрез, а затем сдвиг вдоль плоскости разреза.

Линия ВС, отделяющая сдвинутую часть от несдвинутой, и есть **линия винтовой дислокации**.





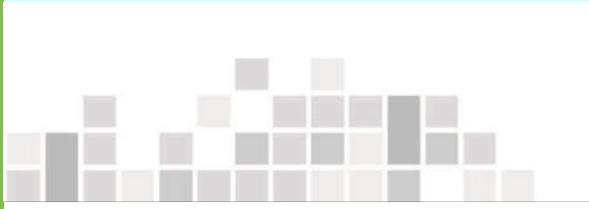
Кристалл, содержащий **винтовую дислокацию**, состоит не из параллельных атомных плоскостей, а как бы из одной-единственной атомной плоскости, закрученной как винтовая лестница.

Ось этого винта ВС и есть линия винтовой дислокации. Выход винтовой дислокации на поверхность кристалла заканчивается незарастающей ступенькой.

Т.о., дислокации — это границы между сдвинутой и несдвинутой частями кристалла, причем

краевая дислокация перпендикулярна вектору сдвига, а *винтовая* — параллельна ему.

Вблизи линии дислокации атомы смещены со своих мест и кр.решетка искажена, что вызывает образование поля напряжений: выше линии дислокации решетка сжата, а ниже растянута.





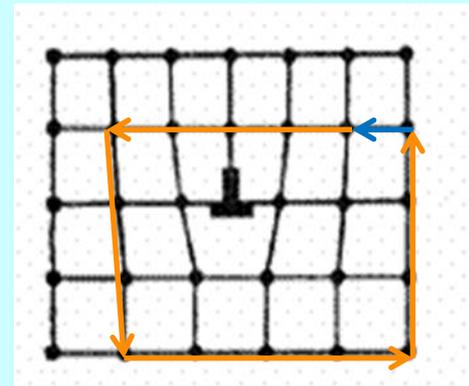
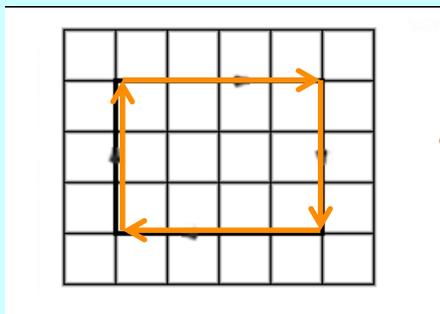
Плотность дислокаций ρ - это суммарная длина дислокаций, приходящаяся на единицу объема V кристалла:

$$\rho = (\Sigma l) / V, \text{ [см/см}^3, \text{ или см}^{-2}\text{]}$$

Для отожженных металлов плотность дислокаций составляет величину 10^6 – 10^3 см⁻²,
после холодной деформации - до 10^{11} – 10^{12} см⁻².

