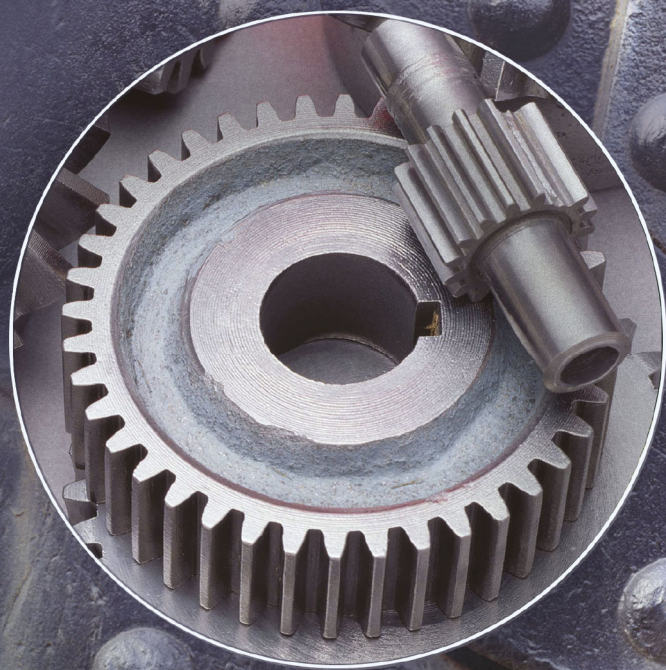


УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

Г.Г. Бондаренко, Т.А. Кабанова,  
В.В. Рыбалко

# ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ



УДК 620.22  
ББК 30.3я7  
Б81

*Серия основана в 2009 г.*

Рецензенты:

заместитель заведующего кафедрой вакуумной электроники  
Московского физико-технического института  
(государственного университета)  
доктор ф.-м. наук, профессор Е. П. Шешин  
заведующий кафедрой техники и электрофизики высоких  
напряжений Томского политехнического университета  
доктор ф.-м. наук, профессор В. В. Лопатин

**Бондаренко Г. Г.**

Б81 Основы материаловедения : учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко ; под ред. Г. Г. Бондаренко. — 4-е изд., испр., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2023. — 763 с. — (Учебник для высшей школы). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-93208-667-4

Настоящий учебник является одним из наиболее полных современных учебных изданий по материаловедению. В нем систематизированы фундаментальные сведения о строении и физико-химических свойствах, фазовых превращениях и физических процессах широкого спектра материалов, в том числе наноструктурированных, рассмотрены методы исследования их структуры и свойств. Широко проиллюстрированы возможности применения наноструктур для решения разнообразных технических задач. Приведенные в приложении к учебнику тестовые задания с вариативными ответами предназначены для промежуточного и итогового контроля, повышения эффективности усвоения изучаемого материала.

Для студентов и аспирантов, специализирующихся в области физики конденсированных сред и материаловедения, а также специалистов различных областей техники и технологий.

УДК 620.22  
ББК 30.3я7

**Деривативное издание на основе печатного аналога:** Основы материаловедения : учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко ; под ред. Г. Г. Бондаренко. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. — 760 с. : ил. — (Учебник для высшей школы). — ISBN 978-5-9963-0639-8.

