

М.В. Захаров

**Диаграммы состояния
двойных и тройных
металлических систем**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
М11

М11 **М.В. Захаров**
Диаграммы состояния двойных и тройных металлических систем / М.В. Захаров – М.: Книга по Требованию, 2023. – 234 с.

ISBN 978-5-458-60488-8

ISBN 978-5-458-60488-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы появился целый ряд советских и переводных учебников и учебных пособий по металлографии. В ряде книг с достаточной полнотой разобраны диаграммы состояния бинарных сплавов и зависимость между составом и структурой и между составом и свойствами. Однако ни в одном из имеющихся пособий нет достаточно полного и в то же время легко доступного для начинающих разбора диаграмм состояния тройных систем. Вышедшая в 1935 г. книга Мазинга „Тройные системы“ уже давно распродана и к тому же, как показала практика преподавания, все же трудна для начинающих. Желание дать в помощь студентам более доступное и простое изложение правил построения вертикальных и горизонтальных разрезов тройных систем побудило трех молодых авторов-инженеров М. В. Захарова, В. Д. Туркина и М. В. Румянцева написать данную книгу. Для того же чтобы не получилось разрыва между теорией двойных и тройных систем, в книгу включено и краткое изложение основных понятий металлографии и описание типовых двойных систем. Надо думать, что эта книга, в которой авторы изложили применяемую в МИЦМЗ методику преподавания тройных систем, окажется полезным пособием для студентов, изучающих металловедение и особенно для специализирующихся по металловедению.

Проф-докт. А. А. Бочвар

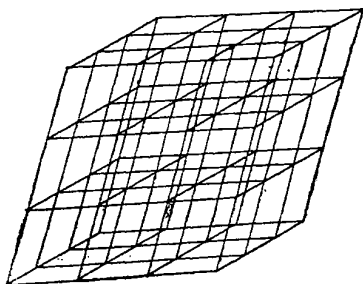
ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

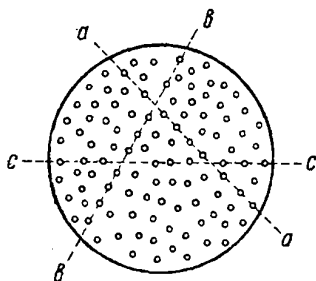
1. Аморфные и кристаллические тела

Известно, что в зависимости от температуры и давления тела могут находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом.

Тело, находящееся в газообразном и жидком состояниях, характеризуется непрерывным беспорядочным движением атомов



Фиг. 1.



Фиг. 3.

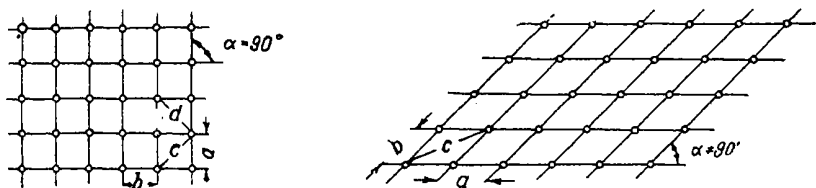
и молекул, из которых оно состоит. При переходе в твердое состояние (под влиянием температуры или давления) наступает относительная стабилизация молекул и атомов вещества, которые либо приобретают какой-то определенный стройный порядок, либо фиксируются в том же хаотическом беспорядке, в котором они находились при жидком состоянии вещества. В первом случае твердые тела будут называться кристаллическими, а во втором — аморфными.

К числу аморфных тел относятся: стекло, смолы, канифоль, шеллак, мастика и т. д.

Все металлы и их сплавы являются кристаллическими телами; атомы и молекулы их расположены в определенном порядке, составляющем так называемую кристаллическую решетку, в узлах которой и находятся атомы.

Кристаллическая решетка образуется пересечением в пространстве ряда параллельных плоскостей в трех направлениях. Параллельные плоскости находятся на одинаковом расстоянии одна от другой, различном для различных типов решеток, и могут образовать между собой всевозможные углы. Фиг. 1 дает представление о такой пространственной решетке кристаллического тела.

На фиг. 2 представлена одна из параллельных плоскостей пространственной кристаллической решетки — плоская сетка. На этой фигуре видно, что расстояние между атомами (a, b, c, d) в различных направлениях решетки неодинаково. Такое расположение атомов в пространственных решетках обуславливает неодинаковость свойств кристалла в различных направлениях. Все свойства монокристалла (крепость, удлинение, твердость, теплоемкость, теплопроводность, электропроводность, коэффициент расширения, способность отражать свет, растворимость и т. д.) в различных направлениях будут различны.



