

№ 2902

Материаловедение

Фазовые диаграммы двухкомпонентных систем

Учебное пособие

№ 2902

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра металловедения цветных металлов

Материаловедение

Фазовые диаграммы двухкомпонентных систем

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2016

УДК 669.01
М34

Рецензент
канд. техн. наук, доц. *Т.А. Базлова*

Авторы: А.В. Поздняков, А.В. Михайловская, О.А. Яковцева,
С.В. Медведева, А.Г. Мочуговский

Материаловедение : фазовые диаграммы двухкомпонентных
М34 систем : учеб. пособие / А.В. Поздняков [и др.]. – М. : Изд. Дом
МИСиС, 2016. – 98 с.
ISBN 978-5-87623-966-2

В практикуме описаны основные представления о кристаллическом строении материалов, проведен подробный анализ фазовых диаграмм состояния двойных систем.

Предназначено для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 22.03.02 «Металлургия».

УДК 669.01

ISBN 978-5-87623-966-2

© Коллектив авторов, 2016
© НИТУ «МИСиС», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Кристаллическое строение металлов.....	4
2. Фазовая диаграмма с непрерывными рядами жидких и твердых растворов	13
3. Фазовые диаграммы эвтектического и перитектического типов	21
4. Фазовые диаграммы с промежуточными фазами	31
5. Фазовые диаграммы систем с расслоением в жидком состоянии и монотектическим превращением	33
6. Фазовые диаграммы с полиморфизмом компонентов. Эвтектоидное превращение	36
7. Фазовые диаграммы перитектоидного, метатектического, монотектоидного типов. Полиморфизм промежуточных фаз	42
8. Неравновесная кристаллизация.....	45
9. Фазовая диаграмма железо–углерод.....	52
Библиографический список	70
Приложение. Домашнее задание «Анализ двухкомпонентных фазовых диаграмм состояния»	71

1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Металлы и сплавы на их основе в твердом состоянии в классическом варианте являются *кристаллическими* телами.

Правильную систему точек, которую образуют атомы в металлах называют *кристаллической решеткой*. Кристаллическую решетку можно представить как совокупность пересекающихся в пространстве (точками пересечения являются атомы) трех серий параллельных

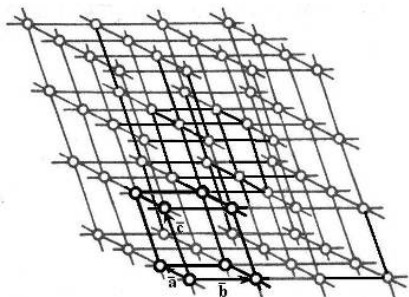


Рис. 1.1. Модель кристаллической решетки с выделенной элементарной ячейкой

прямых, проведенных параллельно трем осям координат (рис. 1.1). Расстояния между соседними узлами (a , b , c) такой решетки вдоль каждой из трех координатных осей повторяются, поэтому кристаллическую решетку можно построить путем последовательного перемещения (*трансляции*) какого-либо атома вдоль координатных осей. Но удобнее построение кристаллической решетки путем трехмерной трансляции некоторого минимального объема кристаллической решетки – параллелепипеда, образованного узлами решетки (см. рис. 1.1) и называемого *элементарной ячейкой*. Длины ребер элементарной ячейки a , b , и c называют *периодами* или *параметрами решетки*. Для количественной характеристики кристаллической решетки используют следующие параметры: *координационное число*, *число атомов приходящихся на одну элементарную ячейку*, *коэффициент компактности (заполнения)*.

Координационное число (КЧ) – это число ближайших соседей, окружающих данный атом. В трехмерном пространстве вокруг сферы заданного радиуса можно разместить максимум 12 одинаковых сфер, поэтому максимально возможное КЧ в плотноупакованных кристаллах равно 12.

Число атомов, приходящихся на ячейку n_a – это отношение объема, занятого в ячейке атомами V_a , к объему единичного атома v_a :

$$n_a = V_a/v_a.$$

Например, в примитивной кубической ячейке, образованной семью атомами, расположенными по ее вершинам, каждый атом

принадлежит одновременно восьми соседним ячейкам и, следовательно, находится внутри одной ячейки лишь $1/8$ частью своего объема. Таким образом, атомы занимают в примитивной ячейке $1/8 \cdot 8 = 1$ атомный объем, т.е. на ячейку приходится один атом. Если атом расположен на ребре ячейки, он входит в нее $1/4$ частью, на грани – $1/2$ частью и внутри ячейки – целиком.

