

Р. Хоникомб

Пластическая деформация металлов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621
ББК 34.4
Р11

Р11 **Р. Хоникомб**
Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб – М.: Книга по Требованию, 2024. – 406 с.

ISBN 978-5-458-28257-4

Для инженерно-технических и научных работников заводов и научно-исследовательских институтов, преподавателей ВУЗов, аспирантов и студентов старших курсов.

ISBN 978-5-458-28257-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

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 первоизданном 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.

многие работы советских исследователей [27—30]; исследование поверхностных зародышей сдвига проведено в работах [31, 32].

В гл. 5 рассматриваются существующие теории упрочнения, основанные на дислокационных представлениях, дается анализ физической природы последовательных стадий упрочнения при различных температурах. Связь между изменениями тонкой структуры и сопротивлением пластической деформации металлов и сплавов после упрочнения рассмотрена в работах [33, 34], а различные вопросы динамики дислокаций — в работе [35].

В гл. 6 рассматривается упрочнение твердых растворов, в том числе упорядоченных [77].

В гл. 7 обсуждается влияние выделений второй фазы на развитие пластической деформации монокристаллов сплавов [36—43].

Гл. 8 посвящена рассмотрению неоднородности деформации в монокристаллах. Рентгеноструктурный анализ дает мощное средство изучения этого явления. Так, например, при изгибе кристалла резкие дифракционные пятна размываются в дуги, т. е. возникает астеризм. На связь астеризма с деформацией монокристаллов впервые указал А. Ф. Иоффе [1]. Анализ и количественный расчет астеризма даны в работе [44]. Далее в этой главе анализируется деформация двойникованием (см. [7, 45]) и перемещение дислокаций в ходе этого процесса.

При анализе пластической деформации поликристаллов (гл. 9) естественно возникает вопрос о роли границ зерен. Этот вопрос удобно изучать на бикристаллах или крупнозернистых агрегатах. Результаты исследований таких объектов привели к разработке теории кривой напряжение — деформация поликристаллов на основе анализа свойств монокристаллов. Для выяснения ряда положений теории весьма важно изучение свойств нитевидных кристаллов и армированных материалов [46—48].

Наряду с атомами примесей существенное влияние на механические свойства металлов оказывают и другие точечные дефекты — вакансии и междоузельные атомы [49, 50]. Образование, подвижность и роль этих дефектов описаны в гл. 10.

В гл. 11 подробно описываются процессы возврата и рекристаллизации, определяющие ход восстановления механических свойств кристаллов при отжиге после деформации [51—54].

В гл. 12 рассматриваются вопросы, связанные с созданием преимущественной ориентировки зерен в поликристаллах (получением текстур) [55—57]. Описывается также кратко анизотропия магнитных свойств и теплового расширения.

В гл. 13 речь идет об особенностях пластической деформации металлов при ползучести. Дается подробный анализ кривых ползучести и вкладов в этот процесс различных факторов; рассматриваются также структурные изменения и развитие разрушения вследствие ползучести [58—64].

Заключительные главы 14 и 15 посвящены описанию двух имеющих очень большое практическое значение явлений — усталости и разрушения металлов. Многие детали машин и сооружений подвергаются воздействию циклически меняющихся напряжений. Даже когда максимальные значения таких напряжений меньше предела текучести материала при испытаниях

на растяжение, через определенное число циклов, как правило, наступает разрушение. В гл. 14 описывается поведение монокристаллов в таких условиях. Обсуждаются практические меры предотвращения усталостного разрушения. В гл. 15 анализируется вязкое и хрупкое разрушение, а также условия перехода от одного к другому [68—75, 78].

Согласно современной точке зрения, которая последовательно проводится в книге Хоникомба, основную роль в формировании механических свойств металлов и сплавов играют дефекты (чужеродные атомы, дислокации и т. д.). Это определяет важность исследований механических характеристик металлов высокой чистоты [66, 67] и высокой степени структурного совершенства [46, 47], которые проводятся во все возрастающих масштабах.

Исследования в области физики пластической деформации кристаллов в настоящее время достигли уровня, позволяющего ставить на реальной научной основе задачу, заключающуюся в разработке методов приближения механических свойств реальных металлов и сплавов к их теоретическим значениям.

