

**Курсовая работа по дисциплине «Материаловедение»**

**на тему:**

**Основные виды дефектов структуры и их влияние на свойства металлов и сплавов.**

Автор: студент группы

Преподаватель:.

Москва, 2020 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. План-задание.....	стр.3
2. Введение.....	стр.4
3. Дефекты кристаллического строения .....	стр.5
3.1. Точечные дефекты.....	стр.6
3.2. Линейные дефекты.....	стр.8
3.3. Поверхностные дефекты.....	стр.9
4. Факторы, определяющие число дефектов.....	стр.12
4.1. Образование дефектов.....	стр.12
4.2. Концентрация и плотность дефектов .....	стр.16
5. Механизм влияния дефектов на свойства.....	стр.18
5.1. Перемещение дефектов.....	стр.18
5.2. Взаимодействие дефектов друг с другом.....	стр.21
6. Изменение свойств при изменении числа дефектов.....	стр.24
7. Способы влияния на плотность дефектов.....	стр.27
8. Заключение.....	стр.29
9. Список использованных источников .....	стр.30

## 1. ПЛАН-ЗАДАНИЕ.

Тема: Основные виды дефектов и их влияние на свойства металлов и сплавов.

1. Виды дефектов.
2. Точечные дефекты.
3. Линейные дефекты.
4. Поверхностные дефекты.
5. Факторы, определяющие число дефектов.
6. Механизм влияния дефектов на свойства.
7. Изменение свойств при изменении числа дефектов.
8. Способы влияния на плотность дефектов.

## 2. ВВЕДЕНИЕ.

Большую роль в развитии авиационной и ракетно-космической техники играет создание материалов с уникальными и новыми свойствами. В настоящее время требуются материалы, которые способны обеспечить работоспособность техники и конструкций в совершенно разных и экстремальных условиях эксплуатации. Решение многих технических проблем, связанных с уменьшением массы машин и приборов, повышением их надёжности, качества и работоспособности, а так же совершенствования технологии производства во многом зависит от совершенствования материалов.

Для их разработки проводится огромное количество исследований, направленных на изучение структуры, свойств, состояния поверхности металла, а так же методов управления структурой и свойствами металлических материалов.

Каждый металл или металлический сплав подвергается тепловому и механическому воздействию, а значит, меняет свою структуру и свойства. В ходе этих изменений в кристаллической решетке металлов появляются несовершенства или дефекты. Они существенно снижают технологические свойства металла в условиях его обработки и эксплуатационную стойкость.

Исследование дефектов на различных «надмолекулярных» уровнях строения является ключевым моментом в направленном контроле свойств функциональных материалов, как существующих, так и еще не открытых. В связи с этим в задачи установления причин неудовлетворительного качества металлопродукции входит не только выявление дефектов, но и установление их природы и механизма и причин возникновения.

Целью данной работы будет рассмотрение и изучение дефектов кристаллического строения, а так же влияния тех или иных нарушений кристаллической решетки на свойства и характеристики металла.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- Рассмотрена информация о дефектах и их классификации;
- Рассмотрены факторы, влияющие на появление и свойства дефектов;
- Рассмотрены механизмы влияния дефектов на свойства и характеристики металлов.
- Рассмотрено влияние на свойства материала при изменении числа дефектов.
- Рассмотрены способы влияния на плотность дефектов.

### **3. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ.**

Все металлы и металлические сплавы имеют кристаллическое строение. Их атомы расположены закономерно. Другими словами, полученные при обычных условиях металлы— это поликристаллические тела, то есть они состоят из большого количества мелких кристаллов, которые различно ориентированы по отношению друг к другу и приобретают неправильную форму при кристаллизации. [1,6]

Любой реальный кристалл имеет значительное количество структурных несовершенств или дефектов, которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на физические, механические, химические, технологические свойства металла. Дефекты кристаллического строения— это энергетически возбужденные состояния кристаллической решетки, которые связаны с нарушениями идеального периодического строения решетки и отклонения её строения от совершенной структуры. [6]

Основная причина возникновения дефектов строения— тепловые колебания в узлах кристаллической решетки отдельных атомов в процессе кристаллизации, а также наличие примесей, результат механических, тепловых воздействий и магнитных или электрических полей. [2]

Для лучшего понимания вопросов связанных с дефектами кристаллической решетки, следует рассмотреть классификацию важнейших видов дефектов строения поликристаллического металла.

#### **Классификация дефектов.**

Существует несколько способов классификации дефектов:

1) Деление дефектов на собственные и несобственные или примесные.

*Примесные* дефекты, как следует из названия, обусловлены присутствием чужеродных атомов или молекул.

*Собственные* дефекты не меняют качественного состава кристалла (меняться может лишь количественный состав). Они возникают из-за влияния температуры, механических и других видов воздействия на твердую фазу. [3]

2) Деление на равновесные и неравновесные (рассмотрение дефектов с позиций равновесия в системе).

*Равновесными* называются дефекты, находящиеся в термодинамическом равновесии со структурой. Концентрация равновесных дефектов кристалла зависит от температуры. При ее повышении концентрация таких дефектов возрастает, а при ее снижении, соответственно, уменьшается. Причем при возвращении кристалла в исходное состояние, то есть к исходной температуре, концентрация в точности будет соответствовать исходной. [3]

*Неравновесными* называются дефекты, не находящиеся в равновесии со структурой и имеющие вследствие этого высокие значения энергии образования. Неравновесные дефекты тоже подвержены влиянию температуры. Например, если выдерживать кристалл с дефектами при постоянной (обычно, повышенной) температуре длительное время, концентрация неравновесных дефектов уменьшается. Это происходит за счет возрастания их подвижности. При возвращении кристалла к исходной температуре концентрация таких дефектов не восстанавливается. Это значит, что отсутствует прямая связь концентрации дефектов с температурой, которая имеет место в случае равновесных дефектов. [3]

Малая подвижность и большое время жизни дефектов структуры позволяют классифицировать их по чисто геометрическому признаку, а именно по числу измерений, в которых качественные нарушения структуры кристалла простираются на расстояния: [7]

**Нульмерные (точечные)** дефекты—характеризуются малыми размерами во всех трех измерениях. Их размеры соизмеримы с размерами атомов.

**Одномерные (линейные)** дефекты— малы в двух направлениях, а в третьем направлении они соизмеримы с длиной кристалла.

**Двумерные (поверхностные)** дефекты— обладают большой протяженностью в двух измерениях и протяженностью всего в нескольких межатомных расстояниях в третьем измерении.

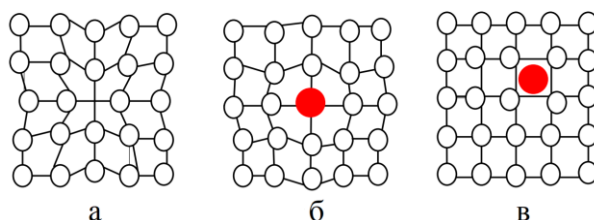
**Трехмерные (объемные)** дефекты— имеют размеры в трех измерениях (макродефекты), например: поры, газовые пузыри, неметаллические включения, микротрещины и т. д. Эти дефекты снижают прочность металла. [5]

### 3.1. ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ.

**Точечный дефект** — это нарушение кристаллической структуры, размеры которого во всех трех измерениях сравнимы с одним или несколькими (очень малыми) межатомными расстояниями. Дефекты данного вида могут иметь простую или сложную структуру. К простейшим точечным дефектам кристалла относятся: [7]

1) **Вакансия** — отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки, «дырки», которые образовались в результате различных причин (рис.1.а). Перемещаясь по кристаллу, одиночные вакансии могут встречаться и объединяться в дивакансии, тривакансии, вакансионные тетраэдры. Скопления многих вакансий — кластеры — образуют поры, пустоты. [7]

Рис. 1. Точечные дефекты  
а- вакансия; б- примесный атом; в-  
дислоцированный атом



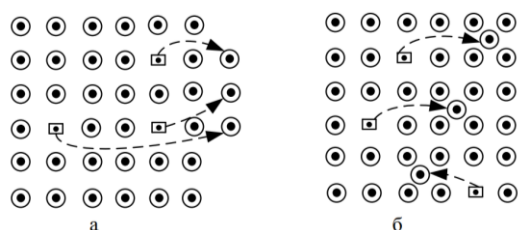
2) Примесные атомы всегда присутствуют в металле, так как практически невозможно выплавить химически чистый металл. Они могут иметь размеры больше или меньше размеров основных атомов и располагаются в узлах решетки или междуузлиях, но преимущественно в таких микропорах, где для них имеется достаточно свободного пространства. (рис.1. б). [7]

3) Дислоцированный атом – это атом, вышедший из узла решетки и занявший место в междуузлии (рис.1. в). Концентрация дислоцированных атомов значительно меньше, чем вакансий, так как для их образования требуются существенные затраты энергии. При этом на месте переместившегося атома образуется вакансия. [7]

Отличительной особенностью точечных дефектов является то обстоятельство, что их трудно наблюдать непосредственно. Поэтому обнаруживать и изучать их приходится в основном по тому влиянию, которое они оказывают на физические свойства кристалла.

