

*Кафедра Общетехнических дисциплин,  
теории и методики профессионального  
образования»*

**Курс «Технология  
конструкционных  
материалов»**

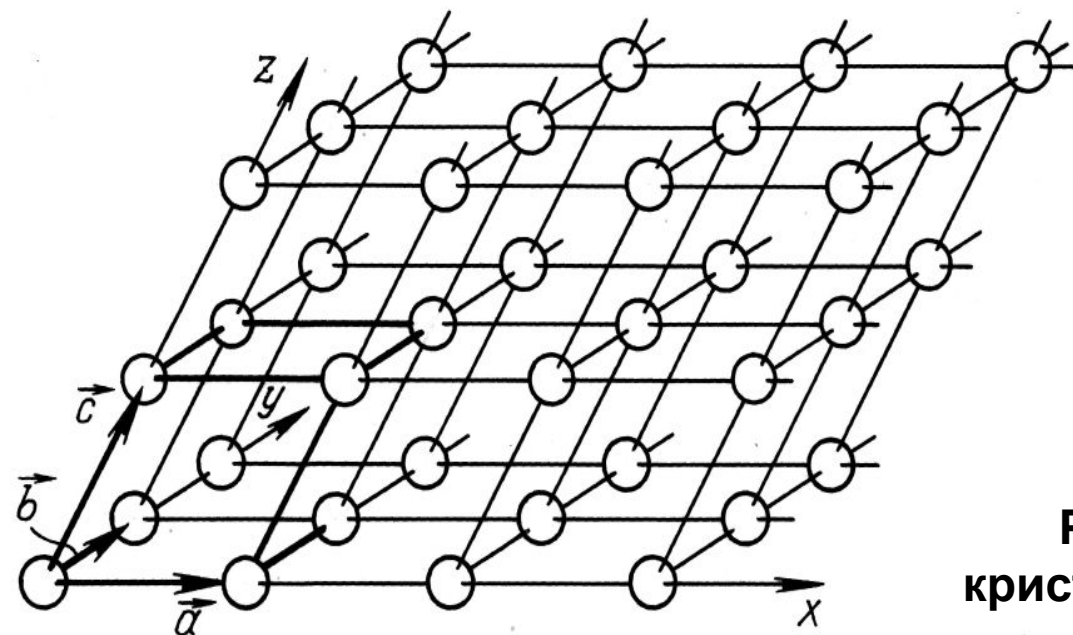
# ЛЕКЦИЯ 2. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

## Учебные вопросы:

- 1. Кристаллические решетки металлов
- 2. Дефекты кристаллической решетки (реальное строение кристаллов)
- 3. Влияние дефектов решетки на механические свойства кристаллов. Пути повышения прочности металлов
- 4. Строение металлических сплавов

## 2.1. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ МЕТАЛЛОВ

Металлы обычного способа производства имеют кристаллическое строение. В **кристаллах** атомы расположены строго упорядоченным образом так, что, если через их центры провести воображаемые линии вдоль трех координатных осей, они образуют **пространственную (кристаллическую) решетку** (рис. 1.2.1).



*Основное свойство кристаллических решеток – их **пространственная периодичность.***

Рис. 1.2.1. Пространственная кристаллическая решетка

# Продолжение 1 вопроса

## Кристаллическое строение вещества

Природные кристаллы : кварца-горного хрусталя (а) и топаза (б).



(а)