Вектор Бюргерса

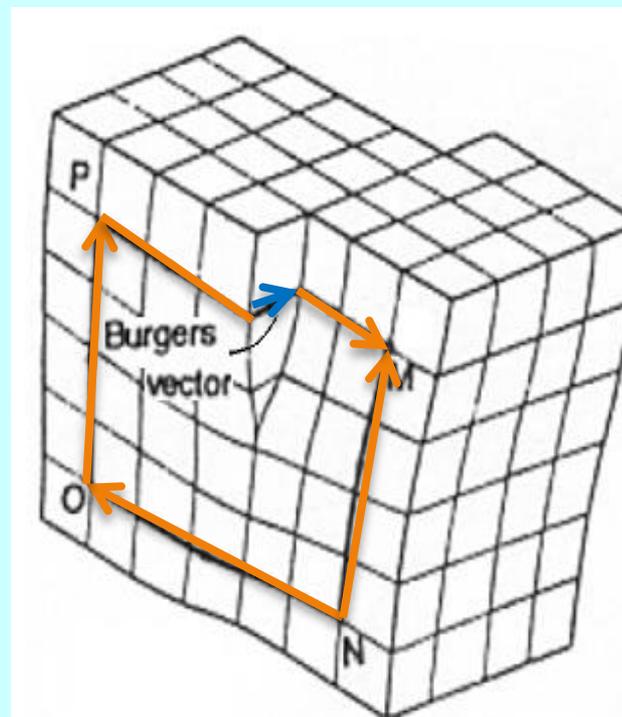
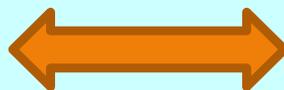
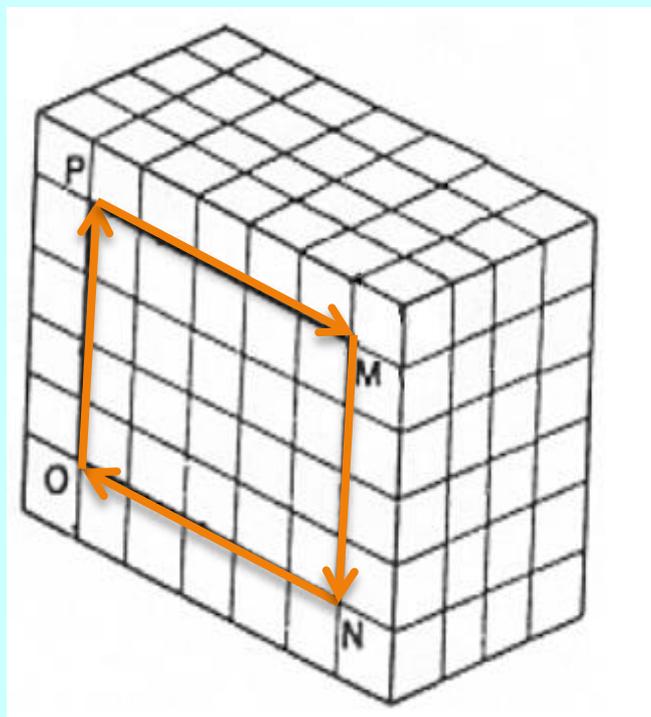
Если в идеальной решетке провести контур (**контур Бюргерса**) вокруг любого, произвольного места, т.е. отложить определенное число параметров решетки вокруг этого места, то контур Бюргерса сомкнется.



b -вектор
Бюргерса

В реальной решетке, содержащей дислокации, контур Бюргерса не сомкнется, т.е. число параметров решетки по разные стороны дислокации будет отличаться на величину b , которая называется **вектором Бюргерса**.





Контур и вектор Бюргера
винтовой дислокации

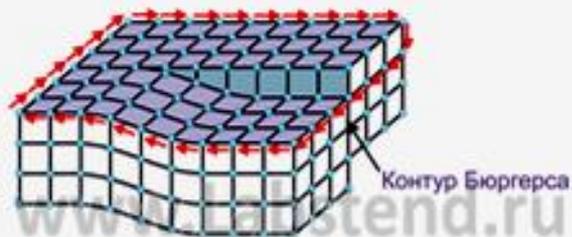


Рисунок - Вектор Бюргера винтовой дислокации



Вектор Бюргерса (b) — количественная характеристика, описывающая искажения кр.решетки вокруг дислокации.

Для **краевой дислокации** вектор Бюргерса **перпендикулярен** линии дислокации, а для **винтовой** - **параллелен**.

Т.к. дислокация - граница области пластического сдвига в кристалле, вектор Бюргерса и есть вектор сдвига. Для дислокации в простой кубической решетке модуль вектора b по абсолютной величине равен одному межплоскостному расстоянию в плоскости и направлении скольжения.

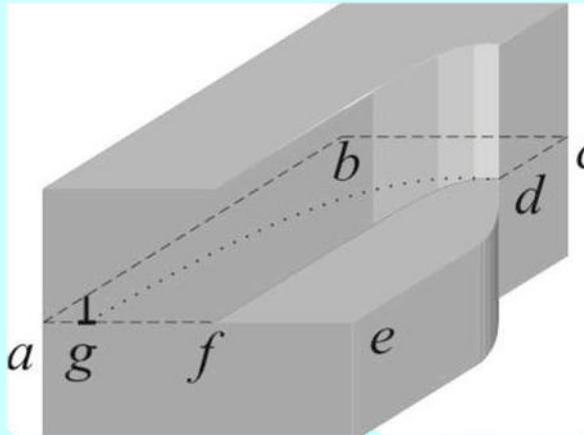


Рисунок – Смешанная дислокация $abcdef$ – плоскость скольжения, gd – линия дислокации

Между краевыми и винтовыми дислокациями возможно любые промежуточные, в которых линия дислокации не обязательно прямая: она может представлять собой плоскую или пространственную кривую.

