

PRINCIPLES OF PHYSICAL METALLURGY

MORTON C. SMITH

*Staff Member and Alternate
Group Leader, Los Alamos
Scientific Laboratory,
University of California*



HARPER & BROTHERS, PUBLISHERS
New York

МОРТОН К. СМИТ

ОСНОВЫ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ

Перевод с английского

под редакцией

Б Я ЛЮБОВА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Москва 1959

АННОТАЦИЯ

Книга является первой частью английского двухтомного издания, посвященного главным образом описанию поведения металлов под действием механических нагрузок. Она содержит основные данные о строении металлов, о природе электрических и магнитных свойств металлов, а также об их поведении под нагрузкой при различных условиях.

Книга предназначена для широкого круга инженеров и техников, интересующихся основами современного физического металловедения.

Редактор *А. Н. Чернов*
Редактор издательства *М. С. Архангельская*
Технический редактор *Е. Б. Вайнштейн*

Сдано в производство 10/XII 1958 г.	Подписано в печать 6/IV 1959 г.
Бумага 60 × 92 ¹ / ₁₆ = 14,25 бум. л. = 28,5 печ. л.	Уч.-изд. л. 27,86
T-04508	Тираж 5200 Заказ 1002 Цена 21 р. 50 к.

И типография Металлургиздата, Москва, Цветной б., 30

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора русского перевода	11
Из предисловия автора	13

Глава I. АТОМ

1. Общие представления о структуре атома	15
2. Электроны	17
3. Движение электрона	19
4. Принцип запрета	19
5. Уровни энергии внутри атома	20
6. Диаграммы уровней энергии	21
7. Вырождение уровней энергии	24
8. Электронные оболочки	26
9. Химическая валентность	27
10. Периодическая система элементов	30
11. Переменная валентность	39
12. Свободная энергия	40
13. Самопроизвольные изменения	41
14. Химическая активность	43
15. Ряд активности для неметаллов	45

Глава II. КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

1. Металлические кристаллы	46
2. Общие представления о пространственных решетках	46
3. Четырнадцать возможных типов пространственных решеток	48
4. Возможность существования дополнительных пространственных решеток	51
5. Кристаллографические обозначения	52
6. Системы координат	53
7. Семь кристаллических систем	56
8. Отрезки, отсекаемые на осях	57
9. Индексы Миллера	58
10. Системы и семейства плоскостей	61
11. Индексы направления	64
12. Индексы Миллера — Бравэ	67
13. Индексы направления для гексагональных систем	70

Глава III. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ

1. Твердые тела, жидкости и газы	73
2. Кристаллические и аморфные твердые тела	75
3. Кристаллические решетки	77
4. Важные плоскости и направления	79
5. Силы связи в кристаллах	82
6. Молекулярные кристаллы	82
7. Ионные кристаллы	84
8. Интерметаллические соединения ионного типа	88
9. Валентные кристаллы	90
10. Правило 8 минус N	93
11. Валентно-молекулярные кристаллы	94
12. Металлические кристаллы	97
13. Металлическая связь	98
14. Сопоставление металлической, ионной и ковалентной связи	100
15. Структуры металлических кристаллов	101
16. Плотноупакованная гексагональная структура	102
17. Характерные особенности плотноупакованной гексагональной структуры	105
18. Примеры кристаллов с плотноупакованной гексагональной структурой	107
19. Гранецентрированная кубическая структура	109
20. Объемноцентрированная кубическая структура	112
21. Другие кристаллические структуры	113
22. Попытки объяснения причин существования наблюдаемых кристаллических структур	115
23. Электронная концентрация	117

Глава IV. ПОЛИМОРФИЗМ

1. Полиморфные превращения	120
2. Примеры полиморфизма	121
3. Теоретические обоснования существования полиморфизма	122
4. Силы связи и полиморфизм	125
5. Гистерезис и энергия активации	127
6. Переходные структуры	131
7. Мартенситное превращение	133

Глава V. НЕСОВЕРШЕНСТВА В СТРОЕНИИ КРИСТАЛЛОВ

1. Упругие искажения	136
2. Свободные поверхности металла	137
3. Поверхностная энергия	138
4. Затвердевание чистого металла	140
5. Границы зерен	143
6. Остаточное сродство; гетерогенные сплавы	146