Точечные дефекты могут взаимодействовать друг с другом, образуя различные нейтральные сочетания. Нейтрализация дефектов решетки с помощью электронов и дырок тем более вероятна, чем больше электронов и дырок в зоне проводимости кристалла, т. е. чем уже запрещенная зона. Дефекты такого типа имеются в полупроводниках. В кристаллах с широкой запрещенной зоной, т. е. в диэлектриках, более вероятна нейтрализация точечных дефектов друг с другом путем образования парных дефектов — дефектов Френкеля (рис.2. а) или дефектов Шоттки (рис.2.б). [7]

Рис.2. Дефекты по Френкелю (б);  
Дефекты по Шоттки (а)



1. *Дефекты по Я. Н. Френкелю.* Атом или ион перемещается из своего нормального равновесного положения (узла) в нестабильное, промежуточное положение (междуузлие), образуя атом или ион внедрения и вакансию, т.е. незанятый узел решетки.

2. *Дефекты по В. Шоттки.* Атом или ион перемещается из своих уравновешенных положений на поверхности кристалла. [7]

Дефект Шоттки — пара из катионной и анионной вакансий. Наличие дефектов Шоттки уменьшает плотность кристалла, поскольку атом, образовавший вакансию, диффундирует на поверхность кристалла.

Дефект Френкеля — вакансия и противоположно заряженный атом в междуузлии. Эти дефекты не влияют на плотность кристалла.

В общем случае в кристалле могут быть и дефекты Френкеля, и дефекты Шоттки, причем преобладают те, для образования которых требуется меньшая энергия. [7]

### 3.2. ЛИНЕЙНЫЕ ДЕФЕКТЫ.

**Линейные дефекты**— одномерные, т.е. протяженные в одном измерении: нарушения периодичности в одном измерении простираются на расстояния, сравнимые с размером кристалла, а в двух других измерениях не превышают нескольких параметров решетки. [7]

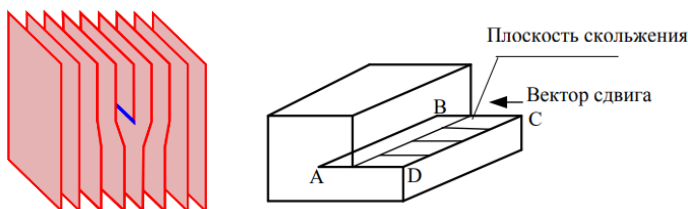
К линейным дефектам относят дислокации, микротрещины, неустойчивые образования в виде цепочки точечных дефектов. [3]

**Дислокации** – это дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. В центре такой дислокации находится искажённая плоскость с отличными от равновесных межатомными расстояниями. Эта область транслируется вдоль **линии дислокации**. Концы этой линии выходят на поверхность кристалла или же она образует внутри кристалла замкнутую **дислокационную петлю**. В зависимости от того, как расположены участки этой линии по отношению к вектору сдвига, различают: [7,3]

- Краевые дислокации;
- Винтовые дислокации.

1) **Краевая дислокация** представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край “лишней“ полуплоскости, которая называется **экстраплоскостью** (линия скольжения). Краевая дислокация напоминает книгу, у которой оторвали часть листа (рис. 3). [7]

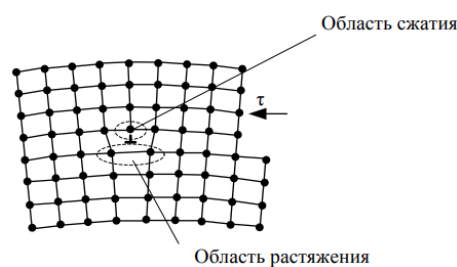
Рис. 3. Краевая дислокация и результат её перемещения



Наибольшие искажения в расположении атомов в кристалле имеют место вблизи нижнего края экстраплоскости. Вправо и влево от края экстраплоскости эти искажения малы (несколько периодов решетки), а вдоль края экстраплоскости искажения простираются через весь кристалл и могут быть очень велики (тысячи периодов решетки) (рис. 4). [7]

На рис.4 показан разрез параллелепипеда по атомной плоскости, перпендикулярной линии АВ. [7]

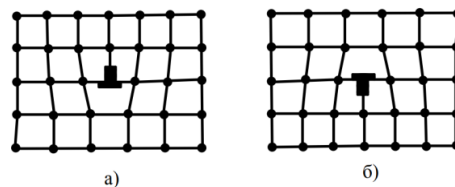
Рис. 4. Разрез параллелепипеда по атомной плоскости, перпендикулярной линии АВ для краевой дислокации ( $\tau$  - вектор сдвига)



Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то краевая дислокация – **положительная** ( $\perp$ ), если в нижней, то – **отрицательная** ( $\tau$ ) (рис. 5). Дислокации одного знака отталкиваются, а противоположные притягиваются. [7]



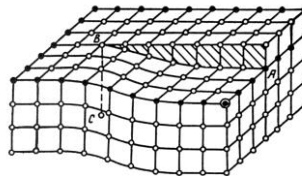
Рис. 5. Положительная (а) и отрицательная (б) краевые дислокации



2) Вторым основным типом дислокаций являются винтовые дислокации.

Т.к. после появления такой дислокации в кристалле он состоит из атомной плоскости, закрученной в винтовую лестницу, то эта дислокация называется винтовой (рис.6). [7]

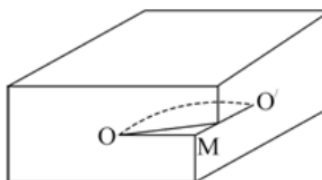
Рис. 6. Винтовая дислокация



Если винтовая дислокация образована по часовой стрелке, то ее называют – **правовинтовая**, против – **левовинтовая**.

3) Возможен случай, когда дислокация представляет собой кривую. Такие дислокации называются смешанными (рис. 7). В точке О дислокация винтовая, а в точке О' – краевая. Поскольку любая дислокация является границей зоны сдвига, то она не может обрываться внутри кристалла. Дислокация в состоянии лишь выходить своими концами на поверхность, разветвляться на несколько дислокаций, образуя узел или формировать замкнутое кольцо, полностью расположенное в кристалле. Учитывая, что дислокационная линия в общем случае может иметь произвольную кривизну, то вводится понятие о смешанной дислокации, имеющей различную долю краевой и винтовой компонент. Таким образом, любую произвольную линию дислокации можно разделить на краевую и винтовую составляющие. [7]

Рис. 7. Смешанная дислокация



### 3.3 ПОВЕРХНОСТНЫЕ ДЕФЕКТЫ.

**Двумерные**, или **поверхностные**, дефекты простираются в двух измерениях на расстояния, сравнимые с размером кристалла, а в третьем — составляют несколько параметров решетки. У поверхностных дефектов – мала толщина, а длина и ширина больше её на несколько порядков. [7]

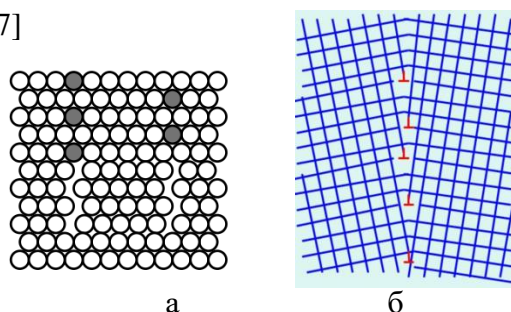
К двумерным дефектам относятся:

1. Дефекты упаковки.
2. Дислокационная стенка.
3. Сама поверхность кристалла.
4. Двойники и их границы.
5. Границы зерен (большееугловые) и субзерен или фрагментов (малоугловые), блоки.
6. Межфазные границы. [7]