Настоящая книга, несомненно, представляет интерес не только для широкого круга исследователей, работающих в области изучения механизма пластической деформации кристаллов, но и для инженеров, стремящихся создать новые материалы и рационально использовать уже имеющиеся. Эта проблема стала особенно актуальной в связи с необходимостью удовлетворения нужд новой техники (в первую очередь атомной энергетики и космонавтики). Монография Хоникомба будет весьма полезна также студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

Перевод книги выполнен Л. Г. Орловым (предисловие автора, главы 1—8, 10, 11) и О. М. Смирновым (главы 9, 12—15).

Б. Я. Любов

ЛИТЕРАТУРА

1. Иоффе А. Ф., Физика кристаллов, М.—Л., 1929.
2. Гарбер Р. И., ЖЭТФ, 10, 234, 355 (1940).
3. Степанов А. В., ЖТФ, 20, 1194 (1950).
4. Харрисон У., Псевдопотенциалы в теории металлов, изд-во «Мир», М., 1968.
5. Виздорович В. Н., Очистка металлов и полупроводников кристаллизацией, М., 1969.
6. Романенко В. Н., Получение однофазных полупроводниковых кристаллов, М., 1966.
7. Классен-Неклюдова М. В., Механическое двойникование кристаллов, М., 1960.
8. Инденбом В. Л., Орлов А. Н., Усп. физич. наук, 76, 557 (1962).
9. Некоторые вопросы физики пластичности кристаллов (сборник статей под ред. М. В. Классен-Неклюдовой), Итоги науки, Физико-математические науки, № 3 (1960).
10. Френкель Я. И., Введение в теорию металлов, изд. 3, М., 1958.
11. Уманский Я. С., Финкельштейн Б. Н., Блантер М. Е., Кишкин С. Т., Фастов И. С., Горелик С. С., Физическое металловедение (Физические основы металловедения), М., 1955.
12. Элементарные процессы роста кристаллов (сб. статей под ред. Г. Г. Леммлейна и А. А. Чернова), ИЛ, М., 1959.
13. Орлов Л. Г., Усиков М. П., Утевский Л. М., Усп. физич. наук, 76, 109 (1962).
14. Инденбом В. Л., статья «Дислокации в кристаллах», Физический энциклопедический словарь, т. 1, М., 1961.
15. Ройтбурд А. Л., дополнение в книге Фридель Ж., Дислокации, изд-во «Мир», М., 1967, стр. 583.