**В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации**

ISBN 978-5-93208-667-4

© Лаборатория знаний, 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

<b>Введение</b> . . . . .	9
<b>Глава 1. Управление качеством промышленной продукции и материалы технического назначения</b> . . . . .	11
1.1. Показатели качества . . . . .	13
1.2. Управление качеством и жизненный цикл продукции . . . . .	16
1.3. Нормативно-правовая база управления качеством . . . . .	20
<b>Глава 2. Атомно-кристаллическое строение материалов</b> . . . . .	23
2.1. Типы химических связей . . . . .	23
2.2. Аморфные и кристаллические тела . . . . .	25
2.3. Типы кристаллических решеток . . . . .	26
2.4. Индексы Миллера . . . . .	30
2.5. Индексы Миллера–Бравэ . . . . .	32
2.6. Анизотропия свойств кристаллов . . . . .	34
2.7. Кристаллизация . . . . .	34
2.8. Классификация дефектов кристаллического строения материалов . . . . .	36
2.9. Точечные дефекты . . . . .	36
2.10. Дислокации . . . . .	42
2.10.1. Краевая дислокация . . . . .	43
2.10.2. Винтовая дислокация . . . . .	44
2.10.3. Вектор Бюргерса и его свойства . . . . .	46
2.10.4. Смешанные дислокации . . . . .	47
2.10.5. Движение дислокаций . . . . .	48
2.10.6. Плотность дислокаций . . . . .	52
2.10.7. Энергия дислокации . . . . .	55
2.10.8. Сила, действующая на дислокацию . . . . .	55
2.10.9. Образование и размножение дислокаций . . . . .	56
2.11. Двумерные (поверхностные) дефекты кристаллов . . . . .	60
2.11.1. Границы зерен и субзерен . . . . .	60
2.11.2. Дефекты упаковки . . . . .	63
2.12. Частичные дислокации . . . . .	66
2.13. Призматические и сидячие дислокационные петли . . . . .	68
2.14. Дислокация (барьер) Ломер–Коттрелла . . . . .	71
2.15. Взаимодействие дислокаций с точечными дефектами . . . . .	72
2.16. Объемные (трехмерные) дефекты . . . . .	77
2.17. Энергетические дефекты . . . . .	77
2.18. Особенности дефектов кристаллической структуры в неметаллических материалах . . . . .	78
2.19. Собственные точечные дефекты в ионных кристаллах . . . . .	79
2.20. Центры окраски . . . . .	81
2.20.1. Электронные центры окраски . . . . .	81
2.20.2. Дырочные центры окраски . . . . .	82
2.21. Экситоны . . . . .	83

2.22. Дислокации в ионных кристаллах. . . . .	85
2.23. Особенности поведения точечных дефектов в полупроводниковых материалах. . . . .	88
2.24. Дислокации в полупроводниковых материалах. . . . .	91
<b>Глава 3. Элементы теории сплавов . . . . .</b>	<b>95</b>
3.1. Химические соединения . . . . .	96
3.2. Твердые растворы . . . . .	97
3.3. Эвтектики . . . . .	98
3.4. Правило фаз. . . . .	99
3.5. Фазовые диаграммы равновесия. . . . .	100
3.5.1. Фазовая диаграмма равновесия эвтектического типа системы двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком состоянии и нерастворимых в твердом. . . . .	101
3.5.2. Правило отрезков . . . . .	106
3.5.3. Фазовая диаграмма равновесия системы двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком и твердом состояниях . . . . .	107
3.5.4. Фазовая диаграмма равновесия эвтектического типа системы двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком состоянии и ограниченно растворимых в твердом . . . . .	109
3.5.5. Фазовая диаграмма равновесия перитектического типа системы двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком состоянии и ограниченно растворимых в твердом . . . . .	112
3.5.6. Фазовые диаграммы равновесия систем двух компонентов, неограниченно взаимно растворимых в жидком состоянии и образующих химическое соединение. . . . .	114
3.5.7. Фазовые диаграммы равновесия систем двух компонентов, претерпевающих полиморфные превращения . . . . .	116
3.6. Влияние пластической деформации на структуру и свойства металлов и сплавов . . . . .	118
3.7. Влияние нагрева на структуру и свойства деформированных металлов и сплавов . . . . .	120
3.7.1. Возврат металлов и сплавов . . . . .	121
3.7.2. Рекристаллизация металлов и сплавов . . . . .	122
3.8. Термическая обработка металлов и сплавов . . . . .	125
3.8.1. Виды термической обработки . . . . .	125
3.8.2. Отжиг первого рода . . . . .	126
3.8.3. Отжиг второго рода . . . . .	128
3.8.4. Закалка. . . . .	129
3.8.5. Отпуск и старение . . . . .	130
3.8.6. Параметры термообработки . . . . .	132
3.8.7. Термообработка и фазовые диаграммы. . . . .	133
3.9. Химико-термическая и термомеханическая обработка металлов и сплавов . . . . .	134
3.10. Применение термической, химико-термической и термомеханической обработки металлов и сплавов . . . . .	135
<b>Глава 4. Электрические свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>138</b>
4.1. Электрические свойства металлических материалов. . . . .	141
4.2. Электрические свойства тонких металлических пленок. . . . .	145
4.3. Контактная разность потенциалов и термо-ЭДС . . . . .	147