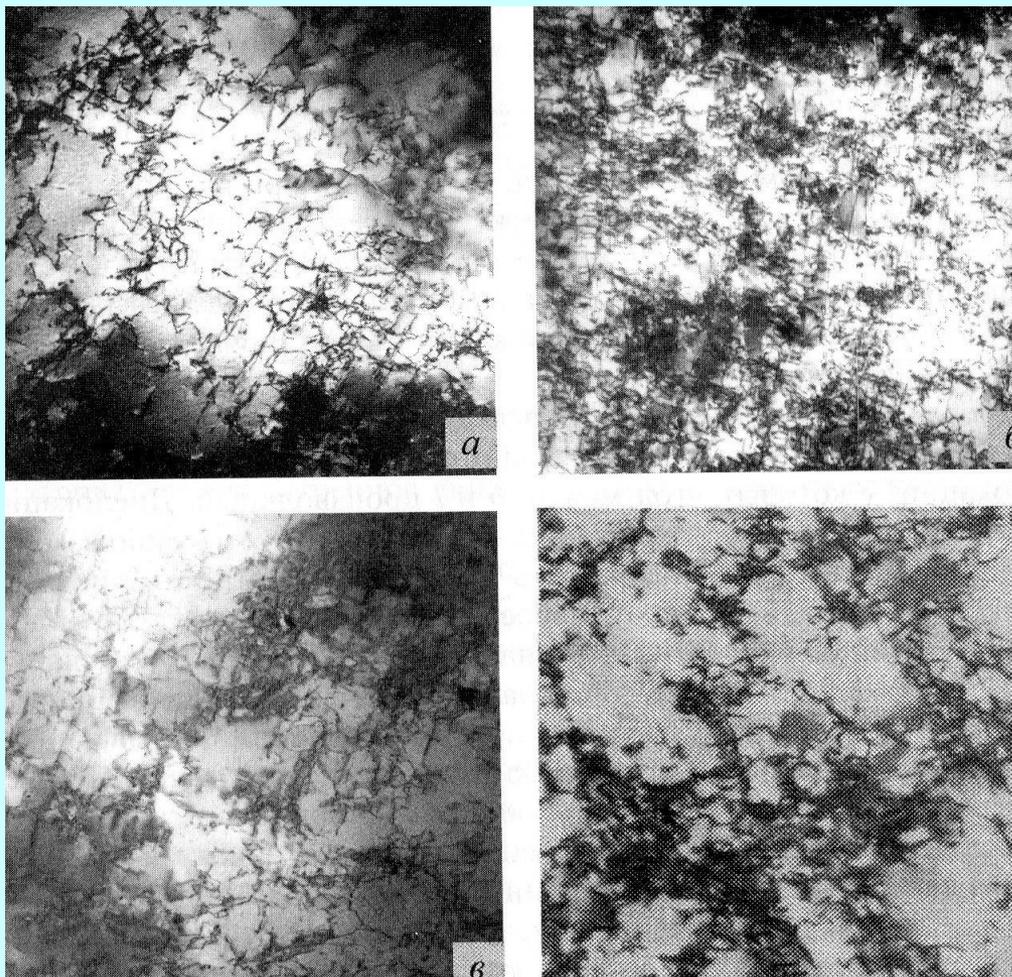


Рисунок - Дислокации в марганцевой стали (снято в просвечивающем электронном микроскопе): а - отдельные дислокации; б - плоское скопление дислокаций; в - дислокации сплетения; г-ячеистая дислокационная структура, х 20 000

Лекция 3

Поверхностные (двумерные) дефекты

- нарушения в кр.решетке, которые обладают большой протяженностью в двух измерениях и протяженностью лишь в нескольких межатомных расстояниях в третьем измерении.

Обычно это место двух ориентированных участков кр.решетки:

- **Границы зерен (большеугольные) / субзерен (малоугольные)** - соседние зерна имеют неодинаковую ориентировку решеток. **Антифазные границы.**
- **Блоки** повернуты друг по отношению к другу на угол от нескольких секунд до нескольких минут.
- **Фрагменты** имеют угол разориентировки не более 5° .
- **Дефекты упаковки**
- **Поверхность кристалла**

Если угловая разориентировка решеток меньше 5° , то такие границы называют **малоугольными границами**. Все субзеренные границы (границы фрагментов, блоков) – малоугольные.