Плотность упаковки характеризуют *коэффициентом заполнения*, или *коэффициентом компактности* η , под которым понимают выраженное в процентах отношение объема V_a , занятого в ячейке атомами, к объему всей ячейки $V_{я}$:

$$\eta = (V_a/V_{я}) \cdot 100 \%$$

Остальное в решетке составляют *пустоты* или *поры*. Представить кристаллическую решетку можно, если рассмотреть чередование слоев шаров – атомов (рис. 1.2), между которыми возникают пустоты, так как шары не могут заполнить весь объем.

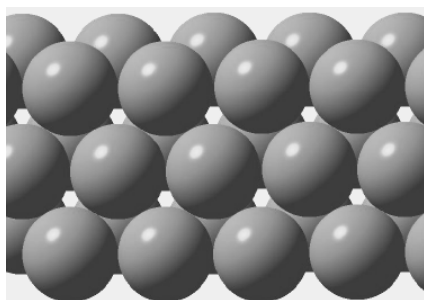


Рис. 1.2. Модель шаровой упаковки

Таблица 1.1

Параметры кристаллической решетки некоторых чистых металлов

Металл	Тип кристаллической решетки	Параметры решетки, нм	
		<i>a</i>	<i>b</i>
Алюминий	ГЦК	0,405	–
Хром	ОЦК	0,298	–
Медь	ГЦК	0,362	–
Золото	ГЦК	0,408	–
Железо	ОЦК (α -Fe)	0,287	–
	ГЦК (γ -Fe)	–	–
Магний	ГП	0,321	0,521
Никель	ГЦК	0,352	–
Паладий	ГЦК	0,389	–
Платина	ГЦК	0,392	–

Титан	ГП (α -Ti)	0,295	0,468
	ОЦК (β -Ti)	–	–
Цинк	ГП	0,267	0,495

Для металлов возможны три типа кристаллических структур: 1) объемноцентрированная кубическая (ОЦК) (рис. 1.3, б, табл. 1.1), 2) гранецентрированная кубическая (ГЦК) (рис. 1.3, а) и 3) гексагональная плотноупакованная (ГП) (рис. 1.3, в).

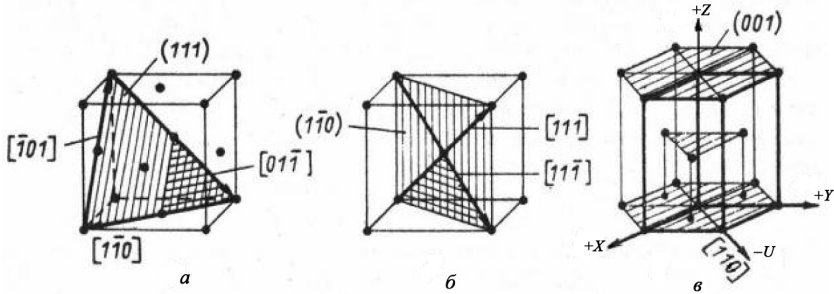


Рис. 1.3. Элементарные ячейки основных кристаллических решеток металлов: ГЦК (а), ОЦК (б) и ГП (в) (плоскости плотнейших упаковок выделены штриховкой, а плотнейшие направления отмечены стрелками)

Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК). На ячейку приходится четыре атома: один из восьми вершинных и три из шести по центрам граней. Координационное число равно 12. Коэффициент компактности $\eta = 74\%$.

Гексагональная плотноупакованная решетка (ГП). На рисунке элементарная ячейка – одна из трех одинаковых призм с ромбом в основании выделена жирными линиями. На ячейку приходятся два атома: один из восьми вершинных и один в объеме ячейки. Координационное число равно 12, что свидетельствует о наличии плотнейшей упаковки. Коэффициент компактности решетки $\eta = 74\%$.

Объемноцентрированная кубическая решетка (ОЦК). На ячейку приходится 2 атома: один из восьми вершинных и один в центре объема. Координационное число равно 8. Коэффициент компактности решетки $\eta = 68\%$. Таким образом, решетка ОЦК более рыхлая, чем ГЦК и ГП.

В реальных кристаллах всегда имеется множество отступлений от закономерного расположения атомов. Эти несовершенства называют *дефектами кристаллического строения* и они оказывают определяющее влияние на поведение металлов и сплавов при их обработке и эксплуатации.