7. Рост зерна	147
8. Сфероидизация	149
9. Аморфный металл; слой Бэббэ	152
10. Вакантные узлы кристаллической решетки; диффузия	156
11. Дефектные решетки	160
12. Дислокации	160
13. Мозаичная структура	164
14. «Наследственная» структура	165
15. Типы сплавов	167
16. Искажение кристаллической структуры чужеродными атомами	170
17. Определение пределов растворимости	172
18. Твердые растворы типа внедрения	174
19. Соединения типа внедрения	176
20. Твердые растворы типа замещения	177
21. Влияние относительной валентности	178
22. Связь электронной концентрации со степенью растворимости	180
23. Упорядоченные твердые растворы замещения	181
24. Физическая природа явления упорядочения	183
25. Дальний и ближний порядок	185
26. Частично упорядоченные твердые растворы	187
27. Сопоставление упорядоченных твердых растворов и соединений	188
28. Упорядоченность в твердых растворах типа внедрения	189

Глава VI. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

1. Электропроводность	191
2. Электронное облако в проводниках	191
3. Необходимость возбуждения электронов	192
4. Проводники электрического тока	193
5. Изоляторы	195
6. Полупроводники	196
7. Фотопроводники	196
8. Общие представления теории зон	197
9. Электрическое сопротивление	198
10. Магнетизм	200
11. Диамагнетизм	201
12. Парамагнетизм	202
13. Ферромагнетизм	203
14. Магнитные свойства различных материалов	206
15. Магнитные материалы	207

Глава VII. ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

1. Вязкость	209
2. Упругая и пластическая деформации	211

3. Упругая деформация	212
4. Значение модуля упругости для описания поведения материала под нагрузкой	213
5. Кривая напряжение — деформация	216
6. Истинные напряжения и деформации	219
7. Упругая и пластическая деформации, развивающиеся одновременно	222
8. Упругое возвращение	224
9. Типы нагружения при пластической деформации	224
10. Разложение сил	227
11. Влияние типа межатомной связи на возможность развития скольжения	229
12. Плоскости и направления скольжения	230
13. Скольжение в плотноупакованных гексагональных кристаллах	232
14. Поведение монокристалла цинка при растяжении	234
15. Скольжение в гранецентрированных кубических кристаллах	236
16. Скольжение в объемноцентрированных кубических кристаллах ..	237
17. Скольжение в иных кристаллических структурах	238
18. Развитие скольжения в монокристалле	239
19. Силы, вызывающие скольжение	242
20. Скольжение, вызванное движением дислокаций	245
21. Сила, необходимая для движения дислокаций	247
22. Источник первоначального скольжения	249
23. Прекращение скольжения по действующей плоскости скольжения ..	252
24. Теории упрочнения, основанные на самоторможении процесса скольжения	252
25. Дислокационная теория упрочнения	254
26. Поле напряжений, созданное дислокацией	256
27. Взаимодействие дислокаций	256
28. Возникновение решетки дислокаций	257
29. Побочные эффекты, сопровождающие образование решетки дислокаций	259
30. Механическое двойникование (двойникование при деформации) ..	262
31. Механизм двойникования	264
32. Значение двойникования	265
33. Внешний вид двойников, наблюдаемый под микроскопом	267
34. Различие между полосами скольжения и полосами двойников	271
35. Деформация поликристаллов	272
36. Влияние границ зерен	274
37. Влияние легирования на развитие пластической деформации	277

Глава VIII. ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

1. Упрочнение (наклеп)	280
2. Техническое значение упрочнения	286
3. Изменение формы отдельных кристаллитов	289
4. Полосчатость и линии течения	291

5. Влияние полосчатости на механические свойства металлов	294
6. Структура, подобная апельсиновой корке	296
7. Полосы деформации	298
8. Однородное вращение кристалла	300
9. Преимущественная ориентировка (кристаллографическая текстура)	304
10. Технологическое значение преимущественной ориентировки	306
11. Преимущественная ориентировка и упрочнение	312
12. Изменение энергии металлов при деформации	313
13. Макронапряжения	314
14. Микронапряжения	316
15. Эффект Баушингера	317
16. Упругое последствие (упругий гистерезис)	319
17. Затухание колебаний в металлах	320
18. Другие структурно-чувствительные свойства металлов	323
19. Свойства, не зависящие от структуры	324