16. Орлов А. Н., вступительная статья к сборнику «Актуальные вопросы теории дислокаций», изд-во «Мир», М., 1968.
17. Косевич А. М., гл. IV в книге Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости, М., 1965.
18. Пинес Б. Я., Усп. физич. наук, 76, 519 (1962).
19. Ройтбурд А. Л., ФТТ, 7, 1142 (1965); 7, 1349 (1965).
20. Ройтбурд А. Л., Зильберман Л. А., ФММ, 21, 647 (1966).
21. Любов Б. Я., Ройтбурд А. Л., ДАН СССР, 169, 826 (1966).
22. Гутникова Г. М., Любов Б. Я., ФТТ, 11, 1245 (1969).
23. Косевич А. М., Сараладзе З. К., Слезов В. В., ЖЭТФ, 52, 1073 (1967).
24. Слезов В. В., ЖЭТФ, 53, 912 (1967).
25. Слезов В. В., ФТТ, 9, 3448 (1967).
26. Краско Г. Л., Телияц В. Н., Повзункова Р. Т., Заславский Ю. И., ФТТ, 9, 3059 (1967).
27. Лизтман В. И., Ребиндер П. А., Карпенко Г. П., Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов, М., 1954.
28. Ребиндер П. А., Лизтман В. И., Кочанова Л. А., ДАН СССР, 111, 1278 (1956).
29. Рожанский В. Н., Усп. физич. наук, 65, 387 (1958).
30. Лизтман В. И., Шукин Е. Д., Усп. физич. наук, 66, 213 (1958).
31. Степанов А. В., Милькаманович Е. А., ЖЭТФ, 18, 741, 773 (1948); 21, 401, 409 (1951).
32. Степанов А. В., ЖЭТФ, 17, 601 (1947); 18, 741, 776 (1948).
33. Кардонский В. М., Курдюмов Г. В., Перкас М. Д., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (седьмой сборник), 1962, стр. 7.
34. Кован Л. И., Пилецкая И. Б., Саррак В. И., Спасский М. Н., Утевский Л. М., Хашимов Х. Р., Энтин Р. И., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (девятый сборник), М., 1968, стр. 107.
35. Динамика дислокаций, сборник, Харьков, 1968.
36. Любов Б. Я., Шмаков В. А., ФММ, 29, 968 (1968).
37. Любов Б. Я., Кинетическая теория фазовых превращений, М., 1969.
38. Гиндин И. А., Энтин Р. И. и др., ДАН СССР, 178, 3 (1968).
39. Иванова В. С., Гордиенко Л. И., Новые пути повышения прочности металлов, М., 1964.
40. Усиков М. П., Утевский Л. М., Заводская лаборатория, 29, 944 (1963).
41. Носова Г. И., Травина Н. Т., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (девятый сборник), М., 1968, стр. 182.
42. Травина Н. Т., Носова Г. И., ФММ, 29, 564 (1970).
43. Копчеев О. Д., в сборнике «Общие проблемы машиностроения», М., 1967, стр. 59.
44. Комар А. П., ЖЭТФ, 6, 392 (1936).
45. Ройтбурд А. Л., Эстрин Э. И., в сборнике «Металловедение и термическая обработка» (1968), Итоги науки и техники, М., 1970, стр. 5.
46. Кушнир И. П., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (девятый сборник), М., 1968, стр. 174.
47. Надгорный Э. М., Осипьян Ю. А., Перкас М. Д., Розенберг В. М., Усп. физич. наук, 67, 625 (1959).
48. Иванова В. С., Ботвина Л. Р., в сборнике «Металловедение и термическая обработка» (1968), Итоги науки и техники, М., 1970, стр. 103.
49. Френкель Я. И., Кинетическая теория жидкости, М., 1945.
50. Дамаск А., Динс Дж., Точечные дефекты в металлах, изд-во «Мир», М., 1966.
51. Горелик С. С., Рекристаллизация металлов и сплавов, М., 1966.
52. Конобеевский С. Т., Мирер И. И., Zs. Kristallographie, 81, 69 (1932).
53. Иверонова В. И., в сборнике «Применение рентгеновских лучей к исследованию материалов», М.—Л., 1949, стр. 34.
54. Кован Л. И., Энтин Р. И., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (второй сборник), М., 1951, стр. 216.
55. Шубников А. В., Основы кристаллографии, М.—Л., 1940.
56. Целиков А. И., Федосов Н. М., Соколов А. А., Прокатка стали, М., 1943.
57. Кудрявцев И. П., Текстура в металлах и сплавах, М., 1965.
58. Розенберг В. М., Плазучесть металлов, М., 1967.
59. Одинг И. А., Иванова В. С., Бурдинский В. В., Геминев В. И., Теория плазучести и длительной прочности металлов, М., 1959.

60. Пинес Б. Я., Очерки по металлофизике, Харьков, 1961.
61. Журков С. Н., Вестник АН СССР, № 11, 78 (1957).
62. Иванова В. С. и др., Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов, М., 1965.
63. Лифшиц И. М., ЖЭТФ, 44, 1349 (1963).
64. Френкель Я. И., ЖЭТФ, 16, 29 (1946).
65. Иоффе А. Ф. и др., Журнал русского физико-химического общества, 56, 489 (1924).
66. Каменецкая Д. С., Пилецкая И. Б., Ширяев В. И., ДАН СССР, 190, 1333 (1970).
67. Ширяев В. И., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (девятый сборник), М., 1968, стр. 166.
68. Саррак В. И., Энтин Р. И., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (седьмой сборник), М., 1962, стр. 64.
69. Орлов Л. Г., Утевский Л. М., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (седьмой сборник), М., 1962, стр. 156.
70. Давиденков Н. Н., Проблема удара в металловедении, М., 1938.
71. Фридман Я. Б., Дроздовский Б. А., Влияние трещин на механические свойства конструкционных сталей, М., 1960.
72. Потак Я. М., Хрупкое разрушение стальных деталей, М., 1955.
73. Саррак В. И., Энтин Р. И., в сборнике «Проблемы металловедения и физики металлов» (девятый сборник), М., 1968, стр. 142.
74. Гликман Л. А., Пэст В. П., Некоторые вопросы усталостной прочности, 1953.
75. Фридман Я. Б., Теоретические основы конструирования машин, М., 1957.
76. Вишняков Я. Д., Дефекты упаковки в кристаллической структуре, М., 1970.
77. Попов Л. Е., Козлов Э. В., Механические свойства упорядоченных твердых растворов, М., 1970.
78. Финкель В. М., Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах, М., 1970.