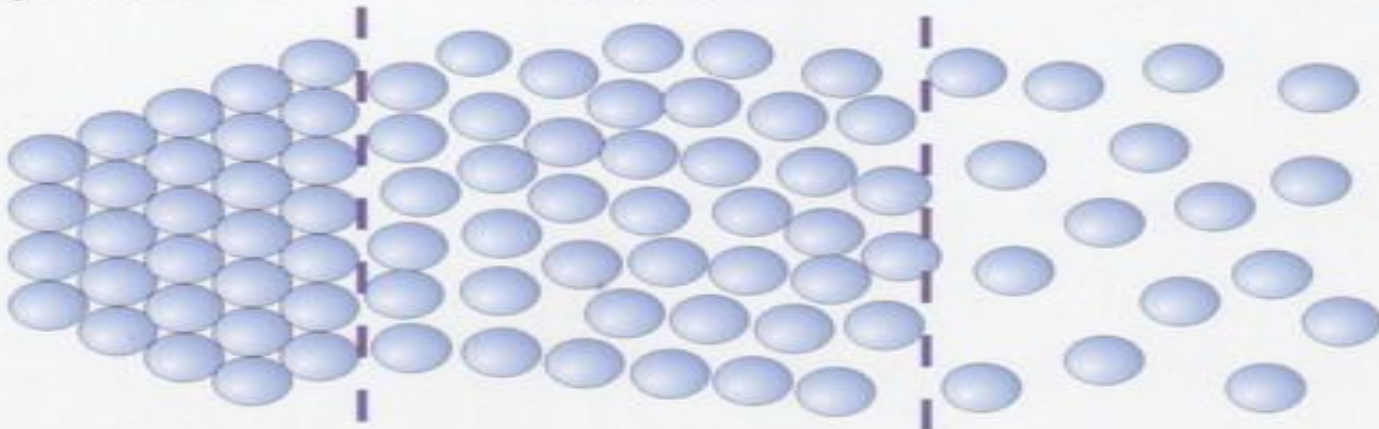
(б)

Схематическая модель расположения частиц в веществе

Кристалл

жидкость

газ



## Продолжение 1 вопроса

**Тип кристаллической решетки** определяется формой элементарной ячейки и характером расположения в них атомов. Количественно кристаллические решетки описываются тремя **основными характеристиками**:

**1. Период (или параметр) решетки** – расстояние между соседними узлами решетки вдоль трех координатных осей. В общем случае решетка характеризуется тремя параметрами – скалярными величинами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (рис. 1.2.1.).

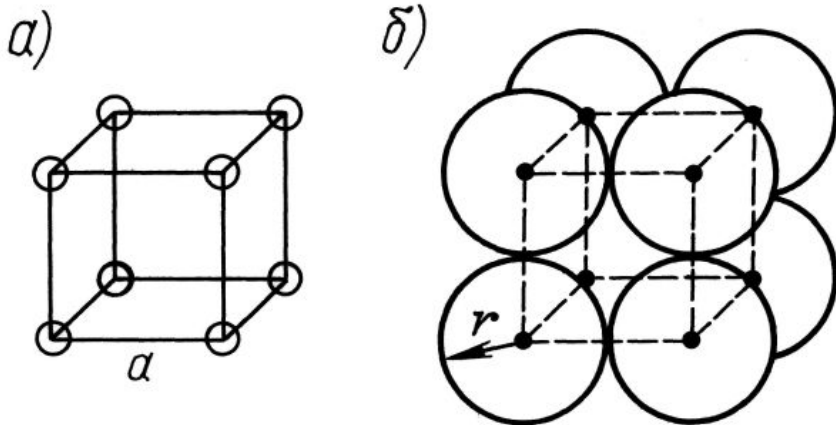


Рис. 1.2.2. Элементарная ячейка простой кубической решетки (а) и схема упаковки в ней атомов (б)

## Продолжение 1 вопроса

**2. Координационное число ( $Z$ )** – число ближайших соседей, окружающих данный атом и находящихся от него на одинаковых расстояниях.

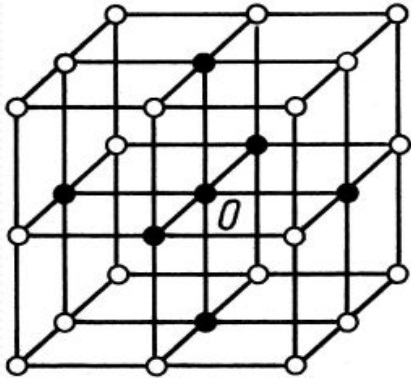


Рис. 1.2.3. Определение координационного числа и относительной плотности упаковки в простой кубической решетке

**3. Относительная плотность упаковки решетки атомами ( $q$ )** – отношение объема, занимаемого атомами в ячейке, к объему самой ячейки, т.е.

$$q = \frac{\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot n}{a^3} \cdot 100 \quad \%, \quad (1.2.1)$$

где  $r$  – радиус атома,  $a$  – параметр решетки (см. рис. 1.2.2),  $n$  – число целых атомов, приходящихся на одну ячейку.