4.4. Электрические свойства полупроводников . . . . .	147
4.4.1. Электропроводность полупроводников . . . . .	152
4.4.2. Электронно-дырочный переход ( $p-n$ -переход) . . . . .	154
4.5. Электрические свойства диэлектриков . . . . .	156
<b>Глава 5. Магнитные свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>159</b>
5.1. Характеристики магнитных свойств . . . . .	159
5.2. Классификация материалов по магнитным свойствам. . . . .	161
5.3. Доменная структура ферромагнетиков . . . . .	163
5.4. Магнитная анизотропия . . . . .	164
5.5. Намагничивание и перемангничивание. Петля гистерезиса . . . . .	165
5.6. Магнитные свойства в переменных полях . . . . .	169
5.7. Зависимость магнитных свойств от температуры . . . . .	170
<b>Глава 6. Тепловые свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>172</b>
<b>Глава 7. Диэлектрические свойства материалов . . . . .</b>	<b>176</b>
7.1. Поляризация диэлектриков . . . . .	176
7.1.1. Характеристики поляризации . . . . .	178
7.1.2. Классификация диэлектриков . . . . .	181
7.1.3. Поляризация диэлектриков в электрическом поле . . . . .	182
7.1.4. Поляризация диэлектриков при отсутствии электрического поля. Спонтанная (самопроизвольная) поляризация . . . . .	188
7.1.5. Зависимость диэлектрической проницаемости от различных факторов. . . . .	189
7.2. Диэлектрические потери . . . . .	190
7.2.1. Характеристики диэлектрических потерь . . . . .	191
7.2.2. Виды диэлектрических потерь . . . . .	194
7.3. Электрическая прочность твердых диэлектриков. . . . .	199
7.3.1. Виды пробоя в твердых диэлектриках . . . . .	199
7.3.2. Электрический пробой . . . . .	200
7.3.3. Тепловой (электротепловой) пробой . . . . .	201
7.3.4. Другие виды пробоя . . . . .	202
7.3.5. Влияние различных факторов на электрическую прочность. . . . .	202
<b>Глава 8. Механические и технологические свойства твердых тел . . . . .</b>	<b>206</b>
8.1. Механические свойства . . . . .	206
8.1.1. Общие понятия и механические характеристики . . . . .	206
8.1.2. Упругая деформация. Модули упругости . . . . .	211
8.1.3. Неупругие явления. . . . .	214
8.1.4. Эффект Баушингера . . . . .	224
8.1.5. Пластическая деформация материалов. . . . .	226
8.1.6. Деформационное упрочнение . . . . .	232
8.1.7. Деформационное старение . . . . .	238
8.1.8. Упрочнение сплавов частицами второй фазы . . . . .	239
8.1.9. Особенности пластической деформации поликристаллических материалов . . . . .	240
8.1.10. Теоретическая и реальная прочность материалов. . . . .	243
8.1.11. Разрушение . . . . .	244
8.1.12. Ползучесть . . . . .	256
8.1.13. Сверхпластичность . . . . .	262