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

За последние двадцать лет физические основы металловедения существенно прояснились. Одним из наиболее значительных достижений в этой области явилось развитие теории дислокаций, которая позволила рассмотреть природу многих характерных свойств кристаллических твердых тел, в частности их поведение при пластической деформации. По этому вопросу написан уже не один объемистый том, но тем не менее ощущается потребность в книге, содержащей систематическое описание поведения реальных металлов и сплавов при различных видах деформации, а также попытку объяснить его — насколько это возможно — с позиций дислокационной теории.

При написании данной книги я применил тот же подход, который был использован в классическом труде Шмида и Боаса «Пластичность кристаллов», поскольку поведение монокристаллов взято как логическая отправная точка, однако при изложении материала основное внимание уделено послевоенным работам, которые в большом количестве появились в этой области. Результаты этих исследований затем используются для анализа более сложных деформационных явлений в поликристаллических агрегатах, как, например, текстуры, ползучести, усталости и разрушения.

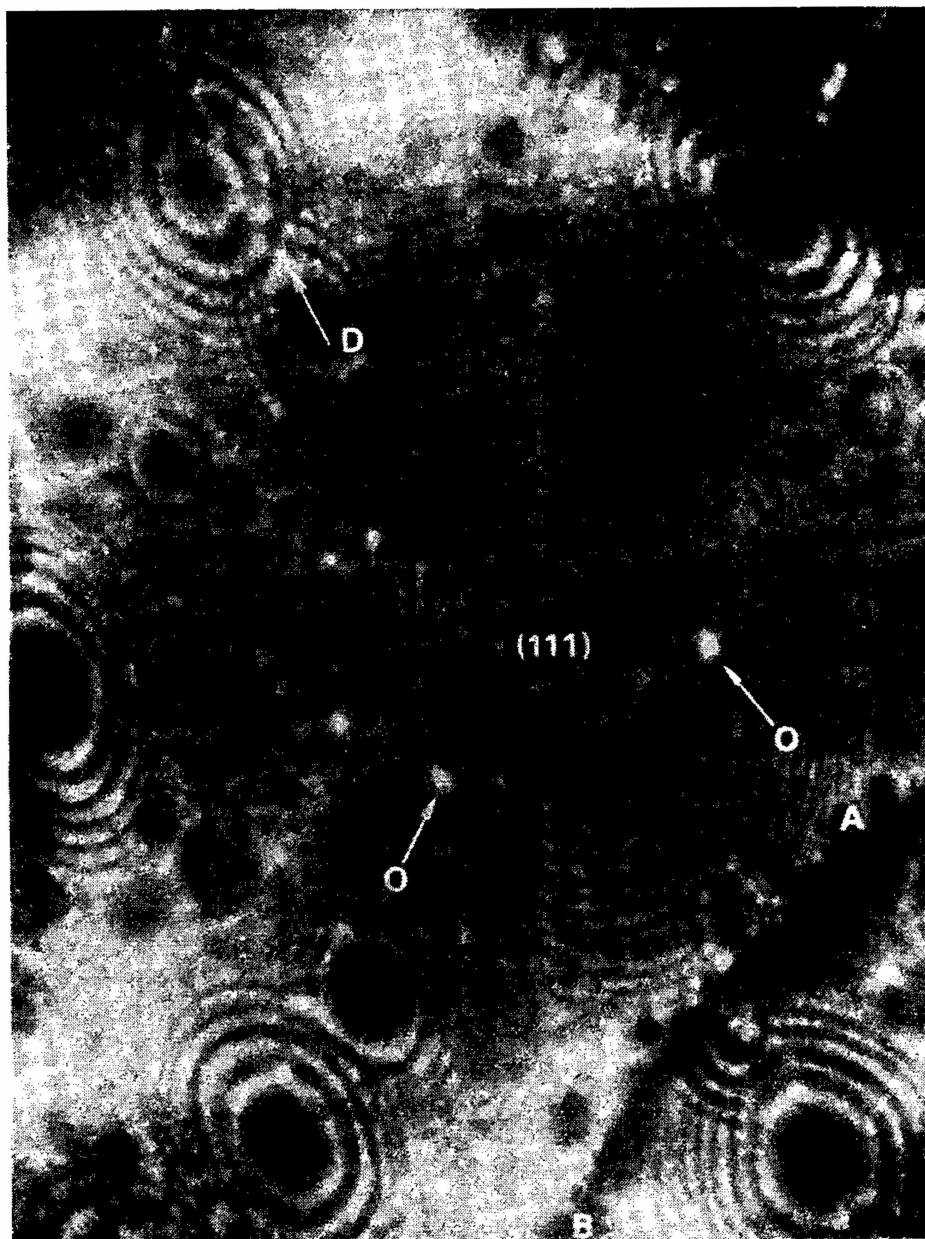
Книга рассчитана на студентов старших курсов металлургических и материаловедческих специальностей университетов и технологических учебных заведений, которым необходимо иметь общую картину пластической деформации металлов, включающую как теорию, так и рассмотрение свойств и поведения металлов. Она может быть полезна также инженерам, давая объяснение основных принципов, определяющих свойства используемых ими материалов. Представленная в книге библиография не является исчерпывающей, но она подобрана так, чтобы обеспечить широкую основу для дальнейшего чтения по данному вопросу. Предполагается, что читатель обладает элементарными знаниями по металлофизике и кристаллографии.