## Продолжение 2 вопроса

Металлическим элементам свойственны плотноупакованные решетки с высокой степенью компактности, т.е. с большими значениями  $K$  и  $q$ .

Многие металлы имеют

**объемноцентрированную (ОЦК) и**  
**гранецентрированную (ГЦК)** решетки, их характеристики приведены на рис. 1.2.4.

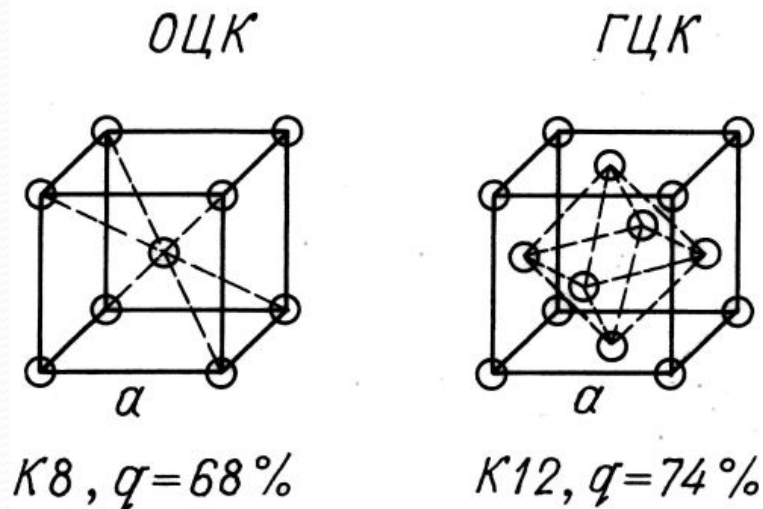


Рис. 1.2.4. Объемноцентрированная (ОЦК) и гранецентрированная (ГЦК) решетки

## 2.2. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ (РЕАЛЬНОЕ СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ)

По геометрии вызываемых ими нарушений решетки дефекты подразделяют на **точечные, линейные и поверхностные**.

**1. Точечные дефекты** Это **вакансии** – пустые узлы решетки, «свои» **атомы в междоузлиях** и **атомы примесей** в узлах решетки и междоузлиях. Основная причина образования первых двух видов дефектов – движение атомов, интенсивность которого возрастает с повышением температуры.

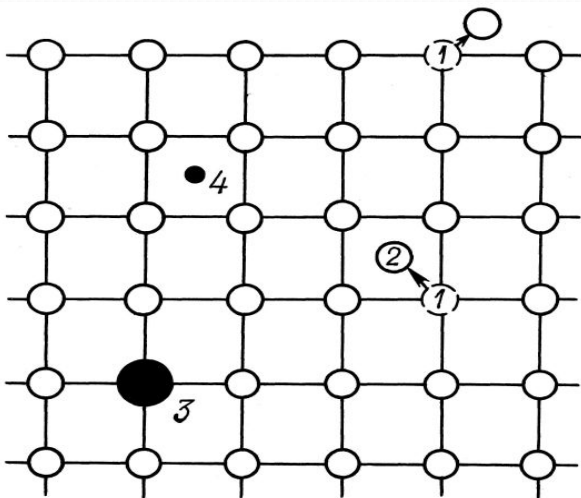


Рис. 1.2.5. Типы точечных дефектов кристаллической решетки:

- 1 – вакансия,
- 2 – атом в междоузлии,
- 3 и 4 – атомы примесей в узле и междоузлии соответственно



## Продолжение 2 вопроса

Вокруг любого точечного дефекта возникает местное искажение решетки радиусом  $R$  в  $1...2$  периода решетки (см. рис. 1.2.6), поэтому, если таких дефектов много, они влияют на характер распределения межатомных сил связи и, соответственно, на свойства кристаллов.