Фиг. 2.

Неодинаковость свойств кристаллического тела в различных направлениях называется анизотропией.

Наоборот, у аморфных тел, обладающих хаотическим расположением атомов и молекул, свойства в различных направлениях тела будут одни и те же. Эта одинаковость свойств аморфных тел во всех направлениях называется изотропией.

Изотропия аморфных тел обусловлена тем обстоятельством, что при внешнем воздействии на них, например, при растяжении, прохождении электрического тока, лучей света и т. д., аморфные тела окажут во всех направлениях одинаковое сопротивление этим воздействиям, так как последние встретят на своем пути приблизительно одинаковое число атомов или молекул (фиг. 3).

Следует иметь в виду, что технические металлы и сплавы не кристаллизуются в форме монокристалла, а представляют собой тела, обладающие поликристаллической структурой, т. е. большим числом различно ориентированных кристалликов. Это обстоятельство в большинстве случаев¹ уравнивает свой-

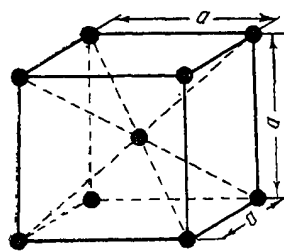
¹ Относительная анизотропность поликристаллических тел может наблюдаться в случае, когда отдельные кристаллики, составляющие поликристаллическое тело, приобретут одинаковую ориентировку в результате, например, прокатки. Так как большинство кристалликов будет определенным образом ориентировано направлением прокатки, то такой металл будет обладать одними свойствами в направлении прокатки и другими — в перпендикулярном к нему направлении, т. е. поперек прокатки.

ства металлов в различных направлениях, т. е. делает их квази-изотропными.

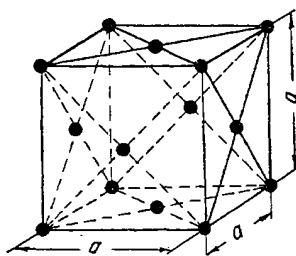
Атомы большинства металлов при кристаллизации занимают порядок, соответствующий кубу. Элементарная кристаллическая решетка пространственно центрированного куба представлена на фиг. 4. Такую решетку образуют следующие металлы: Li, Na, K, Rb, Cs, Ba, Fe₂, Mo, Ta, W, V, Cr.

На фиг. 5 представлена элементарная решетка гранецентрированного куба, в которую кристаллизуются атомы следующих металлов: Al, Ca, Fe_γ, Co₃, Ni, Cu, Rh, Rd, Ag, Ce_β, Ir, Pt, Au, Pb, Th.

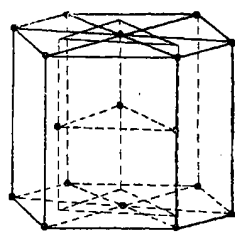
На фиг. 6 представлена решетка гексагональной плотной упаковки. В решетку этого типа кристаллизуются следующие металлы: Be, Mg, Ti, Co₂, Zr, Ru, Cd, Ce_α, Hf, Os.



Фиг. 4.



Фиг. 5.



Фиг. 6.

Остальные металлы кристаллизуются в другие более сложные типы пространственных решеток.

В табл. 1, наряду с другими физическими константами металлов, указаны кристаллические решетки для всех важнейших металлов.

2. Законы кристаллизации и структура металлов

Проследить процесс кристаллизации металлов непосредственно нельзя, потому что металлы являются веществами непрозрачными. Закономерность кристаллизации изучалась Тамманом и его учениками на прозрачных органических веществах. Последние имеют ряд преимуществ перед металлами благодаря своей легкоплавкости, неокисляемости при температуре опыта, прозрачности и, что наиболее важно, способности кристаллизоваться значительно ниже температуры затвердевания, присущей этому веществу. Последнее явление в металлографии называется переохлаждением. Разность между нормальной температурой и фактической температурой начала кристаллизации переохлажденной жидкости называется степенью переохлаждения.