8.1.14. Усталость . . . . .	264
8.1.15. Изнашивание . . . . .	273
8.1.16. Твердость . . . . .	275
8.1.17. Прочность и пластичность неметаллических материалов . . . . .	276
8.2. Технологические свойства . . . . .	277
<b>Глава 9. Проводниковые и резистивные материалы . . . . .</b>	<b>281</b>
9.1. Материалы высокой проводимости . . . . .	281
9.2. Материалы низкой проводимости (высокоомные, или резистивные). . . . .	283
9.3. Металлические проводниковые и резистивные материалы для электроники . . . . .	285
9.4. Сверхпроводящие материалы . . . . .	287
<b>Глава 10. Полупроводниковые материалы . . . . .</b>	<b>292</b>
10.1. Тенденции развития полупроводниковой микроэлектроники . . . . .	292
10.2. Общие сведения о технологии полупроводников . . . . .	296
10.3. Методы получения монокристаллов полупроводниковых материалов . . . . .	298
10.3.1. Коэффициент сегрегации . . . . .	300
10.3.2. Методы направленной кристаллизации . . . . .	300
10.3.3. Методы зонной кристаллизации . . . . .	302
10.3.4. Методы кристаллизации из раствора и газовой фазы . . . . .	304
10.4. Методы эпитаксиального наращивания полупроводниковых пленок . . . . .	305
10.4.1. Жидкофазная эпитаксия . . . . .	306
10.4.2. Газофазная эпитаксия . . . . .	306
10.4.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия . . . . .	307
10.4.4. Контроль качества эпитаксиальных слоев . . . . .	308
10.5. Планарная технология . . . . .	308
10.5.1. Процессы получения тонких пленок . . . . .	309
10.5.2. Процессы травления . . . . .	310
10.5.3. Процессы легирования . . . . .	311
10.5.4. Литографические процессы . . . . .	314
10.6. Основные группы полупроводниковых материалов . . . . .	316
10.7. Элементарные полупроводники . . . . .	316
10.7.1. Элементарные полупроводники IV группы Периодической системы. Германий, кремний . . . . .	318
10.7.2. Элементарные полупроводники других групп . . . . .	325
10.8. Полупроводниковые соединения . . . . .	327
10.8.1. Полупроводниковые соединения типа $A^3B^5$ . . . . .	328
10.8.2. Полупроводниковые соединения типа $A^2B^6$ . . . . .	333
10.8.3. Другие полупроводниковые соединения . . . . .	335
10.9. Органические полупроводники . . . . .	336
<b>Глава 11. Диэлектрические материалы . . . . .</b>	<b>340</b>
11.1. Эксплуатационные свойства диэлектриков . . . . .	340
11.2. Классификация диэлектриков . . . . .	342
11.3. Твердые органические электроизоляционные и конденсаторные материалы . . . . .	344
11.3.1. Пластмассы. . . . .	344
11.3.2. Полимеры. . . . .	345
11.3.3. Эластомеры. . . . .	362
11.3.4. Электроизоляционные лаки, эмали, компаунды . . . . .	367
11.4. Твердые неорганические электроизоляционные и конденсаторные материалы . . . . .	369
11.4.1. Электроизоляционные стекла . . . . .	369

11.4.2. Ситаллы (стеклокерамика) . . . . .	373
11.4.3. Электротехническая керамика . . . . .	376
11.4.4. Материалы подложек интегральных микросхем . . . . .	382
11.5. Активные (нелинейные) диэлектрики . . . . .	382
11.5.1. Материалы твердотельных лазеров . . . . .	383
11.5.2. Сегнетоэлектрики . . . . .	384
11.5.3. Пьезоэлектрики . . . . .	386
11.5.4. Электреты. . . . .	388
11.5.5. Жидкокристаллические материалы . . . . .	390
<b>Глава 12. Магнитные материалы . . . . .</b>	<b>395</b>
12.1. Классификация магнитных материалов . . . . .	395
12.2. Металлические магнитно-мягкие материалы . . . . .	400
12.3. Магнитно-мягкие ферриты. . . . .	402
12.4. Металлические магнитно-твердые материалы. . . . .	403
12.5. Магнитно-твердые ферриты . . . . .	405
12.6. Металлопорошковые материалы. . . . .	405
12.7. Магнитодиэлектрики . . . . .	406
12.8. Материалы для магнитных носителей информации . . . . .	406
12.9. Нанокристаллические магнитные материалы . . . . .	411
<b>Глава 13. Конструкционные материалы . . . . .</b>	<b>414</b>
13.1. Сплавы системы «железо—углерод». . . . .	415
13.1.1. Общая характеристика . . . . .	422
13.1.2. Углеродистые стали . . . . .	423
13.1.3. Термическая обработка стали . . . . .	426
13.1.4. Сверхупругость и эффект памяти формы . . . . .	440
13.1.5. Химико-термическая обработка стали . . . . .	444
13.1.6. Холодная пластическая деформация . . . . .	445
13.1.7. Чугуны . . . . .	446
13.1.8. Легированные стали. . . . .	448
13.2. Цветные металлы и сплавы . . . . .	451
13.2.1. Медь и сплавы на ее основе . . . . .	452
13.2.2. Алюминий и сплавы на его основе . . . . .	460
13.2.3. Магний и сплавы на его основе . . . . .	472
13.2.4. Титан и сплавы на его основе . . . . .	475
13.2.5. Бериллий и сплавы на его основе . . . . .	479
13.2.6. Припои . . . . .	481
13.3. Специальные конструкционные металлические материалы . . . . .	483
13.3.1. Коррозионностойкие стали и сплавы . . . . .	484
13.3.2. Жаропрочные стали и сплавы . . . . .	500
13.3.3. Жаростойкие стали и сплавы . . . . .	505
13.4. Неметаллические конструкционные материалы . . . . .	509
13.5. Композиционные конструкционные материалы . . . . .	512
13.5.1. Неорганические композиционные материалы . . . . .	513
13.5.2. Пластики . . . . .	515
<b>Глава 14. Нанообъекты и наноструктурированные материалы . . . . .</b>	<b>526</b>
14.1. Терминология и исходные понятия . . . . .	527
14.2. Строение и свойства нанообъектов . . . . .	534
14.2.1. Графит . . . . .	534
14.2.2. Алмаз . . . . .	535
14.2.3. Карбин . . . . .	535