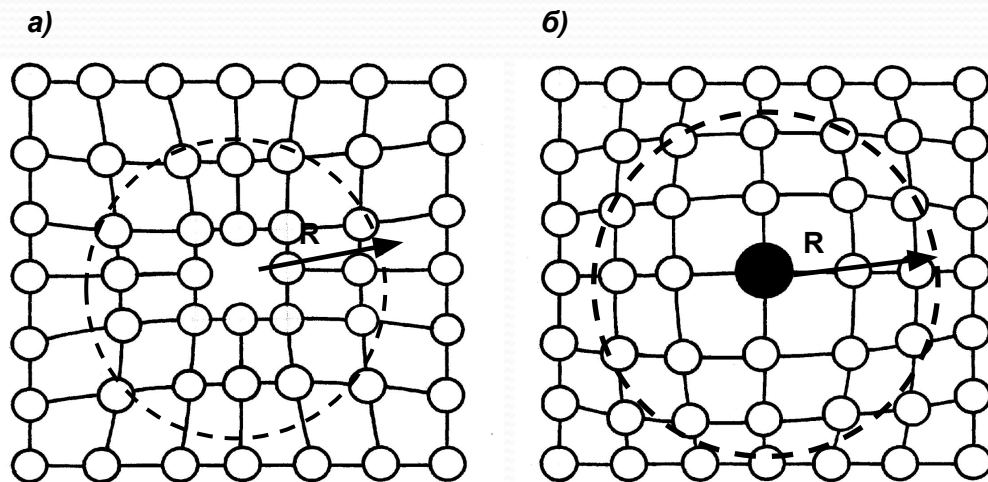


Рис. 1.2.6. Локальное искажение кристаллической решетки вокруг вакансии (а) и примесного атома в узле решетки (б)

# Продолжение 2 вопроса

## 2. Линейные дефекты

Линейные дефекты называются **дислокациями**. Их появление вызвано наличием в отдельных частях кристалла «лишних» атомных полуплоскостей (**экстраплоскости**). Они возникают в процессе кристаллизации металлов (из-за нарушения порядка заполнения атомных слоев) или в результате их пластического деформирования, как показано на рис. 1.2.7.

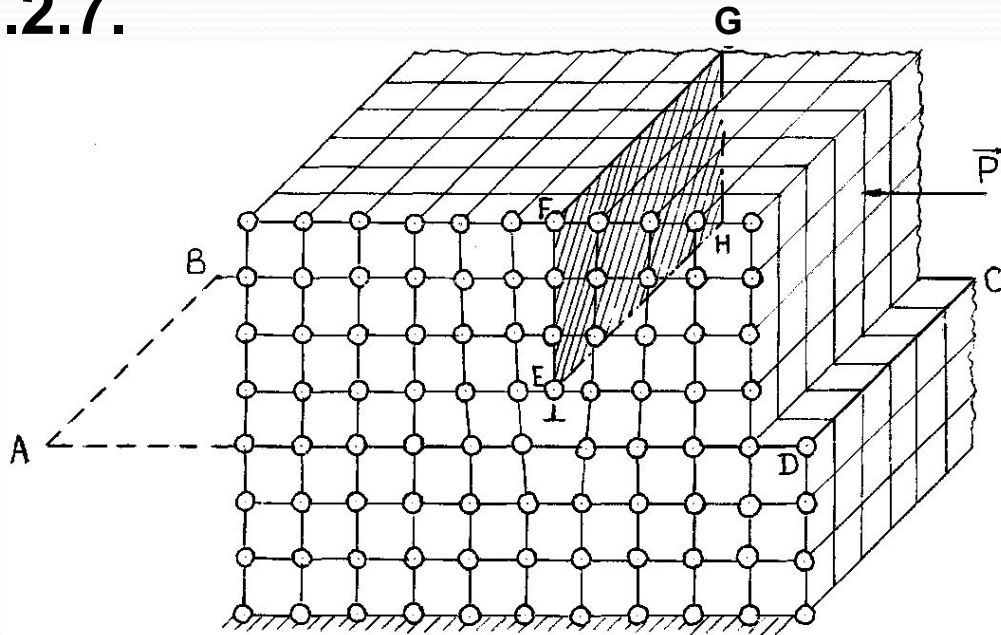


Рис. 1.2.7. Образование краевой дислокации ( $\perp$ ) в результате частичного сдвига верхней части кристалла под действием усилия : ABCD - плоскость скольжения; EFGH – экстраплоскость; EH – линия краевой дислокации

## Продолжение 2 вопроса

### Особенности механизма перемещения дислокаций.

1. Дислокации могут весьма легко (при малой нагрузке) передвигаться вдоль плоскости скольжения посредством «эстафетного» перемещения экстраплоскости.