При изучении кристаллизации органических веществ было установлено, что кристаллизация начинается не по всей массе расплава одновременно, а в отдельных точках его, распростра-

Физические константы элементов,

Элемент	Химический знак	Порядковый номер в периодической системе	Атомный вес	Атомный объем	Плотность (удельный вес) г/см ³	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Теплота плавления, кал/г	Теплоемкость при комнатной температуре, кал/град	Сжатие при кристаллизации %
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Алюминий	Al	13	27	10	2,70	659	1 800	77	0,21	6,6
Бериллий	Be	4	9,1	4,9	1,85	1 280	—	—	0,16	—
Ванадий	V	23	51	8,5	6,00	1 720	3 000	—	0,11	—
Висмут	Bi	83	209	21,4	9,75	271	1 430	12,6	0,03	3,3
Вольфрам	W	74	184	9,5	19,3	3 400	5 830	—	0,034	—
Железо (α)	Fe	26	55,8	7,1	7,88	1 530	2 450	—	0,102	—
Железо (γ)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Золото	Au	79	197,2	10,2	19,32	1 063	2 600	16	0,032	5,2
Индий	In	49	114,8	15,8	7,28	155	—	—	0,057	—
Иридий	Ir	77	193,1	8,6	22,42	2 350	—	—	0,030	—
Кадмий	Cd	48	112,4	13	8,67	320	778	13,7	0,055	4,7
Кальций	Ca	20	40	26	1,54	810	—	—	0,16	—
Кобальт (α)	Co	27	58,9	6,8	8,71	1 444	—	—	0,10	—
Кремний	Si	14	28,1	11,6	2,42	1 420	—	—	0,17	—
Литий	Li	3	6,9	13	0,534	186	1 400	—	0,83	—
Магний	Mg	12	24,3	14	1,74	650	1 120	70	0,24	4,2
Марганец (α)	Mn	25	54,9	7,4	7,42	1 230	1 900	—	0,11	—
Молибден	Mo	42	96,0	9,3	10,3	2 625	3 600	—	0,063	—
Мышьяк	As	33	74,9	13,1	5,73	850	—	—	0,08	—
Медь	Cu	29	63,5	7,15	8,93	1 083	2 370	42	0,91	4,0
Никель	Ni	28	58,6	6,7	8,9	1 452	—	46	0,102	—
Олово (β)	Sn	50	118,7	16,3	7,3	232	2 270	14	0,53	2,8
Осмий	Os	76	190,9	8,5	22,5	2 700	—	—	0,031	—
Палладий	Pd	46	106,7	9,1	12,16	1 150	—	36	0,055	—
Платина	Pt	78	195,2	9,1	21,37	1 455	3 910	27	0,030	—
Родий	Rh	45	102,9	8,3	12,44	1 950	—	—	0,058	—
Ртуть	Hg	80	200,6	14,7	13,6	—38	357	2,8	0,033	3,75
Рутений	Ru	44	101,7	8,4	12,06	2 450	—	—	0,061	—
Свинец	Pb	82	207,2	18,3	11,34	327,4	1 525	5,4	0,030	3,4

Коэффициент линейного расширения на 1° С (0—100° С) 10 ⁻⁵ мм	Удельное электросопротивление $\rho = 10^{-9}$ ом/см	Твердость по Бринелю кг/мм ²	Механические свойства				Тип элементарной пространственной решетки	Постоянная решетки (сторона элементарного куба или шестигранника), Å $A = 10^{-8}$ см	Электрохимический потенциал (по отношению к водороду), в
			Коэффициент крепости на разрыв (крепость) кг/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение площади, %	Модуль упругости кг/мм ²			
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
23,1	2,7	20	8	40	85	7 000	Куб с центрированными гранями	4,041	—1,33.
—	18,5	—	—	—	—	—	Гексагональная	2,283	—
—	—	—	—	—	—	—	Центрированный куб	3,04	—
13,2	110	9	Хрупкий	—	—	3 200	Ромбоэдрический шестигранник	6,54	+0,20.
4,44	5,6	160	150	—	—	42 000	Центрированный куб	3,155	—
11,7	11,0	80	25—30	50—40	85	21 000	Центрированный куб	2,871	—0,43.
—	—	—	—	—	—	—	Куб с центрированными гранями	3,653	—
13,8	2,4	20	14	50	90	7 700	Куб с центрированными гранями	4,07	+1,3
—	—	—	—	—	—	—	Тетрагональная с центрированными гранями	4,58	—
—	6,1	—	—	—	—	—	Куб с центрированными гранями	3,805	—
31,6	7,5	20	6	20	50	7 000	Гексагональная	2,97	—0,4
—	4,6	30	6	10	—	—	Куб с центрированными гранями	5,56	—2,05.
12,36	9,7	130	25	10	—	—	Гексагональная	2,514	—0,29
7,63	—	—	—	—	—	—	Тетраэдрическая	5,43	—
—	9,3	—	—	—	—	—	Центрированный куб	3,5	—3,02.
25,8	5	25	20	10	15	4 375	Гексагональная	3,22	—1,55.
23,0	4,40	20	Хрупкий	—	—	—	Центрированный куб	8,89	—
5,32	5,5	—	—	—	—	—	Центрированный куб	3,143	—
5,00	35	—	—	—	—	—	Ромбоэдрическая	5,6	—
16,8	1,69	35	22	50	70	12 460	Куб с центрированными гранями	3,609	+0,34
13,2	6,93	70	50	45	70	21 000	Куб с центрированными гранями	3,54	—0,20.
22,96	11,8	5	2	40	90	4 130	Центрированная тетрагональная	5,84	—0,10.
—	—	—	—	—	—	—	Гексагональная	2,714	—
—	—	—	—	—	—	9 660	Куб с центрированными гранями	3,950	—
8,99	111	—	—	—	—	164 500	Куб с центрированными гранями	3,930	—
—	—	—	—	—	—	—	Куб с центрированными гранями	3,820	—
—	10,0	—	—	—	—	—	Ромбоэдрическая	4,6	+0,80
—	—	—	—	—	—	—	Гексагональная	2,686	—
27,09	20,4	4	1,8	45	90	—	Куб с центрированными гранями	4,92	—0,12.