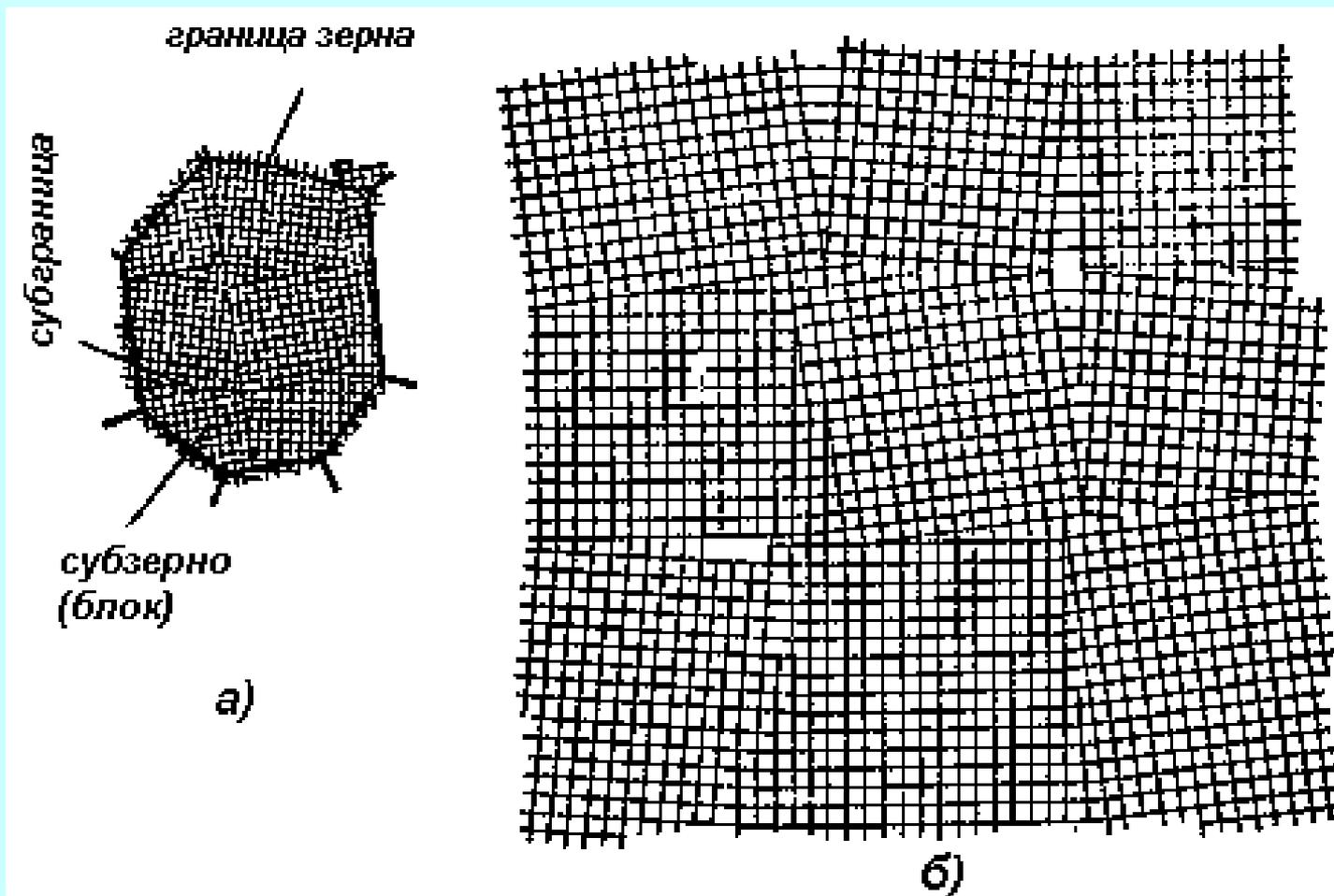
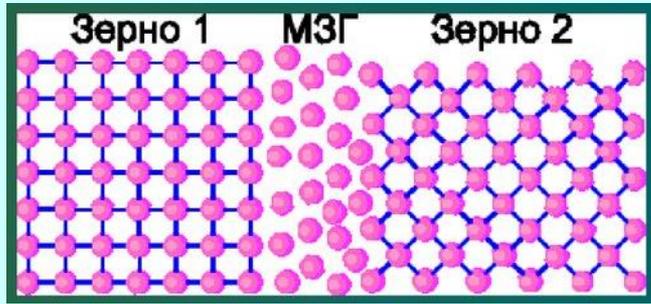


Рисунок - Схема кристалла (зерна) металла с его границами (ширина границ 5-10 межатомных расстояний): а - общий вид; б - блочная (мозаичная) структура внутри зерна