Книга была написана в основном в то время, когда я работал в Шеффилдском университете, и я очень признателен профессору А. Дж. Квореллу и коллегам по отделению металлургии этого университета за полезные обсуждения и поддержку. Я чувствую себя особенно обязанным профессору Е. О. Холлу, который прочел рукопись и сделал много полезных замечаний. Источники всех приведенных в книге рисунков указаны, и я рад принести свою благодарность всем авторам, которые помогли мне при их собирании.

Наконец, я рад воспользоваться благоприятной возможностью, чтобы выразить глубокую признательность моему старому другу д-ру Вальтеру Боасу, который впервые приобщил меня к изучению деформации кристаллов.

Р. Хоникомб

Кембридж, 1968



Автопечная микрофотография пирита.

Округлые области являются выраженными кристаллическими границами. Линия АВ — граница зерна, светлые пятна (О) — внедренные атомы кислорода; в области D видна дислокации. Увеличение несколько миллионов.

Глава 1

ВВЕДЕНИЕ

Вероятно, наиболее характерным свойством металла является пластичность, или способность претерпевать большую деформацию без разрушения. Это свойство было весьма полезным даже для наших отдаленных предков, когда они открывали месторождения природного золота или меди, а также случайно находили железные метеориты. Действительно, золото, которое является наиболее пластичным из металлов, уже много столетий назад проковывалось в тончайшие листы. В то время как практические знания о формоизменении металлов простираются в глубь тысячелетий, наше понимание физических явлений, связанных с деформацией, развилось только в течение последних сорока лет. Некоторые из основных принципов были объяснены, но многие сопутствующие явления требуют еще значительных дальнейших исследований, прежде чем они будут поняты до конца. Эта книга имеет целью обрисовать костяк излагаемого предмета, опираясь на известные факты и принципы, но в некоторых случаях автор не устоял от соблазна и привел теоретические соображения, основанные на непроверенных предположениях.

Если к металлической проволоке, подвешенной в какой-то фиксированной точке, прилагать возрастающую нагрузку, то будет происходить ее растяжение, которое полностью обратимо после удаления нагрузки. В этом случае говорят, что металл деформируется упруго и имеется линейное соотношение между напряжением σ и деформацией ϵ , которое называется законом Гука $E = \sigma/\epsilon$. Для любой данной нагрузки отношение напряжения σ к упругой деформации ϵ есть постоянная величина E , называемая модулем Юнга для случая одноосного растяжения. Однако по достижении определенной нагрузки полного возврата деформации при разгрузке не происходит, поскольку металл деформируется пластично, или необратимо. Определим напряжение этого перехода как напряжение течения, или напряжение начального течения. Полная упругая деформация очень мала, так что преобладающей частью всей деформации является пластическая деформация. Инженеры при конструировании машин стараются избежать напряжений, сколько-нибудь близких к напряжению течения, но металлурги при производстве и обработке металла должны работать в пластической области. В этой книге мы рассмотрим поведение металлов, начиная от напряжения течения до того момента, когда они полностью разрушаются, изучим основные механизмы явлений, которые позволяют успешно осуществлять такие операции, как прокатка,ковка, волочение и прессование.