### Дефекты упаковки и дислокационная стенка.

Одним из наиболее распространенных плоских дефектов являются дефекты упаковки. Они представляют собой нарушения последовательности застройки атомными плоскостями решетки некоторых участков в кристалле (рис. 8). Возникают данные дефекты обычно в плотноупакованных кристаллах и ограничены частичными дислокациями. Как и дислокации, дефекты упаковки играют важную роль в деформации кристаллов. [7]

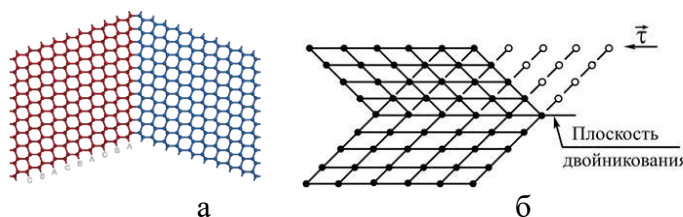
Рис. 8. Дефект упаковки (а) и дислокационная стенка (б)



### Двойники.

Двойником называется часть кристалла, в которой кристаллическое строение является зеркальным отражением остальной части кристалла (рис. 9(а)). Плоскость симметрии, связывающая две зеркально симметричные части кристалла, называется *плоскостью двойникования* (рис. 9(б)). [9]

Рис. 9. Двойник (а) и плоскость двойникования (б)



*Двойникованием* (образованием двойников) - симметричная переориентация областей кристаллической 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. [5]

### Границы зерен.

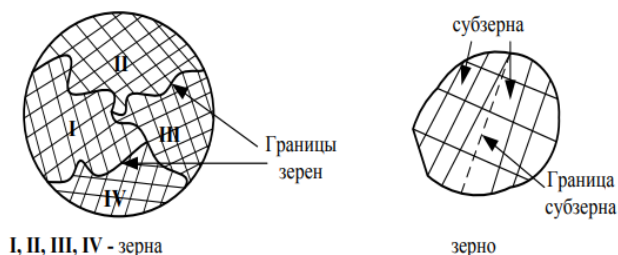
Поликристаллы состоят из большого числа мелких монокристаллов неправильной формы и жестко связанных между собой, которые называются *зернами* или кристаллитами. Зерна разделены некоторыми зонами перехода – границами зерен. Очень важно хорошо представлять, что граница зерна – это не «стена» из чего-то между соседними зернами и не пустота между ними. Надо также не забывать, что границы зерен – не линии, хотя именно так мы видим их на отполированной и протравленной поверхности металла. [10,7]

Граница зерна представляет собой поверхность между двумя монокристаллами различной ориентации, которые примыкают друг к другу, т. е. некий сплошной переход от одного монокристалла к другому или же область несовершенного контакта, где имеется нарушение непрерывности кристаллической структуры (рис. 10). [10]

Два соседних зерна в общем случае имеют несовпадающую кристаллографическую ориентировку. В зависимости от угла разориентировки  $\theta$  принято выделять: [3]

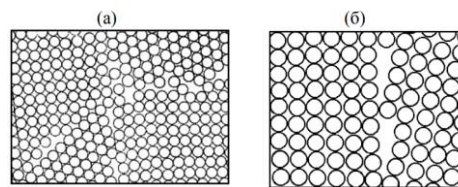
- Малоугловые границы;
- Большеугловые границы.

Рис. 10. Поверхностные дефекты: границы зерен, субзерен



К **малоугловым** относят межзеренные границы с углом разориентировки не более  $5^\circ$ . Если этот угол превышает  $10^\circ$ , то такие границы считаются **высокоугловыми** (при  $\theta = 5-10^\circ$  границы относят к **среднеугловым**) (рис.11). Чем больше дислокаций в стенке и меньше расстояние между ними, тем выше угол разориентировки  $\theta$ . Поэтому с увеличением плотности дислокаций в стенке малоугловая граница может постепенно трансформироваться в высокоугловую. По границам зерен наряду с плоскими дефектами могут существовать и объемные дефекты. [3]

Рис. 11. Границы зерен: модель высокоугловой границы (а), модель малоугловой границы (б)



При переходе через высокоугловые границы фактически происходит резкий скачок ориентировки атомных плоскостей и анизотропных свойств соприкасающихся решеток соседних кристаллов. Имеющиеся на данный момент представления о строении высокоугловых границ имеют в основном описательный характер. Ширина высокоугловых границ приближается к атомным размерам (порядка 1–3 атомных диаметров). Такая граница содержит относительно большие промежутки между атомами (повышенную рыхлость). Это является причиной быстрой диффузии по границам зерен, а также объясняет их высокую подвижность. [3]

В свою очередь каждое зерно не является идеальным кристаллом, а состоит из отдельных фрагментов (блоков или субзерен), размер которых примерно в тысячу раз меньше размера зерна.

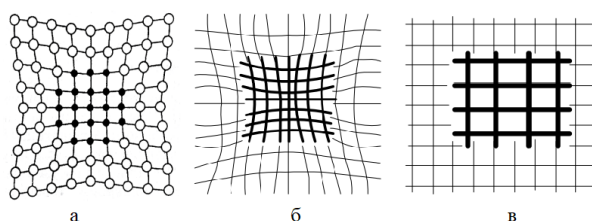
Множество блоков слегка повернутых друг относительно друга на доли градуса в одном зерне образуют структуру, которая называется мозаичной или **субструктурой**. В пределах каждого блока решетка почти идеальна, но разворот одного блока относительно другого обусловлен наличием дислокаций, а именно дислокационными стенками. Эти блоки образуются в кристалле в процессе кристаллизации или рекристаллизации и оказывают существенное влияние на многие свойства кристаллов, особенно механические. [9]

## Межфазные границы.

Эти границы разделяют фазы с различными структурами и составом. Возможны следующие случаи:

- 1) **Когерентные** межфазные границы – фазы имеют незначительно отличающиеся параметры решетки и хорошо сопряжены одна с другой при малых искажениях на границе (рис.12, а). [7]
- 2) Частично- или **полукогерентные** межфазные границы — сопряжение фаз только частичное; для полного сопряжения необходимо ввести дислокации (рис. 12,б)[7]
- 3) **Некогерентные** межфазные границы — фазы настолько различны по своему строению, что их сопряжение невозможно; отсутствует общее размещение атомов на поверхности раздела (например, большеугловые границы зерен); для сопряжения требуются переходная решетка и зернограничные дислокации (рис.12, в). [7]

Рис. 12. Межфазные границы:  
когерентные (а), полукогерентные (б),  
некогерентные (в)



## 4. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЧИСЛО ДЕФЕКТОВ.

Для того чтобы понять, какие факторы определяют число дефектов, надо изучить причины и механизмы образования структурных несовершенств, а так же рассмотреть такие понятия, как концентрация и плотность дефектов.

### 4.1. ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ.

#### Образование точечных дефектов.

Теперь рассмотрим *причины*, вызывающие образование дефектов нескольких разновидностей.

1) Тепловые дефекты. Обмен кристалла теплом с внешней средой приводит к образованию вакансий и межузельных атомов в результате тепловых колебаний (флуктуаций). При 0 К тепловых дефектов нет, максимальная концентрация тепловых дефектов наблюдается вблизи температуры плавления. При тепловом движении частиц в кристалле атом, преодолев энергетический барьер, может покинуть узел решётки и занять межузельное положение. Поскольку при этом соседние с межузельным атомы смещаются от центра межузлия к периферии, то перемещение атома из узла в межузлие связано с большими затратами энергии. Появление атома в межузлии сопровождается образованием вакансии. Попавший в межузлие атом сможет под влиянием тепловых колебаний (его самого и соседних с ним атомов) переместиться в соседнее положение.