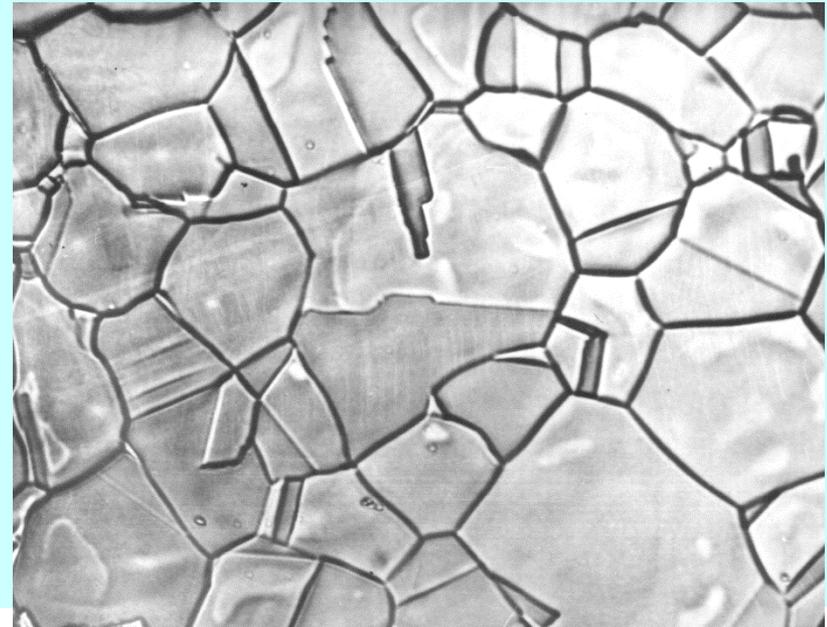
Границы зерен / субзерен

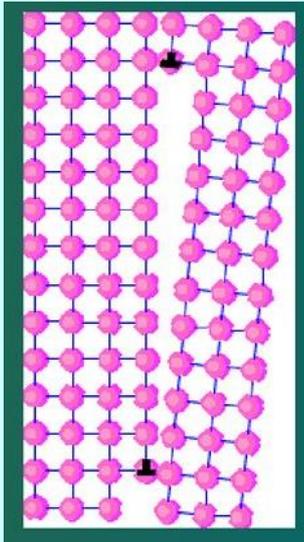


Поликристалл состоит из большого числа зерен с различно ориентированными кристаллическими решетками.

Межзеренные границы (МЗГ) называют большеугловыми, т.к. кристаллографические направления в соседних зернах образуют углы, достигающие десятков градусов.

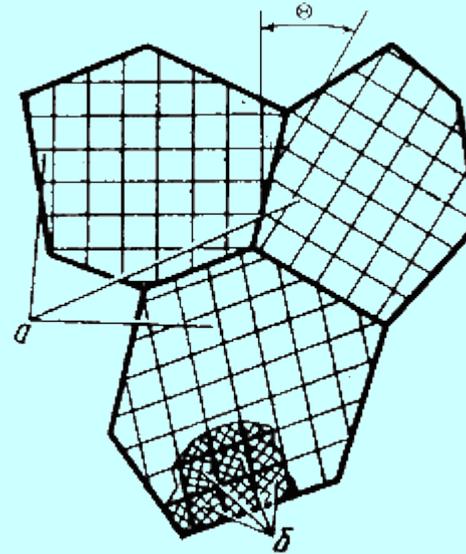
Большеугловые границы представляют собой переходной слой шириной $1 \div 5$ нм. В нем нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций, повышена концентрация примесей.





Каждое зерно состоит из отдельных субзерен, образующих структуру.

Субзерна разориентированны относительно друг друга от нескольких долей до единиц градусов ($<5^\circ$) – так возникают малоугловые границы, состоящие из совокупности дислокаций.



Границы зерен и фаз могут совпадать (**когерентные**), совпадать частично (**полуккогерентные**) и не совпадать (**некогерентные**).