Глава IX. ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

1. Диффузия	327
2. Рост зерен	330
3. Факторы, способствующие росту зерен	331
4. Температура, время и размер зерен	334
5. Влияние межзеренных прослоек на рост зерен	336
6. Отдых (возврат)	338
7. Низкотемпературное снятие напряжений; легкий отжиг	340
8. Рекристаллизация	341
9. Зарождение центров рекристаллизации	342
10. Рост кристаллов	346
11. Полный отжиг. Рост рекристаллизованных зерен	347
12. Рекристаллизация, приводящая к зернам больших размеров	348
13. Микроструктура после рекристаллизации	354
14. Текстура отжига	354
15. Двойники отжига	358
16. Связь между горячей и холодной механической обработкой	359
17. Преимущества горячей обработки	360
18. Недостатки горячей обработки	365
19. Сила, необходимая для возникновения пластической деформации	369
20. Влияние длительности или скорости нагружения на деформацию ..	371
21. Горячее прессование	375
22. Ползучесть (крип)	376
23. Кривая ползучести	377
24. Влияние величины нагрузки на вид кривой ползучести	379
25. Сопротивление ползучести, длительная прочность и предел ползучести	380
26. Влияние температуры на вид кривой ползучести	381
27. Механизм пластической деформации при ползучести	383
28. Выбор металлов для работы при высокой температуре	387

Глава X. РАЗРУШЕНИЕ

1. Характер сил, вызывающих появление трещин	393
2. Разрушение вследствие сдвига	395
3. Энергетические соотношения при образовании трещин. Прочность кристаллов	399
4. Сопротивление отрыву поликристаллических металлов	400
5. Размещение трещин	409
6. Внешний вид поверхности разрыва	411
7. Пластическая деформация в течение разрыва	412
8. Многоосное напряженное состояние	414
9. Чувствительность к надрезам	420
10. Выводы, касающиеся разрушения при отрыве	422
11. Разрушение в результате усталости (частичный отрыв)	425
12. Образование и расширение усталостных трещин	426
13. Внешний вид поверхности усталостного излома	428
14. Напряжения, вызывающие усталостное разрушение	429
15. Меры, предупреждающие усталостное разрушение	431
16. Испытания на усталость	444
17. Машины для испытания на усталость	446
18. Окончательная обработка поверхности	449
19. Масштабный фактор (фактор размеров)	450
20. Испытания на коррозионную усталость	451
21. Целесообразность проведения испытаний на усталость	452
Литература	454

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА РУССКОГО ПЕРЕВОДА

В наши дни перед наукой о металлах стоят серьезные задачи, решение которых необходимо для дальнейшего успешного развития техники. Создание новых материалов, способных работать в условиях высоких температур и больших давлений или имеющих особые электрические и магнитные свойства, необходимо для прогресса в области реакторо- и ракетостроения, электроники, а также многих других. Для разумного «конструирования» новых материалов и создания рациональных методов обработки уже имеющихся в первую очередь необходимо глубокое понимание физических процессов, протекающих в металлах под влиянием термических, химических, механических и прочих воздействий. Поэтому физика все глубже проникает в металловедение и становится его научной основой. На наших глазах рождается, по существу, новая дисциплина — физическое металловедение. Однако книг, посвященных описанию важнейших технологических операций с точки зрения физики в мировой научной литературе еще очень мало. Поэтому мы считаем возможным рекомендовать советскому читателю настоящий перевод.

Книга М. К. Смита является первой частью двухтомного издания, посвященного описанию поведения металлов главным образом под действием механических нагрузок. Помимо изложения основных представлений о строении металлов автор описывает и объясняет с точки зрения физики комплекс явлений, характерных для поведения металла при деформировании и разрушении. Во втором томе, перевод которого готовится к изданию, систематически рассматривается влияние состава и термической обработки на строение и поведение конкретных металлов и сплавов. Хорошее владение материалом позволяет автору, не впадая в вульгаризацию, изложить в простой форме, без применения сложного математического аппарата, современные представления о факторах, определяющих способность металла противостоять различным видам нагружения в разных условиях.