Если на своем пути он встретит вакансию и попадает в нее, то два дефекта в кристалле при этом исчезнут. Таким образом, в реальном кристалле все время появляются и исчезают точечные дефекты. [3]

2) Дефекты нестехиометрии и дефекты, обусловленные присутствием примесных атомов. Обмен кристалла веществом с внешней средой приводит к изменению химического состава кристалла. Отклонение химического состава от стехиометрического приводит к образованию вакансий и межузельных атомов – дефектов нестехиометрии. Присутствие в кристалле примесных атомов также может вызывать образование вакансий и межузельных атомов. Содержание точечных дефектов в кристаллах может меняться при их легировании, то есть при введении малых количеств добавок. Обычно вещества, используемые в качестве примесей, образуют с основным веществом твёрдые растворы. Различают примесные дефекты, которыми являются собственно примесные атомы или ионы в решётке, и примесные дефекты, возникающие вследствие замещения основного атома решётки атомом примеси. [3]

3) Электронные дефекты. Электроны условно можно разделить на связанные, которые локализованы на атомах или образуют связи между ними, и свободные, которые могут перемещаться по кристаллу. При 0 К все электроны локализованы на атомах и химических связях между соседними атомами. При повышении температуры некоторые электроны изменяют своё связанное положение, становятся свободными, и кристалл становится проводящим. То есть повышение температуры от 0 К можно рассматривать как отклонение положения электрона от некоторого идеализированного. А в системе ковалентно связанных атомов после удаления электрона остаётся вакантное место – дырка, заряженная положительно. [3]

4) Антиструктурные дефекты. Для многих двух- и более компонентных кристаллов характерно изменение способа расположения частиц в решётке при изменении температуры. Такие процессы называются переходами типа порядок-беспорядок. Предельным случаем беспорядка является произвольное распределение различных атомов по позициям, которые при низких температурах (наличие порядка) предназначены определённому типу атомов. Возникновение порядка в расположении атомов разного сорта сопровождается появлением максимумов на рентгенограммах. Антиструктурные дефекты (беспорядок) могут возникать в самых разных классах твёрдых веществ – от металлов до химических соединений. [3]

5) Радиационные дефекты. При облучении материала частицами высокой энергии (например, быстрыми электронами с энергией  $\approx 100$  кэВ и выше) также возникают точечные дефекты. Однако пороговая энергия образования этих дефектов составляет от 6 до 30 эВ, что выше энергии образования тепловых дефектов. Например, энергия образования радиационного дефекта Френкеля в

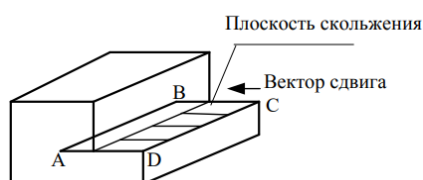
кремнии равна 20.4 эВ при комнатной температуре. Это, по-видимому, обусловлено сложными лавинными процессами генерации дефектов первично выбитыми атомами. [8]

Таким образом, первый и второй механизмы образования точечных дефектов приводят к возникновению равновесных дефектов, а третий, четвертый и пятый— неравновесных. [8]

### Образование дислокаций.

Большинство дислокаций образуются путем сдвигового механизма. Ее образование можно описать при помощи следующей операции. Надрезать кристалл по плоскости ABCD, сдвинуть нижнюю часть относительно верхней на один период решетки в направлении, перпендикулярном АВ, а затем вновь сблизить атомы на краях разреза внизу (рис.13), т.е. краевая дислокация простирается в плоскости скольжения по всему кристаллу в направлении перпендикулярном направлению скольжения. [7]

Рис. 13. Механизм образования краевой дислокации



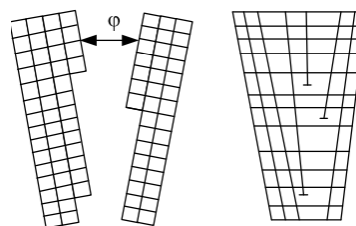
В реальных монокристаллах дислокации возникают в процессе кристаллизации, а также в процессе пластической деформации. Механизм возникновения дислокаций в процессе кристаллизации из жидкого расплава разнообразен. [7]

Дислокации образуются следующими способами:

1. при срастании в процессе кристаллизации отдельных кристаллитов;
2. за счет перерождения колоний вакансий в дислокации;
3. в процессе пластического деформирования благодаря источникам Франка-Рида. [7]

1) На рис. 14 показаны границы двух блоков, растущих навстречу друг другу. Блоки повернуты на небольшой угол. При срастании блоков ряд атомных плоскостей не проходит через весь кристалл и заканчивается на границах блоков. В этих местах и возникают дислокации. [7]

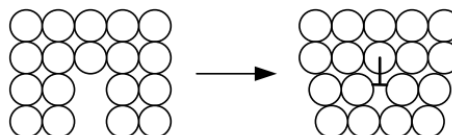
Рис. 14. Образование дислокаций при срастании в процессе кристаллизации отдельных кристаллитов



Такая же картина наблюдается и при срастании различно ориентированных зерен в поликристаллическом образце. В реальных твердых телах протяженность границ блоков и зерен и количество дислокаций их исключительно велики (в хорошо отожженных металлах плотность дислокаций  $10^7$ - $10^8$  на  $см^2$ ). [7]

2) Источником дислокаций в недеформированном кристалле могут служить также скопления вакансий. На рис. 15 приведен пример образования положительной дислокации из скопления вакансий. [7]

Рис. 15. Образование дислокаций за счет перерождения колоний вакансий в дислокации



Сдвигообразование в кристалле, развивающееся под действием внешней силы, представляет собой движение дислокаций по плоскостям скольжения и выход их на поверхность кристалла. Если бы сдвигообразование происходило только за счет выхода дислокаций, уже имеющихся в кристалле, то процесс пластического деформирования привел бы к уменьшению дислокаций и переводу кристалла в более совершенное состояние. Однако опыт показывает, что с ростом степени деформации искажение решетки не уменьшается, а, наоборот, растет. [7]

3) Современная теория твердого тела исходит из того, что дислокации генерируются (возникают) уже в процессе самой деформации.

Механизм возникновения дислокаций в процессе пластической деформации выяснен не полностью, и существует ряд гипотез, часть из которых имеет косвенное экспериментальное подтверждение. Наиболее обоснованной является гипотеза, объясняющая возникновение новых дислокаций наличием локальных препятствий движению исходной дислокации. [7]

Механизм образования дислокации, по Франку и Риду, заключается в том, что закрепленная в точках D и D' дислокация может под действием касательных напряжений испытывать перемещения, показанные на рис. 16. Дислокационная линия закреплена с двух сторон. Это так называемый источник Франка-Рида. Приложенные напряжения выгибают линию дислокаций в дугу. Радиус кривизны зависит от приложенного напряжения и уменьшается по мере роста этого напряжения. Минимальный радиус получится, когда линия дислокаций примет форму полуокружности. Дальнейшее движение дислокации может приводить к увеличению радиуса кривизны линии дислокации, что должно соответствовать уменьшению напряжения. При неизменном же значении линия дислокации должна закручиваться вокруг точек D и D'. Линия дислокации образует большую петлю, которая в результате встречного движения m и n в конечном итоге превращается в замкнутую петлю дислокации и новую дислокацию DD', аналогичную исходной. Далее под действием

напряжений процесс начинается снова, многократно повторяясь. Такие источники увеличивают количество дислокаций в десятки и сотни раз. [7]

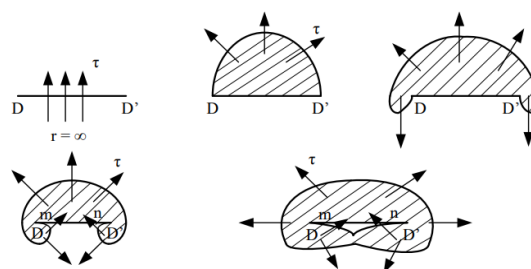


Рис. 16. Схема последовательных I — V стадий действия источника Франка — Рида

Скользящие дислокации всегда тормозятся, часто вплоть до полной остановки под действием различных факторов:

- пересечение с другими дислокациями;
- границы зерен и субзерен;
- границы между дисперсными частицами (разными фазами);
- торможение в твердых растворах.