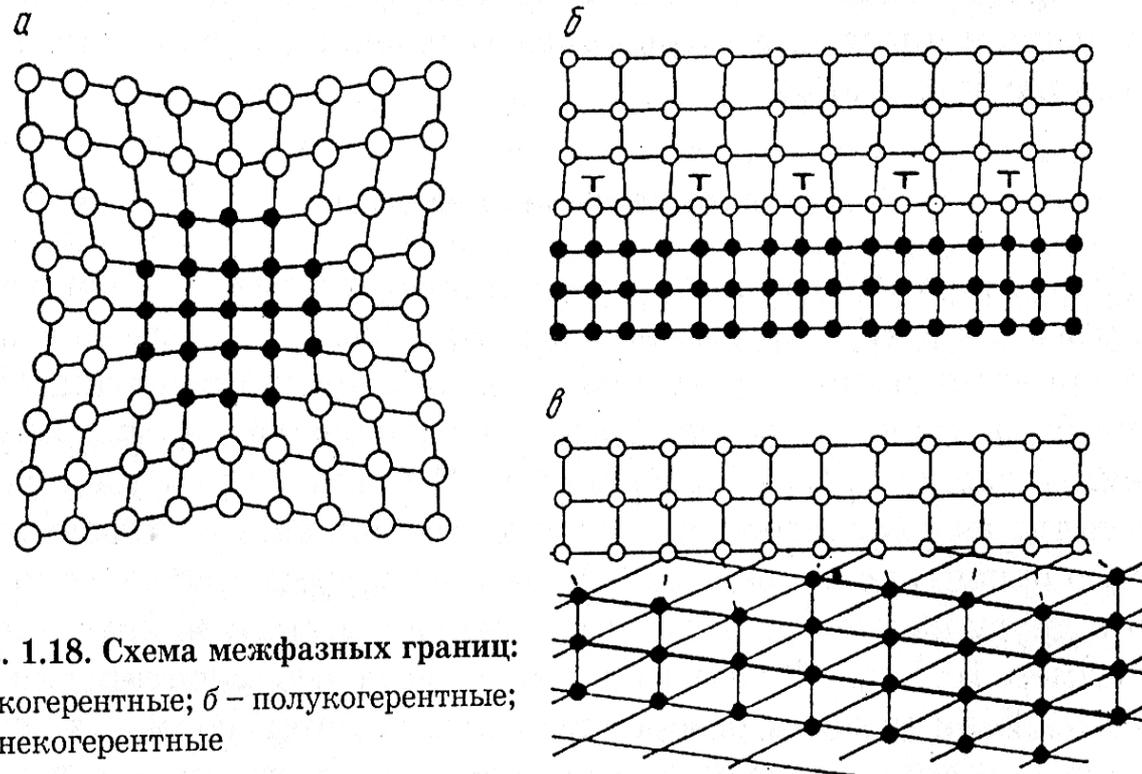
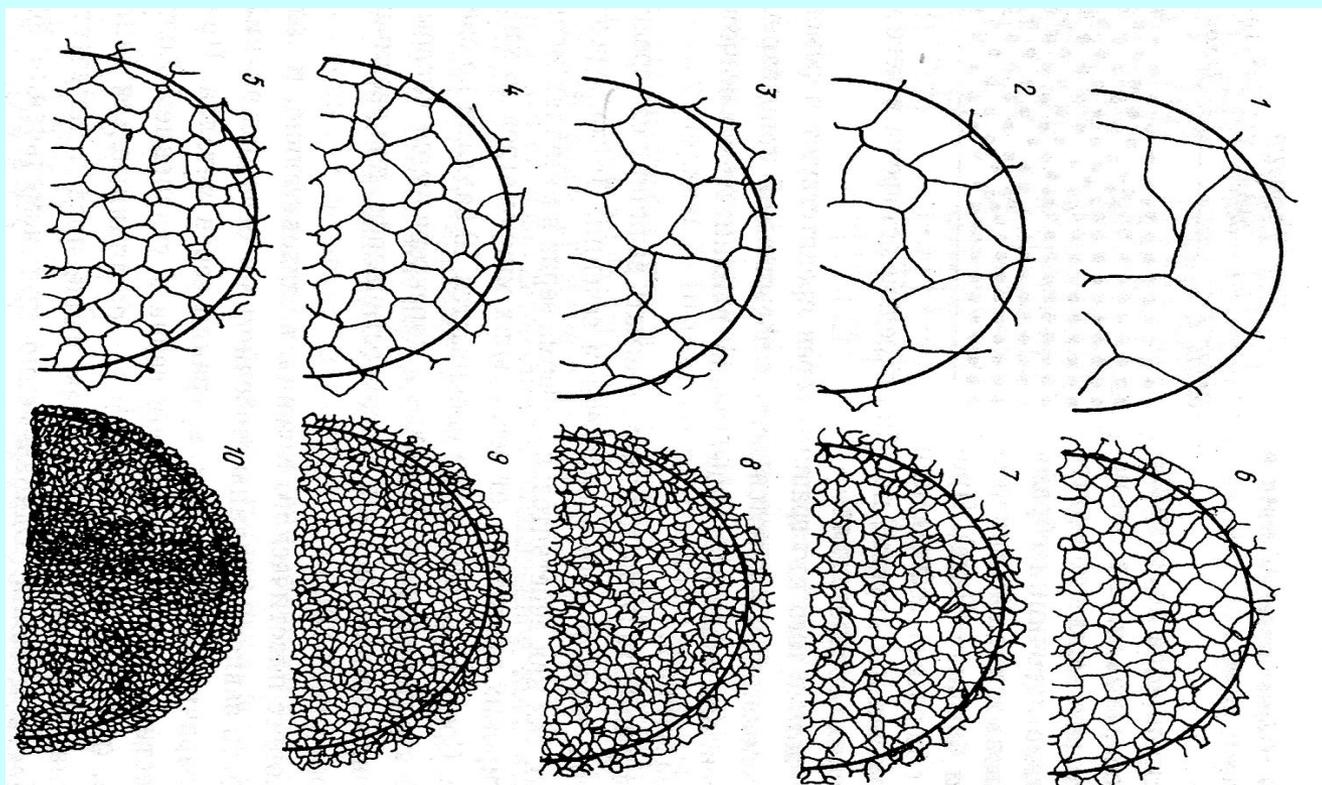