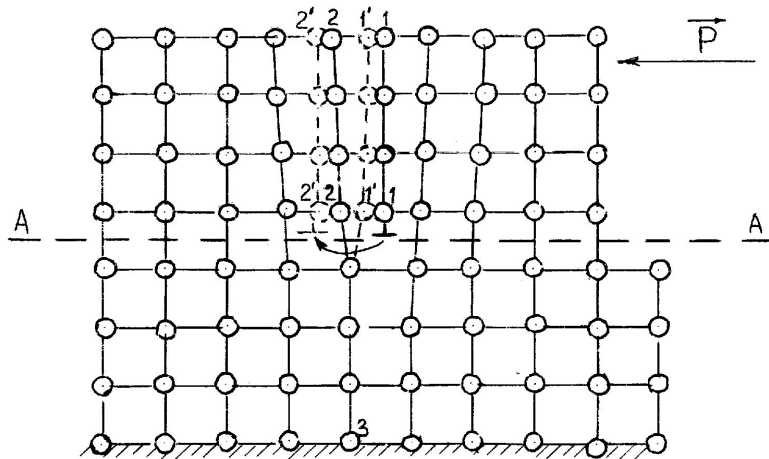


Рис. 1.2.8. Начальный этап эстафетного перемещения краевой дислокации ( $\perp$ ): А-А – плоскость скольжения, 1-1 экстраплоскость (исходная позиция)

2. Очевидно, однако, что такая легкость скольжения дислокаций будет наблюдаться лишь в том случае, когда на их пути отсутствуют какие – либо препятствия. Такими препятствиями являются любые дефекты решетки (особенно линейные и поверхностные!), а также частицы других фаз, если они присутствуют в материале.

## Продолжение 2 вопроса

### 3. Поверхностные дефекты

Все промышленные металлы (сплавы) являются **поликристаллическими** материалами, т.е. состоят из огромного количества мелких (обычно  $10^{-2} \dots 10^{-3}$  см), хаотически ориентированных кристалликов, называемых зернами. Очевидно, что периодичность решетки, присущая каждому зерну (*монокристаллу*), в таком материале нарушена, поскольку кристаллографические плоскости зерен повернуты относительно друг друга на угол  $\alpha$  (см. рис. 1.2.9), величина которого колеблется от долей до нескольких десятков градусов.

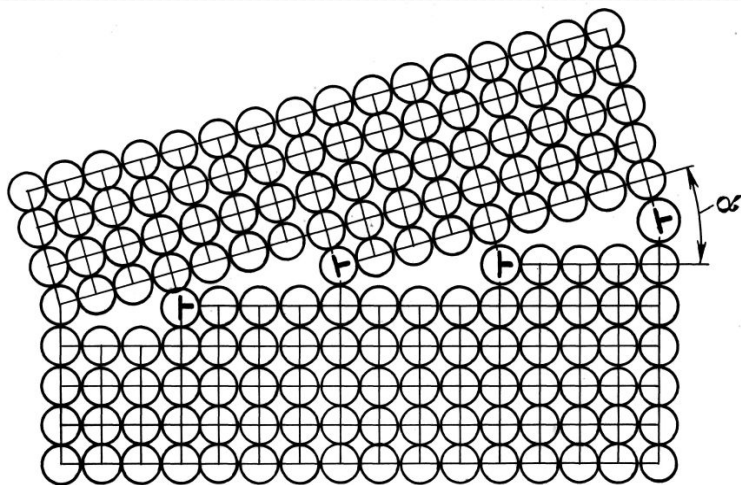


Рис. 1.2.9. Схема строения границ зерен в поликристаллическом материале

## 2.3. ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ РЕШЕТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

*Наиболее эффективным способом повышения прочности будет удаление дислокаций из металла. Однако такой путь не технологичен, т.к. бездислокационные металлы удастся получать лишь в виде тонких нитей (так называемых «усов») диаметром в несколько микрон и длиной до  $\approx 10$  мкм. Поэтому **практические способы упрочнения** основаны на **торможении, блокировании подвижных дислокаций** путем резкого увеличения числа дефектов решетки (в первую очередь линейных и поверхностных!), а также **создании многофазных материалов.***

## **Продолжение 3 вопроса**

Таковыми традиционными **методами повышения прочности** металлов являются:

- пластическое деформирование (явление наклепа или нагартовки),
- термическая (и химико-термическая) обработка,
- легирование (введение специальных примесей) и, наиболее общий подход, – это создание сплавов.