Сделаем надрез по плоскости ABCD и сдвинем правую часть кристалла вниз на один период решетки (рис.17. а). [7]

Образовавшаяся при таком сдвиге ступенька на верхней грани не проходит через всю ширину кристалла, оканчиваясь в т.В. Величина смещения правой части относительно левой уменьшается по направлению от т.А к т.В. Верхняя атомная плоскость оказывается изогнутой. (рис.17. б) [7]

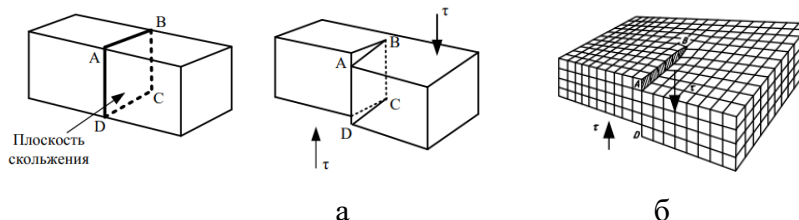


Рис. 17. Механизм образования винтовых дислокаций

## 4.2. КОНЦЕНТРАЦИЯ И ПЛОТНОСТЬ ДЕФЕКТОВ.

### Концентрация точечных дефектов.

Вакансии и внедренные атомы существуют в кристаллах любой структуры и при любой температуре. В условиях равновесия в кристалле стехиометрического состава точечные дефекты возникают в результате теплового движения. Концентрация точечных дефектов равна нулю при температуре 0 К. При повышении рабочих температур, количество вакансий возрастает и достигает порядка 1% от общего числа атомов при приближении к температуре плавления. Количество же межузельных атомов растет с температурой еще быстрее (по сравнению с их числом при комнатной температуре), хотя при любой температуре их число остается значительно меньшим, по сравнению с числом вакансий. [7]

Относительные концентрации вакансий и внедренных атомов зависят так же от условия электронейтральности кристалла. В ионных и полупроводниковых кристаллах точечные дефекты



обладают электрическими зарядами: внедренный катион положителен, внедренный анион отрицателен. Вакансия аниона действует как эффективный положительный заряд, вакансия катиона — как эффективный отрицательный заряд. Условие электронейтральности обеспечивается образованием равного количества положительно и отрицательно заряженных дефектов, образованием сложных дефектов или же образованием свободных электронов или их вакансий. [7]

О концентрации и состоянии точечных дефектов в кристалле можно судить по изменению плотности кристалла или параметров решетки, по проводимости (в случае электрически активных дефектов), по спектрам поглощения света и т. д. [8]

Пересыщение точечными дефектами достигается при резком охлаждении после высокотемпературного нагрева, при пластическом деформировании и при облучении нейтронами. Перемещаясь по кристаллу, одиночные вакансии могут встречаться и объединяться (дивакансии). Скопление многих вакансий может привести к образованию пор и пустот, перерастающих иногда в «отрицательные» кристаллы (отрицательный кристалл — это пора в кристалле, имеющая ту же форму, что и сам кристалл). С течением времени избыток вакансий сверх равновесной концентрации уничтожается на свободных поверхностях кристалла, порах, границах зерен и других дефектах решетки. Места, где исчезают вакансии, называются стоками вакансий. [7]

### Плотность дислокаций.

Дислокации- устойчивые линейные дефекты, для них не наблюдается явной зависимости концентрации дефектов от температуры. Дислокационная структура материала характеризуется плотностью дислокаций. [7]

**Плотность дислокаций** — это число линий дислокаций, пересекающих единичную площадку в кристалле. 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  $1 \text{ м}^3$ . [7]

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

Плотность дислокаций изменяется в широких пределах и зависит от состояния материала. После тщательного отжига плотность дислокаций составляет  $10^5 \dots 10^7 \text{ м}^{-2}$ , в кристаллах с сильно деформированной кристаллической решеткой плотность дислокаций достигает  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$ . [7]

## 5. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА СВОЙСТВА.

Все процессы, связанные с изменением свойств в материале, основываются на перемещении дислокаций и их взаимодействии с другими дефектами.

### 5.1. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ДЕФЕКТОВ.

#### Перемещение краевых дислокаций.

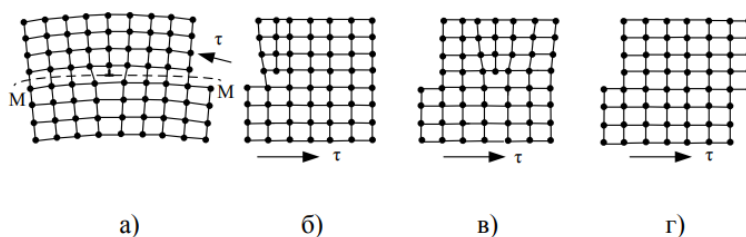
В отличие от точечных дефектов, дислокации не двигаются самопроизвольно, но очень подвижны. Существует два основных механизма движения дислокаций: «скольжением» и «переползанием». [7]

*Механизм движения дислокации «скольжением».*

**Скольжение** в кристаллической решетке протекает по плоскостям и направлениям с наиболее плотной упаковкой атомов, где сопротивление сдвигу наименьшее.

Это объясняется тем, что расстояние между соседними атомными плоскостями наибольшее, т. е. связь между ними наименьшая. Плоскости скольжения и направления скольжения, лежащие в этих плоскостях, образуют систему скольжения. В металлах могут действовать одна или одновременно несколько систем скольжения (рис. 18). [7]

Рис. 18. Движение краевой дислокации, приводящее к образованию ступеньки единичного сдвига, на поверхности кристалла: а — схема расположения дислокаций; б — г — этапы передвижения дислокации и выхода ее на



Скольжение осуществляется в результате перемещения в кристалле дислокаций (рис. 18). При действии вдоль плоскости скольжения касательных напряжений в направлении, указанном стрелкой, атомы вблизи ядра дислокации перемещаются справа налево на расстояния, значительно меньшие межатомных. Атомы смещаются не только в плоскости чертежа, но и во всех атомных слоях, параллельных этой плоскости. Дислокации могут переходить с одной плоскости скольжения на другую. Этот переход осуществляется добавлением или удалением слоя атомов путем диффузии. [7]

Перемещение дислокации в плоскости скольжения ММ через весь кристалл приводит к смещению (сдвигу) соответствующей части кристалла на одно межплоскостное расстояние (рис. 18, б-г), при этом справа на поверхности кристалла образуется ступенька. [7]

*Механизм движения дислокации «переползанием».*

Этот механизм применяется только для краевых дислокаций. При перемещении по нормали к плоскости скольжения краевая дислокация попадает в новые атомные плоскости, параллельные той,

в которой она ранее находилась. Механизм такого перемещения, называемого **переползанием**, принципиально отличается от механизма скольжения. [7]

Рассмотрим перемещение положительной краевой дислокации из своей плоскости скольжения в вышележащую соседнюю плоскость. Для этого необходимо, чтобы цепочка атомов на самой кромке экстраплоскости отделилась от экстраплоскости и ушла в глубь кристалла. Такое «растворение» кромки экстраплоскости (**положительное переползание**) является диффузионным процессом. Здесь возможны два варианта:

1) При подходе вакансий к краевой дислокации атомы с кромки экстраплоскости перемещаются в соседние вакантные места;

2) Атомы с кромки переходят в соседние междоузлия и диффундируют от дислокации. [7]

Первый вариант более вероятен, если учесть, что в металле часто появляется избыточная концентрация вакансий, а энергия образования междоузельных атомов относительно велика. [7]

Перемещение положительной дислокации вниз в соседнюю плоскость скольжения означает, что к краю экстраплоскости присоединился один атомный ряд. Такая достройка экстраплоскости (**отрицательное переползание**) может проходить двумя путями:

Присоединением междоузельных атомов, диффундирующих к дислокации;

Присоединением соседних атомов, находящихся в регулярных положениях, с одновременным образованием вакансий, которые затем мигрируют вглубь кристалла. [7]

Таким образом, перемещение краевой дислокации по нормали к своей плоскости скольжения осуществляется путем диффузионного перемещения атомов (к дислокации или от нее), и именно этим оно принципиально отличается от скользящего движения дислокации. *В отличие от скольжения — консервативного движения, не связанного с переносом массы, переползание — неконсервативное движение происходит путем переноса массы.* [7]

### Перемещение винтовых дислокаций.

Такая дислокация может скользить в любой кристаллографической плоскости, которая содержит линию дислокации и вектор сдвига. [3]

Винтовая дислокация может переходить из одной атомной плоскости в другую скольжением. Если на пути движения винтовой дислокации в плоскости  $P$  встречается какой-либо барьер, то она будет скользить в другой атомной плоскости  $R$ , находящейся под углом к первоначальной плоскости (рис. 19). [3]

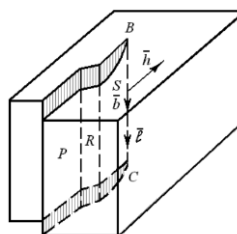
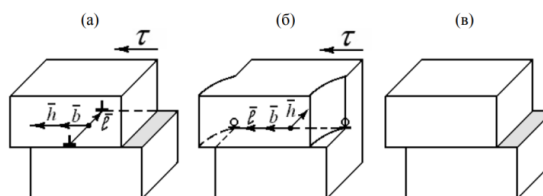


Рис. 19. Двойное поперечное скольжение винтовой дислокации BC

Такой процесс называется **поперечным скольжением**. Пройдя некоторый путь в плоскости поперечного скольжения и удалившись от барьера, винтовая дислокация может перейти в атомную плоскость  $S$ , параллельную исходной плоскости скольжения  $P$ . В этом случае принято говорить о двойном поперечном скольжении. Если такой процесс повторяется многократно, то его называют множественным поперечным скольжением. [3]