Первые три главы настоящей книги посвящены рассмотрению общих вопросов, относящихся к строению свободных атомов элементов и кристаллических структур металлов, и служат введением к остальной части книги. В главе IV описана природа и особенности полиморфизма металлов. В главе V подробно рассмотрены различные несовершенства в строении кристаллов, существенно влияющие на свойства последних. Роль указанных

дефектов кристаллической решетки по мере развития науки о металлах выступает все явственней. Глава VI содержит весьма краткое и элементарное изложение современных представлений о природе электрических и магнитных свойств металлов. Наконец, главы VII—X посвящены детальному и на наш взгляд весьма интересному анализу поведения металла под нагрузкой при различных температурах. В целом книга построена таким образом, что читатель получает представление о микропроцессах и их макровыражении при деформировании и разрушении металлов.

Следует отметить, что описание физических явлений (например, упрочнения, скольжения) М. К. Смит тесно связывает с рассмотрением конкретных технологических операций (например, вытяжки, штамповки), основанных на этих явлениях. Такой способ изложения делает природу иногда весьма сложных процессов легко доступной для понимания.

Настоящую книгу безусловно следует считать весьма полезной при первом знакомстве с основами современного физическо-го металловедения.

В некоторых местах нами сделаны дополнительные ссылки на литературу, содержащую более полные данные по тому или иному конкретному вопросу.

Перевод гл. I—III и VII выполнен Н. С. Фастовым, гл. IV—А. Л. Ройтбурдом, гл. V и VI — Б. Я. Любовым, гл. VIII, IX и X — В. М. Розенбергом.

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА

Внушительное здание науки о металлах строилось в течение тысячелетий, с тех пор, как человек познакомился с металлами и у него возникло стремление понять их природу. Сведения в указанной области собраны в многочисленных учебниках. Среди литературы о металлах имеется много книг, знакомство с которыми необходимо для каждого металлурга. Однако, к сожалению, имеющиеся руководства, описывая, как ведут себя металлы в различных условиях, совершенно не отвечают на вопрос, почему они обладают определенными свойствами и какие законы управляют их поведением.

Существующая литература о металлах может помочь в выборе, изготовлении и обработке обычных технических металлов, когда условия службы и среда, в которой находится изделие, совершенно шаблонны. Поэтому в указанных случаях образованный конструктор, рабочий-металлист, специалист по термообработке и механик могут обойтись без совета металлургов.

Иначе обстоит дело при возникновении неожиданных затруднений в процессе обычных применений металлов, а также когда требуется получить металл более стойкий, с улучшенными характеристиками, меньшим весом, более дешевый или вообще с совершенно новыми свойствами. Тогда знания металлурга становятся необходимыми.

При решении сложных, разнообразных и все новых задач, которые ставят перед металлургом современная наука и техника, он должен полагаться прежде всего на свое собственное понимание поведения металлов и, во вторую очередь, привлекать любые, относящиеся к делу сведения, которые можно найти в руководствах и других источниках. Профессиональное образование должно дать специалисту по металлам как основные сведения о поведении металлов, так и способность легко использовать литературу по этому вопросу.

Данная книга написана для того, чтобы помочь металлургу получить основные представления о поведении металла.

Дальнейшие успехи в изучении этого вопроса зависят от того, какие знания уже приобретены изучающим и насколько они систематичны.

Эта книга представляет попытку изложить науку о поведении металлов как нечто целое, последовательное и образующее цепь рассуждений, которые являются развитием известных принципов физики и химии, приводящих к объяснению наблюдаемого поведения технических металлов и сплавов. С этой целью была сделана попытка выбрать и сжато изложить только самую суть предмета, а все остальное исключить. Однако даже при принятых ограничениях для полного описания поведения металлов понадобилась бы очень толстая книга; поэтому оказалось необходимым разделить ее на два тома соответственно меньшего объема. Данная книга является первым томом¹.

¹ Во втором томе [12] рассматривается влияние состава и термической обработки на структуру и свойства металлов и сплавов.

ГЛАВА I

АТОМ

Все вещества, твердые, жидкие и газообразные, состоят из атомов. Индивидуальные особенности атомов и способ расположения их относительно друг друга полностью определяют свойства вещества как целого.