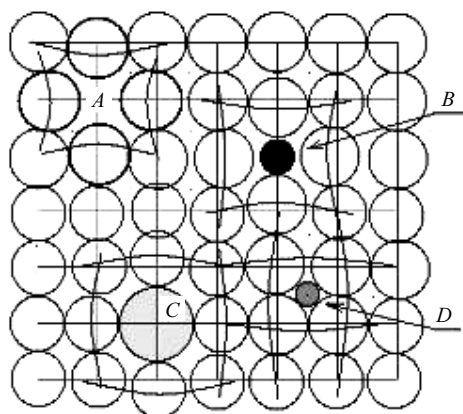


Рис. 1.4. Плоская модель кристалла с точечными дефектами:
A – вакансия; *B* и *C* – примесные атомы замещения
и *D* – примесный атом внедрения

Дефекты кристаллов подразделяют по геометрическим признакам на точечные, линейные и поверхностные (плоскостные).

Точечные дефекты. Размеры точечных дефектов во всех направлениях соизмеримы с размером атома. К точечным дефектам относят вакансии, собственные атомы, находящиеся в междоузлиях – межузельные атомы и примесные атомы замещения и внедрения (рис. 1.4).

Возникновение вакансии связано с тепловым колебательным движением атомов. Энергия в результате колебательного обмена ею неравномерно распределена между разными атомами. Атомы на поверхности кристалла или на границе зерна обладают повышенной энергией по сравнению с атомами в объеме кристалла. В какой-то момент атом поверхностного слоя 1 на рис. 1.5 может получить от соседей такой избыток энергии, что он отрывается от кристалла (испаряется) или переходит на поверхность в адсорбционный слой.

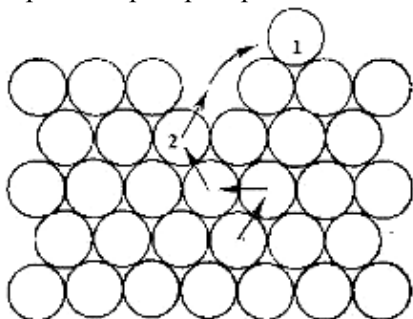


Рис. 1.5. Схема образования вакансии

Атом из более глубокого слоя 2, получая избыток энергии от своих соседей, переходит на место атома 1, ушедшего из поверхностного слоя, и т.д. Вокруг пустого узла решетки искаже-

на: ближайшие соседи смещены в сторону такого узла (это показано на рис. 1.4). *Вакансия* – это пустой, незанятый узел кристаллической решетки (*A* на рис. 1.4).

Каждая вакансия повышает энергию кристалла на E_0 (для меди порядка $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). С ростом температуры T равновесная концентрация вакансий увеличивается по экспоненте:

$$C_v \approx e^{-E_0/kT},$$

где $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$ ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$) – константа Больцмана.

Энергия образования вакансий E_0 тем больше, чем больше сила межатомной связи в кристаллах. Так как сила связи определяет температуру плавления, то чем выше температура плавления металла, тем больше энергия образования в нем вакансий (1...2 эВ).

Межузельный атом – это собственный атом металла, который располагается в одной из межатомных пустот. Он должен вызывать очень сильные смещения соседей в плотноупакованных решетках типичных металлов, и необходима очень большая энергия, чтобы собственный атом расположился в пустоте, которая в разы меньше его размера. Образование межузельных атомов возможно, к примеру, при нейтронном или протонном облучениях, возникающих при работе материалов в ядерных реакторах. Потoki тяжелых частиц легко выбивают атомы из своих положений в решетке, и концентрация межузельных атомов в таких условиях повышена, что в значительной мере определяет свойства материалов реактора.

Примесные атомы замещения (*C* и *B* на рис. 1.4) могут находиться в любых узлах кристаллической решетки. В зависимости от соотношения размеров атомов замещения и размеров атомов основы, они могут создавать вокруг себя как напряжения сжатия (*C* на рис. 1.4), так и напряжения растяжения (*B* на рис. 1.4). Их миграция (диффузия), как и атомов основного металла, осуществляется по вакансионному механизму: когда вакансия подходит к примесному атому, он перемещается на место вакансии.

Примесные атомы внедрения (*D* на рис. 1.4), имеющие обычно небольшой атомный диаметр, размещаются в пустотах решетки, при этом они все же больше размера пустоты и всегда создают вокруг себя напряжения сжатия. Они мигрируют быстрее, чем атомы основного металла и примесные атомы замещения. Около каждого внедренного атома примеси всегда имеется несколько соседних пустот куда он может переместиться, а атому основного металла или примеси замещения приходится ждать, когда рядом с ним окажется вакансия.