Для винтовой дислокации ее линия  $l$  по направлению совпадает с вектором Бюргерса  $b$ , но перпендикулярна направлению перемещения  $h$ . Следовательно, в отличие от краевой дислокации, для винтовой характерны следующие ориентационные соотношения между этими показателями:  $l \parallel b$ ,  $l \perp h$ . Стоит отметить, что разные по типу дислокации (краевая и винтовая), перемещаясь через весь кристалл под действием однонаправленного напряжения  $\tau$ , дадут одинаковый конечный результат – сдвиг на дискретное расстояние, равное величине вектора Бюргерса (рис. 20). [3]

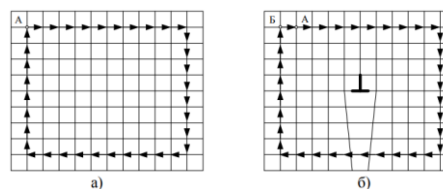
Рис. 20. Перемещение краевой (а),  
винтовой (б) дислокации и  
дискретный сдвиг на величину



### Вектор Бюргерса.

**Вектор Бюргерса (b)** — количественная характеристика, описывающая искажения кристаллической решётки вокруг дислокации (рис. 21). [7]

Рис. 21. Контуры вектора Бюргерса для идеальной  
решетки (а) и краевой дислокации (б)



Вектор Бюргерса получается, если в реальном кристалле обойти контур, который был бы замкнутым в идеальном кристалле (например, в примитивном кристалле кубической сингонии это контур "n связей вверх, m связей вправо, n связей вниз, m связей влево"), заключив дислокацию "внутри" контура. Как видно на рис. 21, в реальном кристалле контур окажется *незамкнутым*. Вектор  $b$ , который нужен для замыкания контура, называется *вектором Бюргерса*. [7]

Величина и направление вектора не зависят от размеров контура Бюргерса и выбора точки начала контура, а полностью определяются видом дислокации. У краевой дислокации вектор Бюргерса равен межатомному расстоянию и перпендикулярен дислокационной линии, у винтовой дислокации — параллелен ей. [7]

Полные дислокации легко перемещаются под действием напряжений в отличие от частичных дислокаций, у которых вектор Бюргерса меньше межатомного расстояния.

Скачок вектора Бюргерса в некоторой точке означает, что дислокация ветвится. Если точек ветвления нет, то вектор Бюргерса остаётся неизменным вдоль всей длины дислокации, поэтому дислокация не может начинаться или обрываться внутри кристалла.

Внутри кристалла дислокации связаны в единую объемную сетку; в каждом узле сетки соединены три дислокации и сумма их векторов Бюргерса равна нулю.

В кристаллах содержатся дислокации разных знаков, различающиеся ориентацией векторов Бюргерса. Дислокации одного знака, расположенные в одной плоскости, отталкиваются друг от друга, а противоположных знаков— притягиваются. [7]

У вектора Бюргерса есть ряд особенностей:

- Вектор Бюргерса инвариантен, то есть неизменен. Следовательно, дислокация не может оборваться в кристалле.
- Энергия упругих искажений решетки пропорциональна квадрату модуля вектора Бюргерса.
- При движении решеточной дислокации с вектором Бюргерса, равным периоду трансляции решетки, кристаллическая решетка не изменяется. [7]

## 5.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕФЕКТОВ ДРУГ С ДРУГОМ.

### Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами.

В реальных кристаллах присутствуют и дислокации, и точечные дефекты.

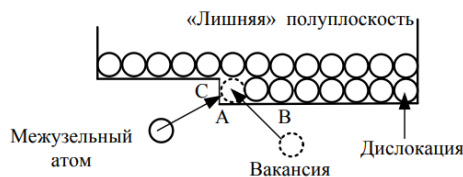
1) *Междоузельный атом и дислокация.* Между ними и дислокациями возникает упругое взаимодействие. Если в кристалле имеются примесные атомы, то между ними и краевыми дислокациями тоже существует взаимодействие. Примесь является центром расширения или сжатия. Это приводит к тому, что инородные атомы притягиваются дислокацией и располагаются вокруг нее. Говорят, что вокруг дислокаций образуется атмосфера примесных атомов, называемая облаками Коттрелла. [7]

2) В большинстве реальных кристаллов вследствие их анизотропии искажения, вносимые дефектами, являются несимметричными. Это ведет к их взаимодействию со скалывающими напряжениями вокруг винтовой дислокации. [7]

3) *Аннигиляция точечных дефектов.* Краевая дислокация, переходящая из одной плоскости скольжения в другую, расположенную выше на одно межатомное расстояние, называется *ступенькой*. Если расстояние между плоскостями скольжения равно одному периоду решетки, то дислокационную ступеньку называют единичной, в случае более удаленных друг от друга плоскостей скольжения ее называют сверхступенькой. [7]

Если к точке А единичной дислокационной ступеньки (рис. 22) подходит вакансия, то ступенька смещается в положение В, а сама вакансия исчезает. Если же к точке А подходит межузельный атом, то процесс аналогичен и ступенька смещается в С с поглощением межузельного атома. [7]

Рис. 22. Аннигиляция точечных дефектов на ступеньке краевой



### **Взаимодействие дислокаций друг с другом.**

При движении дислокаций в кристалле происходит взаимодействие их друг с другом. Оно сложно и многообразно. Взаимодействие меняется в зависимости от того, как расположены относительно друг друга плоскости скольжения дислокаций.

1) Взаимодействие двух дислокаций, расположенных в *одной плоскости скольжения* (в данном случае винтовые дислокации взаимодействуют аналогично краевым дислокациям) [7]:

Если дислокации имеют один знак, то при их сближении будут взаимодействовать участки решётки с искажениями одного знака, что должно привести к усилению нарушения строения решётки. В этом случае одноимённые дислокации отталкиваются. [7]

Когда дислокации имеют противоположные знаки, их сближение под действием касательного напряжения приводит к уменьшению искажений решётки, т.к. сжатые и растянутые участки совмещаются. Следовательно, обе дислокации притягиваются, что приводит к их исчезновению.

2) Взаимодействие дислокаций, расположенных в *соседних параллельных плоскостях скольжения*:

Если краевые дислокации имеют разный знак, то при встрече происходит аннигиляция. Когда дислокации обращены друг к другу растянутыми участками решётки, в месте их слияния образуется ряд вакансий, расположенных вдоль линии дислокации. Если дислокации обращены друг к другу экстраплоскостью, то в зоне их слияния образуется ряд дислоцированных или межузельных атомов. [7]

Взаимодействие винтовых дислокаций имеет более простой характер, так как искажения решётки вокруг них одинаковы по обе стороны плоскости скольжения. Дислокации одного знака в этом случае отталкиваются, а противоположного – притягиваются. [7]

3) Взаимодействие дислокаций, расположенных в *пересекающихся плоскостях скольжения*:

При пересечении дислокаций на плоскостях них возникают пороги – ступеньки. Его величина на одной дислокации соответствует вектору Бюргерса другой дислокации. Порог имеет краевую ориентацию. Он подвижен и не тормозит продвижение дислокации. Торможение обусловлено тем,

что направление легкого скольжения таких порогов не совпадает с направлением скольжения дислокаций, образовавших пороги при своём пересечении. [7]

В случае взаимодействия двух краевых дислокаций с параллельными векторами Бюргерса, на обеих дислокациях образуются неподвижные пороги винтовой ориентации, тормозящие движение этих дислокаций. При пересечении краевых дислокаций с произвольно ориентированными друг относительно друга векторами Бюргерса, на дислокациях образуются пороги смешанной ориентации. [7]

Винтовая дислокация может пересекать неподвижную краевую. Когда вектор Бюргерса винтовой дислокации совпадает с плоскостью скольжения краевой, при пересечении дислокаций образуется ступенька с винтовой ориентацией. В случае взаимно перпендикулярных векторов Бюргерса винтовой и краевой дислокации образуется ступенька с краевой ориентацией. Если наоборот, неподвижная винтовая, и к ней движется краевая дислокация, то с приближением винтовой поверхности краевая дислокация постепенно искривляется и после пересечения на краевой дислокации образуется подвижный порог с краевой ориентацией, а на винтовой – неподвижный порог, имеющий краевую ориентацию. При пересечении двух винтовых дислокаций на них образуются пороги с краевой ориентацией. [7]