В заключение следует отметить, что повышение прочности, основанное на блокировании подвижных дислокаций, приводит к снижению пластичности и ударной вязкости и, соответственно, эксплуатационной надежности материала.

*Поэтому вопрос о степени упрочнения необходимо решать индивидуально, исходя из назначения и условий работы изделия.*

## 2.4. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

**Сплавы** – это материалы, полученные сплавлением или спеканием (порошковая металлургия) двух или более компонентов.

**Компоненты** – вещества, образующие сплав; ими могут быть химические элементы или устойчивые химические соединения.

Структура и свойства сплава определяются в первую очередь природой (типом) фаз, образующихся при сплавлении компонентов.

**Фаза** – однородная по химическому составу, типу решетки и свойствам часть сплава, отделенная от других частей границей раздела.

В зависимости от характера физико–химического взаимодействия компонентов в металлических сплавах возможны три основных типа твердых (кристаллических) фаз:

- 1) химические элементы,
- 2) химические соединения,
- 3) твердые растворы.

## Продолжение 4 вопроса

**Твердые растворы** – это фазы, в которых атомы одного компонента  $B$  размещены (растворены) в кристаллической решетке другого компонента  $A$  – «растворителя».

Сплав, представляющий собой *твёрдый раствор*, является *однофазным веществом с решеткой, присущей основному компоненту (растворителю)*. Атомы второго компонента (растворенного) размещены в решетке растворителя, как правило, случайным, неупорядоченным образом.

По способу размещения атомов растворенного вещества ( $B$ ) в решетке  $A$  различают два основных типа твердых растворов – *растворы замещения и внедрения* (рис. 1.3.1)



## Продолжение 4 вопроса

**Химические соединения** обычно имеют фиксированный состав, отвечающий формуле  $A_n B_m$ , где  $n$  и  $m$  – простые числа, причем тип решетки соединения  $A_n B_m$  отличается от решетки исходных компонентов.

Независимо от природы химические соединения в металлических сплавах, как правило, обладают высокой твердостью и хрупкостью (т.е. малопластичны); твердые растворы, напротив, имеют хорошую пластичность (и вязкость), но невысокую прочность и твердость.

Поэтому *оптимальному сочетанию свойств* конструкционных металлических сплавов (высоким значения прочности и ударной вязкости) соответствует структура, в которой дисперсные ( $\approx 10$  нм) частицы твердых химических соединений равномерно и достаточно плотно (на расстояниях  $\approx 20...40$  нм) распределены в пластичной матричной фазе – твердом растворе.

Исходя из этого можно сказать, что **свойства сплавов зависят в первую очередь от природы и относительных количеств присутствующих фаз, но также и от формы, размеров, взаимного расположения кристаллов этих фаз, т. е. от конкретной структуры сплава.**

# Продолжение 4 вопроса

## Химические соединения

Они имеют следующие особенности:

- **состав**, который может быть выражен простой формулой  $A_nB_m$ , где  $A$  и  $B$  - соответствующие элементы, а  $n$  и  $m$  - целые числа;
- **кристаллическую решетку**, отличную от кристаллических решеток элементов, образующих соединение;
- **свойства**, резко отличающиеся от свойств образующих соединение элементов;
- **постоянную температуру кристаллизации**, как и у чистых металлов.

Химические соединения делятся на две группы:

1. **Соединения с нормальной валентностью** (валентные соединения). В них атомы разного сорта связаны ионными или ковалентными связями. К этой группе относят соединения металлов с металлоидами, например, сульфиды, оксиды ( $Al_2O_3$ ,  $MnS$ ).
2. **Металлические соединения**. В этих соединениях преобладает металлический тип межатомной связи:
  - **электронные соединения** (фазы Юм-Розери). Химический состав этих фаз определяется электронной концентрацией, под которой понимают число валентных электронов, приходящееся на один атом ( $CuZn$ ,  $Cu_3Zn_8$ ,  $CuZn_3$ ).
  - **фазы внедрения**. Их образуют переходные металлы с неметаллами, имеющими малый атомный радиус (C, N). К этой группе относятся многие карбиды и нитриды ( $VC$ ,  $TiC$ ,  $NbC$ ,  $TiN$ ).
  - **фазы Лавеса**. Они имеют формулу  $AB_2$  и образуются при отношении атомных диаметров металлов  $A$  и  $B$  приблизительно 1,2 ( $Fe_2W$ ,  $Fe_2Mo$ ).