Рис. 1.18. Схема межфазных границ:
а – когерентные; б – полуккогерентные;
в – некогерентные

Под размером зерна принято понимать величину его среднего диаметра, выявляемого в поперечном сечении.

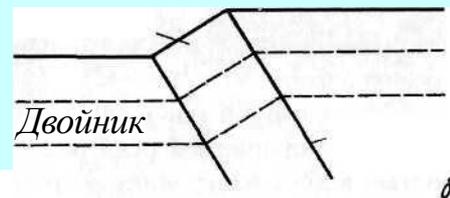
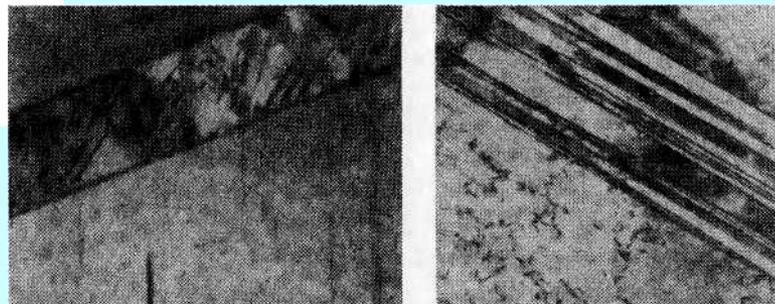
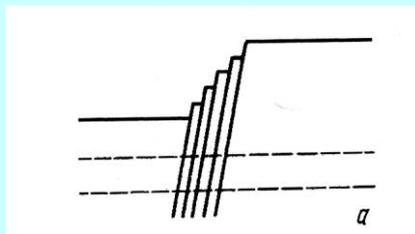
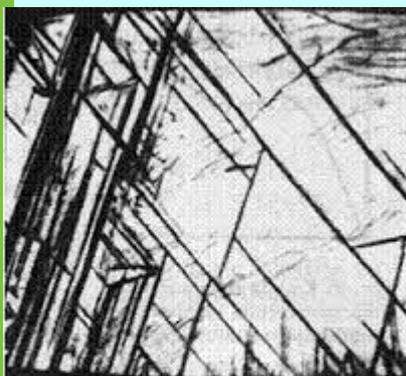


Шкалы для определения величины зерна (ГОСТ 5639–82). $\times 50$

Средний размер зерна оценивается 10 баллами по спец. шкале и характеризуется числом зерен, приходящихся на 1 мм^2 поверхности шлифа, при увеличении в 100 раз.

Двойникованием (образованием двойников) - симметричная переориентация областей кр.решетки. Решетка внутри двойниковой прослойки является зеркальным отображением решетки в остальной части кристалла. Обычно деформация двойникованием протекает в тех случаях, когда деформация скольжением, т.е. путем движения дислокации, затруднена.

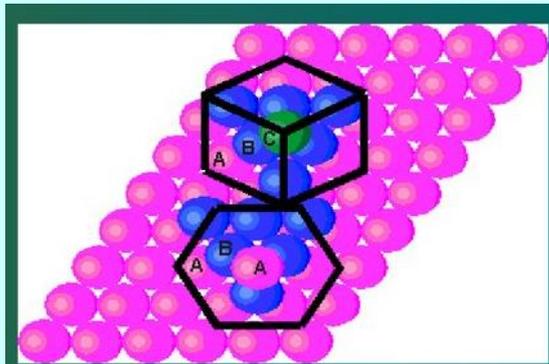
*Деформация скольжением (а)
двойникованием (б)*



*Двойники отжига (а) деформационные,
x 16 000 (б)*

Рисунок 2. 21 - Двойники деформации в цинке (Дерягер, Гвино)

Дефекты упаковки



- Рис. Модели плотной шаровой упаковки

ДУ – часть атомной плоскости, ограниченную дислокациями, в пределах которой нарушен нормальный порядок чередования слоев.