В начале нынешнего столетия Розенхайн и Эвинг показали, что пластическая деформация металлов приводит к появлению на их поверхности множества параллельных микроскопических ступенек, называемых полосами скольжения, которые позволили им предположить, что металл сдвигается вдоль полос наподобие карт при тасовании колоды. Эти ранние наблюдения ясно показали, что сдвиг осуществляется вдоль четко выраженных кристаллографических плоскостей в металле и следы скольжения изменяют свое направление на границах зерен. Однако провести детальное изучение на обычных металлических образцах было трудно, поскольку в одном зерне могут существовать несколько различных систем следов скольжения,

в связи с чем стала очевидной необходимость исследования поведения отдельных зерен или кристаллов. Только на этом пути можно было упростить изучение проблемы пластической деформации.

Несколько позднее, в 1910 г., Андраде открыл способ выращивания из расплава больших отдельных кристаллов; на этой основе затем Бриджмен разработал методику, которую он использовал для приготовления одинаковых по размерам монокристаллов многих металлов, перекрывающих широкую область возможных кристаллографических ориентировок оси образца. Этот способ сделал возможным детальное изучение пластической деформации металлических монокристаллов, и в период 1920—1934 гг. были проведены обширные экспериментальные исследования пластичности кристаллов.

Фундаментальные исследования деформации большинства обычных металлов привели к важным обобщениям, таким, как критерий критических скалывающих напряжений, и позволили точно установить принципы геометрии скольжения кристаллов. Было сопоставлено поведение металлов трех основных кристаллографических групп: гранецентрированных кубических, объемноцентрированных кубических и гексагональных плотно упакованных. Результаты этого периода интенсивных исследований суммированы в опубликованной в 1936 г. классической монографии Шмида и Боаса, посвященной пластичности кристаллов. В гл. 2 настоящей книги представлены классические экспериментальные результаты относительно деформации монокристаллов, а в гл. 4 этот вопрос рассматривается в свете данных более поздних исследований. После 1945 г. было выполнено много новых работ (в некоторых случаях на металлах значительно более высокой степени чистоты), что привело к видоизменению прежних представлений.

В 1934 г. Орован, Поляни и Тейлор независимо ввели представление о дислокации — линейном дефекте в кристалле, которое было необходимо для того, чтобы объяснить тот факт, что наблюдаемая прочность металлов в общем случае примерно в тысячу раз меньше, чем вычисленная теоретически. Без преувеличения можно сказать, что дислокации явились важнейшим открытием металлофизики за последние тридцать лет. То, что вначале было лишь изящной теоретической концепцией, в послевоенные годы с триумфом стало реальностью, имеющей существенное значение не только для описания процесса собственно пластической деформации, но и для объяснения особенностей роста кристаллов, возврата и других разнообразных явлений. Развитие теории было прервано войной, но возобновилось в 1945 г. и расцвело в последующее десятилетие.

Теперь имеется множество явных подтверждений теории, но ее принципиальные положения можно суммировать таким образом, что они могут использоваться студентами металлургических специальностей. Это как раз и является целью гл. 3, в которой описаны простые типы дислокаций и некоторые их свойства; в этой главе приведены также прямые доказательства существования дислокаций. Интересно отметить, что после десяти лет плодотворного развития теории окончательные доказательства многих теоретических заключений были получены на испытанном пути металлографического подхода, воплотившегося на этот раз в виде просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг.

Вероятно, наиболее впечатляющим свойством металлов при пластической деформации является деформационное упрочнение (наклеп), или способность металлов становиться прочнее при деформации. Выяснение природы упрочнения представляет собой весьма трудную для разрешения проблему, настолько трудную, что пока невозможно представить конкретную и убедительную количественную теорию. Однако дислокационная теория дает много полезных идей; некоторые из них рассмотрены в гл. 5 и использованы при попытке объяснить экспериментальные результаты.