Элемент	Химический знак	Порядковый номер в периодической системе	Атомный вес	Атомный объем	Плотность (удельный вес) $г/см^3$	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Теплота плавления, кал/г	Теплоемкость при комнатной температуре, кал/град	Сжатие при кристаллизации %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сера (ромбическая)	S	16	32,06	15,5	2,08	112,8	445,5	—	—	—
Серебро	Ag	47	107,9	10,2	10,53	960,5	2 150	21	0,054	5
Сурьма	Sb	51	120,2	18	6,69	630	1 440	—	0,05	1,4
Тантал	Ta	73	181,5	10,9	16,6	2 900	—	—	0,035	—
Титан	Ti	22	47,9	10,7	4,5	1 800	—	—	0,10	—
Торий	Th	90	232,1	19,1	12,6	1 700	—	—	0,28	—
Углерод	C	6	12,0	—	—	3 600	—	—	—	—
„ алмаз	—	—	—	3,42	3,52	—	—	—	0,11	—
„ графит	—	—	—	5,34	2,53	—	—	—	0,16	—
Уран	U	92	238,2	12,7	18,7	1 850	—	—	0,028	—
Фосфор	P	15	31,4	17	1,83	44	290	—	0,18	—
Церий	Ce	58	140,25	20,6	6,79	640	—	—	0,045	—
Цинк	Zn	30	65,4	9,1	7,74	419,4	930	28	0,088	6,5
Цирконий	Zr	40	91,2	14,1	6,4	1 700	—	—	0,066	—
Хром	Cr	24	52,0	7,5	6,92	1 615	2 200	—	0,105	—

Таблица составлена на основании

1. Энциклопедия металло-физики, т. I.

2. Справочник физико-химич. вел. (технич. энцикл.), т. II.

няясь в глубь жидкой массы вещества до полного его затвердевания. Эти точки, с которых начинается процесс кристаллизации, Тамман назвал центрами кристаллизации. Одновременно с этим было установлено, что процесс кристаллизации — рост образовавшихся кристаллов — совершается с определенной скоростью, практически вполне измеримой для прозрачных органических веществ.

Число центров кристаллизации, возникающих в единице объема (1 см^3) за определенный промежуток времени (1 мин.), и линейная скорость роста этих центров (мм/мин) зависят, как это было установлено, от степени переохлаждения вещества.

Эта зависимость может быть экспериментально определена, если поместить в тонкостенную стеклянную трубку какое-нибудь легкоплавкое вещество и, нагрев его выше температуры плав-