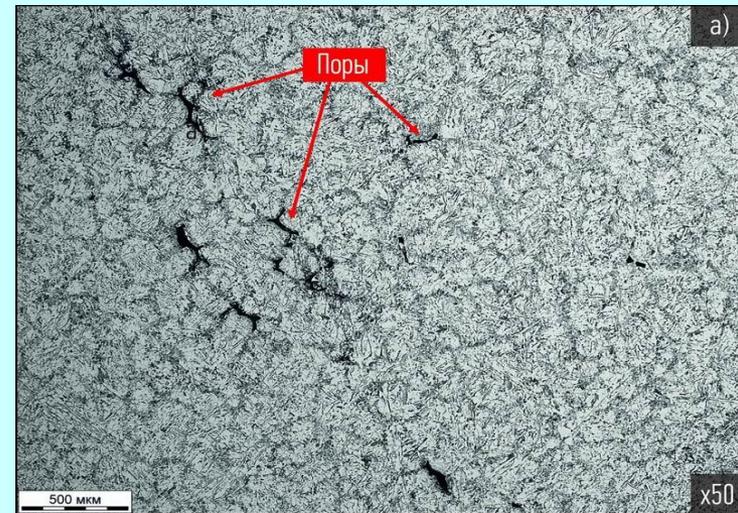
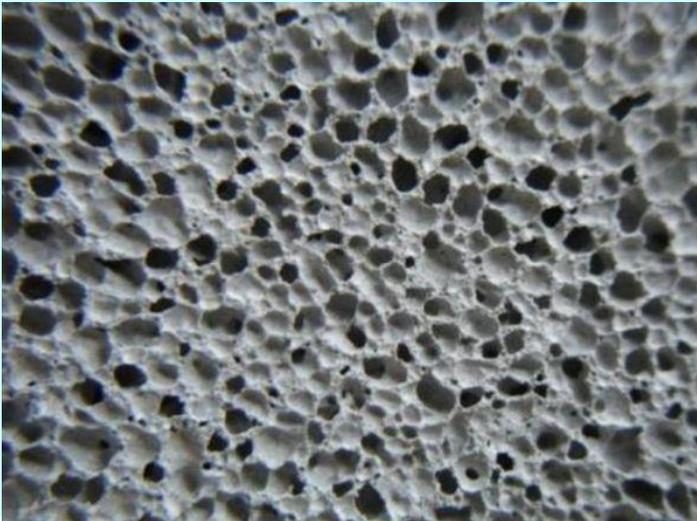
Например, в плотноупакованных сплавах с ГЦК решеткой слои чередуются ABCABCABC..., а при прохождении через дефект упаковки ABCBABC..., чередование ВС характерно для ГПУ...

Т.о., подобный дефект – как бы тонкую прослойку с ГПУ-решеткой в ГЦК-решетке.

Объемные (трехмерные) дефекты

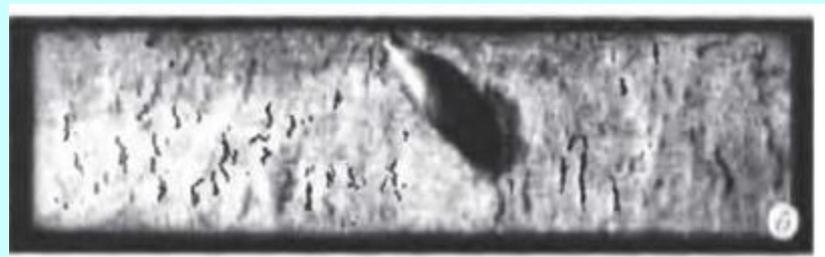
- несовершенства, которые имеют размеры в трех измерениях (макродефекты): поры, газовые пузыри, неметаллические включения, микротрещины и т. д. Эти дефекты снижают прочность металла.

Поры - заполненные газом полости в материале, имеющие округлую, вытянутую или более сложную форму.



Газовые пузыри образуются вследствие

выделения газов (оксидов углерода, азота, водорода, монооксида кремния) в период кристаллизации, т.к. их растворимость в твердом металле значительно меньше, чем в жидком. Пузыри газа, возникающие в объеме металла, всплывают или частично фиксируются в затвердевающем металле.



Неметаллические включения — химические соединения Me с неMe, находящиеся в сталях и сплавах в виде отдельных фаз.