#### **Взаимодействие дислокаций с границами зерен и субзерен.**

Скользящая дислокация, дойдя до межзеренной границы, останавливается. Следующая дислокация, скользящая в той же плоскости по направлению к границе зерен, будет испытывать отталкивание со стороны поля упругих напряжений ранее остановившейся дислокации и после некоторого сближения с ней также полностью затормозится, и т. д. Около межзеренной границы как около барьера возникает нагромождение дислокаций. Пластическая деформация передается от зерна к зерну не переходом скользящих дислокаций через границу, а эстафетным путем. [7]

Двойниковая граница, как и межзеренная, из-за различия в ориентировке плоскостей скольжения по обе стороны от нее является барьером для дислокаций. [7]

Отдельные дислокации из дислокационной стенки (границы субзерна) могут выбиваться скользящей дислокацией. Чем больше угол разориентировки соседних субзерен, тем ближе одна к другой и сильнее связаны дислокации в стенке и эффективнее барьерное действие субзеренной границы. [7]

Граница между разными фазами может стать эффективным барьером для скользящих дислокаций. При переходе через межфазовую границу изменяется не только ориентировка, но и тип решетки. Но полная остановка дислокаций у межфазовой границ происходит только тогда, когда граница непрерывна и имеет достаточно большую протяженность. [7]

Таким образом, дефекты влияют на свойства материала за счет передвижения по кристаллической решетке и взаимодействия друг с другом. Управляя данными процессами, можно менять свойства металлов и металлических сплавов, поскольку они регулируют плотность дефектов.

## **6. ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧИСЛА ДЕФЕКТОВ.**

Для проведения многих гетерогенных процессов бывает нужно иметь твердое тело с очень развитой внутренней поверхностью. Регулировка количества дефектов кристаллической решетки позволяет модифицировать свойства веществ в желаемом направлении, что, в свою очередь, дает возможность получать новые типы материалов с заранее заданными признаками.

В кристаллах дефекты вызывают упругие искажения структуры, обуславливающие, в свою очередь, появление внутренних механических напряжений. Например, точечные дефекты, взаимодействуя с дислокациями, упрочняют или разупрочняют кристаллы. Поверхностные дефекты влияют на механические и физические свойства металлов. Чем больше поверхность границ в единице объема, тем прочнее металл. Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Объёмные дефекты снижают пластичность, влияют на прочность, на электрические, оптические и магнитные свойства кристалла так же, как и дислокации.[3]

При взаимодействии движущихся дислокаций с препятствиями происходит рост числа дислокаций (их размножение). Увеличение плотности дислокаций и возрастание концентрации примесей приводит к сильному торможению дислокаций и прекращению их движения.

Дислокации оказывают влияние на механические свойства кристаллов, а так же на физические, химические, технологические и эксплуатационные. К основным механическим свойствам относятся прочность, твердость, ударная вязкость, пластичность, упругость, хрупкость и др [7]

Влиять на дислокации можно с помощью деформации.

**Деформация** — изменение формы и размеров твердого тела под влиянием приложенных внешних сил. Деформация может быть упругой (исчезающей после снятия нагрузки) и пластической (остающейся после снятия нагрузки). [9,11]

**Деформируемость** — способность заготовок воспринимать пластическую деформацию в процессе технологических операций: гибки,ковки, штамповки, волочения, проката и прессования без нарушения ее целостности. Деформируемость зависит от химического состава, механических свойств, скорости деформации, а также температуры и величины деформации при каждой операции. Исследования и практика показывают, что с увеличением степени деформации металла при определенном температурно-скоростном режиме значительно повышаются пределы упругости,



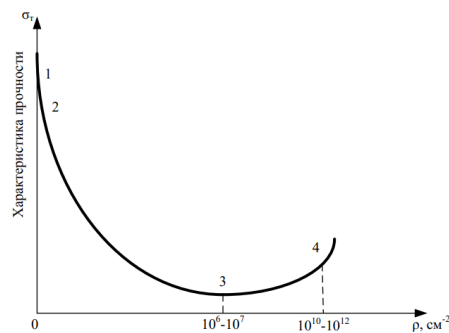
текучести и прочности и твердость металла. Одновременно с этим уменьшаются показатели пластичности: относительное удлинение, ударная вязкость. [12,13]

У сильно деформированных металлов значения предела текучести и предела прочности практически равны, а величина пластичности близка к нулю. Это состояние металла характеризуется как предельное деформированное, предшествующее разрушению. Плотность дислокаций составляет  $\rho=10^{12} \text{ см}^{-2}$ , большую их плотность создать невозможно, так как неизбежно возникают зародыши трещин. Наличие трещин резко снижает прочность как материалов на металлической основе, так и неметаллических материалов. Это связано с тем, что острые края трещин являются концентраторами напряжений, они ведут к разрушению, как и скопления дислокаций, вызывающие появление внутренних напряжений.

Упрочняемость металла зависит от количества дислокаций, участвующих в процессе пластической деформации, и характера их движения. Дислокации играют важнейшую роль в теории прочности, пластичности и разрушения металлов. Влияние их на прочность неоднозначно: с появлением дислокаций прочность идеального кристалла резко снижается, но при очень большой их плотности снова начинает расти (рис. 23). [7]

Рис. 23. Влияние плотности дислокаций на прочность: 1 – идеальный кристалл; 2 – «усы», кристаллы с минимальной плотностью дефектов; 3 – отожженные металлы; 4 – сильно деформированные металлы с высокой плотностью

Если плотность меньше значения  $a$ , то сопротивление деформированию резко возрастает, а прочность приближается к теоретической. Повышение прочности достигается созданием металла с бездефектной структурой, а также повышением плотности дислокаций, затрудняющим их движение. [7]



На начальной стадии процесса деформации наблюдается скольжение единичных дислокаций, торможение которых (упрочнение) осуществляется только границами субзерен и поэтому невелико. Далее начинается турбулентное скольжение большого числа дислокаций. Упрочнение происходит за счет малоподвижных порогов и барьеров. Скорость упрочнения максимальная. Далее скольжение идет преимущественно за счет поперечного скольжения винтовых дислокаций. Упрочнение при пластической деформации обусловлено образованием малоподвижных порогов и барьеров при пересечении дислокаций, увеличением плотности дислокаций, измельчением зерна.[14]

Таким образом, повышение прочности металлов и сплавов может быть достигнуто двумя путями: получением металлов с близким к идеальному строением кристаллической решетки или увеличением числа структурных несовершенств, препятствующих движению дислокаций. Пластичность и вязкость, наоборот, тем выше, чем легче осуществляется движение дислокации.[9]

На практике препятствие движению дислокаций, т.е. упрочнение, создается введением легирующих элементов, термической или термомеханической обработкой. Снижение температуры также препятствует свободному перемещению дислокаций. При низких температурах прочность растет, а пластичность падает. Металл становится более прочным, но хрупким.

### **Влияние высоких температур на механические свойства.**

Стали должны обладать достаточно высоким комплексом механических свойств при комнатной и рабочей температурах. При повышении температуры характеристики механических свойств стали изменяются. При комнатной температуре на кривой растяжения углеродистых сталей наблюдается отчетливо выраженная площадка текучести, с повышением температуры испытания она становится меньше и около 300 °С исчезает.

В интервале температур так называемой *синеломкости* (200...300 °С) повышается прочность и снижается пластичность стали, поэтому следует избегать пластического деформирования малоуглеродистых сталей при этих температурах. Этот интервал назван так потому, что после выдержки стали при температуре около 300 °С светлая механически обработанная поверхность стали приобретает синий цвет, что обусловлено образованием тонкой окисной пленки. Снижение пластичности и повышение прочности в интервале синеломкости связано с диффузионной подвижностью атомов примесей.