Коэффициент линейного расширения на 1°С (0—100°С) 10 ⁻⁶ мм	Удельное электросопротивление $\rho = 10^{-8}$, ом/см ²	Твердость по Бринеллю кг/мм ²	Механические свойства				Тип элементарной пространственной решетки	Постоянная решетки (сторона элементарного куба или шестигранника), $A = 10^{-8}$ см	Электрохимический потенциал (по отношению к водороду), в
			Коэффициент крепости на разрыв (крепость) кг/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение площади, %	Модуль упругости, кг/мм ²			
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
—	—	—	—	—	—	—	Ромбическая	—	—
19,21	1,62	25	13	50	90	7 230	Куб с центрированными гранями	4,078	+0,80
10,05	38,6	30	Хрупкий		—	7 700	Ромбоэдрический шестигранник	6,2	+0,10
—	14,6	—	—	—	—	—	Центрированный куб	3,272	—
—	3,2	—	—	—	—	—	Гексагональная	2,97	—
—	—	—	—	—	—	—	Куб с центрированными гранями	5,04	—
—	—	—	—	—	—	—	Решетка алмаза	—	—
1,18	40 00—	—	—	—	—	—	Тетраэдрическая	3,56	—
—	100 00	—	—	—	—	—	—	—	—
7,68	—	—	—	—	—	—	Гексагональная	2,47	—
—	—	—	—	—	—	—	Центрированный куб	3,43	—
125,3	—	—	—	—	—	—	Ромбоэдрическая	5,96	—
—	—	—	—	—	—	—	Гексагональная	3,65	—
29,76	5,92	30	25	20	70	8 680	Гексагональная	2,670	—0,76
—	—	—	—	—	—	—	Гексагональная	3,23	—
8,2	2,6	Хрупкий		—	—	—	Центрированный куб	2,895	—0,6

следующих источников:

3. Кащенко, Металловедение, т. I.

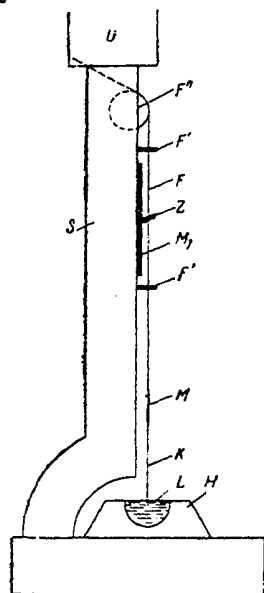
4. Джефрис и Арчер, Металловедение, перев., 1927.

ления, перенести затем в ванну, имеющую температуру ниже температуры плавления вещества; при этом можно заметить, как в сплаве из одной или нескольких точек начнут расти кристаллы. Беря различные температуры ванн, в которые переносится расплавленное вещество, можно заметить, что с увеличением переохлаждения число точек, из которых начинается рост кристаллов, т. е. число центров кристаллизации, заметно возрастает. Таким образом можно определить число центров кристаллизации для различных степеней переохлаждения.

Для некоторых веществ можно легко определить также зависимость линейной скорости роста кристаллов от переохлаждения. Для этого вещество помещают в U-образную стеклянную трубку и расплавляют его. Затем при различном переохлаждении делают прививку с помощью кристаллика того же ве-

щества. Из места соприкосновения кристаллика с переохлажденным жидким веществом начнется кристаллизация вещества в виде тонких нитей. Поместив на поверхности трубки шкалу, можно определить скорость перемещения нитей и таким образом определить линейную скорость роста кристаллов.

Для определения скорости роста центров кристаллизации у чистых металлов Чохральским был разработан другой метод, сущность которого состоит в том,



Фиг. 7.

что в расплавленный металл (вблизи температуры плавления) помещается стеклянная палочка; в месте соприкосновения металл пристаёт к концу палочки, затвердевает на ней и служит центром для последующей кристаллизации жидкого металла. Затем палочка вытягивается из металла при помощи часового механизма.

По мере вытягивания стеклянной палочки за ней тянется монокристаллическая нить. Место соприкосновения нити с расплавленным металлом охлаждается струей инертного газа, например, азота.

Скорость кристаллизации¹ металла будет определяться тем расстоянием, которое проходит, не разрываясь, металлическая нить при вытягивании ее из расплавленного металла в единицу времени. При помощи этого метода Чохральский определял скорость кристаллизации олова, свинца и цинка.

На фиг. 7 представлен прибор, с помощью которого определяют скорость роста кристаллов по методу Чохральского. На фигуре приняты следующие обозначения:

- K — монокристаллическая нить;
- S — штатив;
- F'' — блок;
- F — нить;
- F' — направляющие для нити, которая поднимается часовым механизмом;
- U — часовый механизм;
- M — стеклянный стержень, который погружается в расплавленное вещество;
- H — чашка с расплавленным веществом;

¹ Понятие «скорости кристаллизации» имеет в виду два одновременно происходящих явления: возникновение числа центров кристаллизации (количество) и скорость их роста. В данном же случае за скорость кристаллизации может быть принята только одна скорость роста, поскольку по методу Чохральского наблюдается скорость роста монокристалла.