## Продолжение 4 вопроса

Итак, **свойства сплавов** (данного химического состава) **определяются их структурой**. Чтобы прогнозировать свойства какого-либо сплава, нужно знать его структуру. *Структуру сплавов различного химического состава можно установить путем анализа соответствующих диаграмм фазового равновесия или диаграмм состояния.*

Под состоянием понимают наличие тех или иных фаз в сплаве *данного химического состава при данной температуре*. То есть **диаграммы состояния** строятся в координатах «температура–химический состав сплавов системы А–В».

Линии диаграмм состояния – это *линии фазовых превращений* («критические линии»), при пересечении которых фазовый состав (структура) сплавов обязательно изменяется.

Умение анализировать диаграммы состояния является важной частью освоения курса материаловедения.

## Промежуточные тесты к теме 1.2.

- I. Каков наиболее вероятный порядок величины периода (параметра) кристаллической решетки?
  - 1.  $10^{-1}$  см.
  - 2.  $10^{-6}$  см.
  - 3.  $10^{-8}$  см.
  - 4.  $10^{-10}$  см.
  - 5.  $10^1$  см.
- II. Сколько целых атомов приходится на элементарную ячейку простой кубической решетки?
  - 1. 8.
  - 2. 1/8.
  - 3. 1.
  - 4. 6.
  - 5. 4.

# Промежуточные тесты к теме

- III. Какой вид дефектов кристаллической решетки обеспечивает высокую пластичность металлов?
  - 1. Вакансии.
  - 2. Дислокации.
  - 3. Атомы примесей.
  - 4. Дислоцированные (междоузельные) атомы.
  - 5. Границы зерен.
- IV. Какое из перечисленных утверждений **неверно**?  
Холодная пластическая деформация:
  - 1) повышает прочность металла;
  - 2) повышает электросопротивление;
  - 3) снижает пластичность;
  - 4) повышает ударную вязкость;
  - 5) повышает твердость.

## Промежуточные тесты к теме

- V. Какое из перечисленных утверждений **неверно**?

**Практические** пути повышения прочности металлов основаны на:

- 1) увеличении количества точечных дефектов;
- 2) измельчении зерна;
- 3) торможении дислокаций;
- 4) введении примесных атомов;
- 5) полном удалении дислокаций.

# Промежуточные тесты к вопросу

- I. Какая из перечисленных характеристик **не входит** в определение понятия «фаза»?
  - 1. Тип решетки.
  - 2. Свойства.
  - 3. Размер зерна.
  - 4. Граница раздела.
  - 5. Химический состав.
- II. Какое из перечисленных утверждений **неверно**? В результате сплавления компонентов *A* и *B* сплав может быть:
  - 1) многофазным;
  - 2) однофазным;
  - 3) многокомпонентным;
  - 4) твердым раствором;
  - 5) химическим соединением.
- III. Какой термин в следующем перечне является лишним?
  - 1. Химический элемент.
  - 2. Фаза.
  - 3. Химическое соединение.
  - 4. Компонент.
  - 5. Твердый раствор.

# Промежуточные тесты к теме

- IV. Какое из перечисленных утверждений **неверно**?
- По сравнению с твердыми растворами химические соединения в металлических сплавах:
  - 1) более твердые;
  - 2) имеют постоянный химический состав;
  - 3) менее пластичны;
  - 4) имеют определенную температуру плавления;
  - 5) имеют бóльшую ударную вязкость.
- V. Какой из перечисленных факторов является **определяющим** в формировании механических свойств сплавов?
  - 1. Форма кристаллов.
  - 2. Размеры кристаллов.
  - 3. Микроструктура.
  - 4. Относительное количество кристаллов различных фаз.
  - 5. Их взаимное расположение.
-





**Конец лекции!**