Пластическая деформация происходит путем перемещения дислокаций. Вокруг ядра дислокации, где имеются искажения кристаллической решетки, облегчается растворение атомов примесей. Поэтому вокруг нее образуется «облако» примесей. В процессе пластической деформации «облако» двигается за дислокацией и тормозит ее перемещение. В результате пластичность снижается, а прочность возрастает. При температурах, меньших интервала синеломкости, диффузионная подвижность «облака» мала и дислокация легко обгоняет его. При температурах выше интервала синеломкости диффузионная подвижность «облака» настолько возрастает, что оно практически перестает тормозить перемещение дислокаций, и пластичность вновь возрастает. [12]

В ряде случаев при изменении температуры или давления может оказаться, что для одного и того же металла более устойчивой будет другая решетка, чем та, которая существует при данной температуре или давлении. Существование одного и того же металла (вещества) в нескольких кристаллических формах носит название **полиморфизма**. [14]

Такая особенность металлов существенно влияет на структурообразование и механические свойства в процессе термической обработки или горячей деформации. Поэтому при выборе режимов термической обработки или горячей деформации температуру нагрева назначают выше критической температуры полиморфного превращения. [14]

## 7. СПОСОБЫ ВЛИЯНИЯ НА ПЛОТНОСТЬ ДЕФЕКТОВ.

Для того чтобы повлиять на плотность дефектов, нужно поменять структуру материала, с помощью которой мы управляем свойствами металлов и сплавов. Управлять структурой можно разными способами: пластической деформацией, термической (ТО) и термомеханической (ТМО) обработкой, легированием, поверхностным пластическим деформированием, поверхностной закалкой, химико-термической обработкой и нанесением защитных покрытий. Рассмотрим некоторые из них.

Почти все стальные детали в процессе изготовления подвергаются **пластической деформации** (обработка давлением): прокатке, штамповке, ковке, прессованию, в результате чего изменяются его форма и свойства. Обработка металлов давлением делится на *холодную* (ХПД) и *горячую* (ГПД). Примером холодной обработки давлением является **наклеп** (*нагартовка*). В процессе ХПД происходят сдвиги внутри кристаллов металла по плоскостям наиболее плотной упаковки атомов и поворот отдельных зерен относительно друг друга, степень искаженности решетки растет и число дефектов увеличивается, а, значит, растет уровень внутренней энергии. Скорость передвижения дислокаций тоже падает, следовательно, снижается пластичность материала и повышается прочность. [12]

Упрочненный металл обладает повышенным запасом внутренней энергии, т. е. находится в неравновесном состоянии. Для приведения металла в равновесное состояние его необходимо нагреть. При нагреве наклепанного металла в нем протекают следующие процессы [15]:

1) Частичное восстановление структурного совершенства в результате уменьшения точечных дефектов за счет увеличения подвижности атомов (избыточные вакансии и межузельные атомы взаимодействуют между собой, а также поглощаются дислокациями при перераспределении последних при нагреве) и снижение внутренних напряжений (**процесс возврата**);

2) Уменьшение плотности дислокаций за счет аннигиляции противоположных по знаку дислокаций и образование субзерен (полигонов), свободных от линейных несовершенств за счет выстраивания дислокационных стенок (**процесс полигонизации**);

3) зарождение и рост новых равноосных зерен вместо ориентированной волокнистой структуры деформированного металла (**процесс рекристаллизации**). [15]

Примером горячей обработки давлением является **штамповка**. В ходе её процесса получают детали с помощью специального инструмента — штампа, представляющего собой металлическую разъемную форму, внутри которой расположена полость, соответствующая конфигурации детали. Благодаря штамповке можно получить повышение пластичности, но падение прочности. [11]

**Термическая обработка** – это совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, выполняемых в определенной последовательности при определенных режимах, с целью изменения внутреннего строения сплава и получения нужных свойств. Её проводят, когда необходимо либо

повысить прочность, твердость, износостойчивость или упругость детали или инструмента, либо, наоборот, сделать металл или сплав более мягким, легче поддающимся механической обработке. ТО подразделяется на 3 группы: термическая обработка металлов и сплавов (ТО); термо – механическая обработка металлов (ТМО) и сплавов химико – термическая обработка сплавов (ХТО). [14]

Различают следующие виды термической обработки: отжиг, нормализация закалка, отпуск и старение.

1) **Отжигом** стали называется нагрев до определенной температуры, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении. Цели отжига — снижение твердости и улучшение обрабатываемости стали, изменение формы и величины зерна, выравнивание химического состава, снятие внутренних напряжений. Делится на отжиг I (нефазовый) и II рода (фазовый). [11]

2) **Нормализация** состоит из нагрева стали выше, выдержки при этой температуре и последующего охлаждения на воздухе. Более быстрое охлаждение по сравнению с обычным отжигом приводит к более мелкозернистой структуре. Нормализация вызывает полную фазовую перекристаллизацию стали и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при пластической деформации. [11,9]

3) **Закалка** проводится для сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве и охлаждении, с целью повышения твердости и прочности путем образования неравновесных структур (сорбит, тростит, мартенсит). [14]

4) **Отпуск** проводится с целью снятия внутренних напряжений, снижения твердости и увеличения пластичности и вязкости закаленных сталей. [14]

5) **Старение**— термическая обработка, при которой главным процессом является распад пересыщенного твердого раствора. В результате старения происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска, после старения увеличиваются прочность и твердость, и уменьшается пластичность. [14]

При **термо-механической обработке** совмещаются пластическая деформация и термическая обработка. Преимуществом термомеханической обработки является то, что при существенном увеличении прочности характеристики пластичности снижаются незначительно. В зависимости от температуры, при которой проводят деформацию, различают *высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО)* и *низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО)*. [14]

**Легирование** - введение в сплав дополнительных элементов с целью улучшения его механических, эксплуатационных и функциональных свойств. Легирование упрочняет основу сплава, повышает 268 температуру рекристаллизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены дефекты кристаллической решетки и их виды, влияние на структуру и свойства металлов и металлических сплавов.

На основании рассмотренных данных, можно сделать следующие выводы:

1. Любой кристалл в реальных условиях не является идеальным, а содержит определенное число дефектов.
2. Наличие различных дефектов в реальной структуре любого кристалла зависит от его идеальной структуры (собственных свойств вещества), условий получения.
3. Свойства материалов в значительной степени, а часто решающим образом, зависят от концентрации различного типа дефектов.
4. Нарастание концентрации дефектов в кристаллах обуславливает их переход к неупорядоченным средам. [3]

Так же было выяснено, что с помощью контроля числа дефектов можно управлять свойствами материала. Благодаря этому можно создавать материалы, которые обладают, например, более высокими показателями прочности, большей легкостью, пластичностью. Для авиационной и ракетно-космической отрасли это особенно важно, так как она развивается и совершенствуется год за годом.

Таким образом, совершенствование уже изученных материалов и открытие новых, тесно связано с изучением дефектов кристаллического строения и способами управления ими.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Учебник для вузов «Материаловедение»; авторы Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева; 1990г.
2. <https://www.polnaja-jenciklopedija.ru/nauka-i-tehnika/defekty-kristallicheskoj-reshetki.html> (дата и время обращения: 15.11.20; 15:10)
3. Электронное учебно-методическое пособие «Дефекты в твердых телах и их влияние на свойства функциональных материалов»; Асабина Е.А.; 2012г.
4. [https://studopedia.ru/2\\_128498\\_tochechnie-defekti.html](https://studopedia.ru/2_128498_tochechnie-defekti.html) (дата и время обращения: 16.11.20; 18:18)
5. [https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOLGAY/study/General\\_Materials\\_Science-1/lectures/Lecture\\_3\\_Defects\\_in\\_the\\_crystal\\_lattice-.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOLGAY/study/General_Materials_Science-1/lectures/Lecture_3_Defects_in_the_crystal_lattice-.pdf) (дата и время обращения: 16.11.20; 18:33)
6. Учебное пособие «Материаловедение»; авторы Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев, А.Б.Кутьин; 2007г.
7. Учебное пособие по курсу «Материаловедение» «КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ И ИХ ДЕФЕКТЫ»; Н.С. Герасимова; 2015 г.
8. Книга «Основы материаловедения и технологии полупроводников»; И. А. Случинская; 2002г.
9. Учебное пособие «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»; Троицкий Б.С., Майтаков А.Л.; 2014г.
10. Учебное пособие «Дефекты в конденсированных средах и проблемы старения трубных сталей»; Ю.В. Пахаруков; 2015г.
11. Курс лекций по материаловедению САФУ, 2009г.
12. Книга «Металловедение»; Овчинников В.В.; 2015г.
13. <http://fccland.ru/proizvodstvo-trub/7445-izmenenie-svoystv-metallov-pri-deformacii.html> (дата и время обращения: 20.11.20; 22:47)
14. Электрон. образовательный контент по дисциплине Материаловедение; Никитина Ю.В. 2013г.
15. Учебник «Материаловедение»; В. С. Кушнер, А. С. Верещака, А. Г. Схиртладзе, Д. А. Негров, О. Ю. Бургонова.;2008г.