Вследствие того, что свойства тел и, следовательно, возможность использования их обуславливаются свойствами атомов, последние стали объектом постоянного изучения с тех пор, как появились физические методы, позволяющие осуществить такие исследования. В результате проведенной работы структура, свойства и поведение атомов в настоящее время хорошо известны. К сожалению, многие детали наших знаний об атоме могут быть выражены только в форме сложных математических уравнений, понятных лишь физикам-теоретикам. Однако в значительно упрощенном виде представление об атомных структурах и взаимодействиях доступно всякому. Если не делать слишком больших упрощений, приводящих к существенным неточностям, такие представления оказываются полезными при любом наглядном описании поведения металлов. Изучение металлов и сплавов в данной книге начинается с описания строения атома и обзора его некоторых важных физических и химических характеристик. На основе этих сведений в последующих главах систематически рассмотрено расположение атомов в металлических монокристаллах и отдельных кристаллитах, входящих в состав применяемых на практике металлических тел. Это, в свою очередь, приводит к более ясному пониманию природы наблюдаемых структур, свойств и поведения металлов, а также сплавов, используемых современной техникой.

1. Общие представления о структуре атома

Атом состоит из ничтожно малой частицы — *ядра*, имеющего положительный электрический заряд, и некоторого числа (различного в зависимости от разновидности атома) одинаковых отрицательно заряженных частиц, называемых *электронами*.

При наиболее простом описании строения атома принимается, что электроны вращаются вокруг ядра атома по определенным орбитам, на которых они удерживаются благодаря тому, что центробежная сила, возникающая при их вращении, уравнове-

шивается электростатическим притяжением к ядру. Очевидно, что такое строение атома имеет много общего с миниатюрной солнечной системой, в которой электроны изображают планеты, а ядро играет роль солнца. Как и в солнечной системе, большая часть атома является «пустым» пространством. Средний диаметр ядра имеет размеры порядка 10^{-12} — 10^{-13} см, диаметр электрона считается немного большим. Диаметр атома, как целого, примерно равен 10^{-8} см; эта величина в 10^4 — 10^5 раз больше линейных размеров ядра или электрона.

Масса атома, в основном, сосредоточена в его ядре. Плотная структура ядра и его замечательная устойчивость все еще не получили полного объяснения. В состав атомного ядра входит одна или несколько частиц, называемых *протонами*. Все протоны имеют равную массу и одинаковый положительный электрический заряд $1e$, где e — единица количества электричества, равная $4,8 \cdot 10^{-10}$ абсолютных электростатических единиц или $1,6 \cdot 10^{-19}$ кулона. Все атомы данного химического элемента содержат в своих ядрах одинаковое число протонов. При фиксированном числе протонов в ядре может находиться переменное число *нейтронов* — частиц, имеющих массу, почти точно равную массе протона¹, но электрически нейтральных. Ядра атомов, содержащие одинаковое число протонов, могут включать в себя различное число нейтронов и, таким образом, значительно отличаться по массе. Химические свойства атомов определяются исключительно их электрической природой, которая не зависит от числа нейтронов, присутствующих в ядре; поэтому такие атомы, отличающиеся только своей массой, имеют одинаковые химические свойства. Атомы указанного типа называются *изотопами* данного элемента.

В своем «основном» состоянии, соответствующем наименьшей энергии, каждый атом электрически нейтрален. Следовательно, в его структуре должны присутствовать электроны (каждый с электрическим зарядом, равным — $1e$) в количестве, точно равном числу положительно заряженных протонов, находящихся в ядре данного атома. Это число, которое характерно для каждого химического элемента, называется его *атомным номером* и обозначается буквой Z . Атомные номера меняются (каждый раз на единицу) от легчайшего атома водорода ($Z = 1$, что соответствует одному протону и одному электрону в нейтральном атоме) до атома урана ($Z = 92$, т. е. в таком нейтральном атоме содержится 92 электрона) и нестабильных трансурановых элементов с еще большим атомным номером, недавно полученных при бомбардировке урана нейтронами в ядерных реакторах².

¹ В действительности нейтрон тяжелее протона примерно на 0,1% [1].

² Эти установки иногда называют урановыми котлами. (Ред.).