Хотя наклеп и приводит к сильному упрочнению металла, значительно более эффективным способом повышения его сопротивления деформации является легирование другими элементами. Влияние даже очень малых концентраций атомов растворенных веществ на прочность металлического кристалла может быть весьма существенным, как это показано в гл. 6. Чтобы попытаться понять поведение сложных сплавов в процессе пластической деформации, необходимо изучить влияние на этот процесс легирующих элементов как в твердом растворе, так и при наличии выделившейся фазы (гл. 7). Хотя чаще всего деформация происходит путем скольжения, это не единственный механизм, посредством которого осуществляется пластическая деформация. В гл. 8 рассматривается важный процесс деформационного двойникования.

Многочисленные теории, касающиеся механических свойств металлов, лучше всего можно проверить на монокристаллах. Однако наступает момент, когда необходимо сделать попытку использовать сведения о поведении монокристаллов для понимания деформации поликристаллических агрегатов. Ясно, что данные о свойствах отдельных кристаллов являются при этом ключевыми, но попытка вывести из них поведение поликристаллов является трудным делом, и пока достигнуты лишь ограниченные результаты. В гл. 9 вначале рассматривается роль границ зерен, а затем обсуждаются кривые напряжение — деформация поликристаллических агрегатов.

Поры атомных размеров, или вакансии в решетке, являются важным побочным продуктом пластической деформации; они часто сопровождаются междоузельными атомами. Такие точечные дефекты играют существенную роль не только в деформационных процессах, но и при возврате и диффузии в твердом состоянии. Они являются также прямым следствием облучения кристаллических тел и главным фактором, определяющим механические свойства облученных материалов (гл. 10).

Уже тысячи лет назад было известно, что металлу, упрочненному механической обработкой, можно снова вернуть первоначальную пластичность путем нагрева. Имеется ряд интересных процессов, приводящих к этому конечному результату, которые начинаются с перераспределения дефектов внутри деформированных кристаллов (возврат) и завершаются заменой деформированных зерен новой системой свободных от искажений кристаллов (рекристаллизация). Это явление рассматривается в гл. 11. Хотя такие процессы могут показаться на первый взгляд не относящимися к изучению деформации, им следует уделить серьезное внимание, поскольку при повышенной температуре они могут протекать во время деформации.

Расположение зерен в поликристаллическом агрегате часто бывает далеко не случайным. Различные способы обработки металлов создают характерные преимущественные ориентировки кристаллитов, или текстуры, что приводит к различию механических свойств в разных направлениях. Текстуры развиваются также при рекристаллизации и заметно влияют на обрабатываемость отожженных металлов. Эти вопросы, а также анизотропия магнитных и термических свойств, рассматриваются в гл. 12.

Хорошо известен тот факт, что при постоянном напряжении в металле имеется зависящая от времени компонента пластической деформации, обуславливающая ползучесть, или крип. Разработка устойчивых по отношению к ползучести сплавов является важным и трудным делом, теория которого будет еще дополняться на протяжении многих лет. Однако начало уже положено, так что теперь можно описать основные характеристики деформации при ползучести и сформулировать некоторые теоретические положения, объясняющие наблюдаемое поведение металлов (гл. 13).

Согласно оценке, по крайней мере в 80% случаев разрушение металла является усталостным, т. е. разрушением при повторных переменных нагрузках. Тот факт, что металлы при этих условиях не могут выдержать напря-

жений, гораздо более низких, чем их начальные напряжения течения, является достаточно важным для того, чтобы стать предметом как практического, так и теоретического изучения. В последние годы интенсивно изучались структурные изменения при усталости, и в гл. 14 суммируются характерные особенности этого вида деформации. Конечным результатом продолжительной пластической деформации образца является разрушение или разрыв; в гл. 15 различные виды разрушения рассматриваются, насколько это возможно, с наиболее общей точки зрения. Тот факт, что обычно пластичный металл, такой, как железо, при некоторых условиях катастрофически разрушается после ничтожной пластической деформации, помогает подчеркнуть важность проблемы хрупкого разрушения. Это явление приобрело выдающееся значение во время последней мировой войны, когда путем широкого использования сварных конструкций было быстро построено много судов типа «Либерти», несколько сотен из которых, однако, разрушилось во время эксплуатации вследствие развития хрупкого разрушения, имевшего во многих случаях катастрофический характер. Хрупкое разрушение стали затрагивало столь большой круг проблем и убытки от него были столь велики, что как во время войны, так и после нее было начато много исследований этой проблемы. Некоторые результаты этих работ рассматриваются в гл. 15, причем сделана попытка показать, как дислокационные представления были применены к этой исключительно острой практической проблеме.