14.2.4. Графен . . . . .	536
14.2.5. Фуллерены и фуллереноподобные нанобъекты . . . . .	543
14.2.6. Нанотрубки и родственные нанобъекты . . . . .	558
14.2.7. Астралены . . . . .	594
14.2.8. Квантовые нанобъекты . . . . .	595
14.3. Методы получения нанобъектов и наноструктурированных материалов . . . . .	602
14.3.1. Плазменный метод . . . . .	603
14.3.2. Метод лазерной абляции . . . . .	608
14.3.3. Метод каталитического разложения углеводов . . . . .	610
14.3.4. Другие методы получения нанобъектов . . . . .	612
14.4. Механизмы образования нанобъектов . . . . .	618
14.5. Примеры практического применения и перспективы использования нанобъектов и наноструктурированных материалов . . . . .	621
14.5.1. Использование наноматериалов в машиностроении . . . . .	622
14.5.2. Использование наноматериалов в электронике . . . . .	626
14.5.3. Применение наноматериалов в энергетике и на транспорте . . . . .	633
14.5.4. Применение наноматериалов в приборостроении . . . . .	639
14.5.5. Использование наноматериалов в химической отрасли . . . . .	644
14.5.6. Применение наноматериалов в строительной индустрии . . . . .	644
14.5.7. Использование наноматериалов в медицине . . . . .	647
14.5.8. Применение наноматериалов в других отраслях промышленности и в быту . . . . .	649
<b>Глава 15. Методы анализа материалов . . . . .</b>	<b>656</b>
15.1. Электронно-лучевые методы . . . . .	656
15.1.1. Просвечивающая электронная микроскопия . . . . .	658
15.1.2. Растровая электронная микроскопия . . . . .	666
15.1.3. Электронная оже-спектроскопия . . . . .	676
15.1.4. Рентгеновский микроанализ . . . . .	680
15.1.5. Автоионная проекционная микроскопия . . . . .	686
15.2. Сканирующие зондовые методы исследования . . . . .	688
15.2.1. Сканирующая туннельная микроскопия . . . . .	689
15.2.2. Атомно-силовая микроскопия . . . . .	694
15.2.3. Магнитосиловая зондовая микроскопия . . . . .	696
15.3. Квантовые методы . . . . .	696
15.3.1. Микроскопия ближнего поля . . . . .	696
15.3.2. Конфокальная микроскопия . . . . .	701
15.3.3. Фотолуминесцентный анализ . . . . .	704
15.3.4. Рентгеноструктурный анализ . . . . .	708
15.3.5. Метод комбинационного рассеяния . . . . .	713
15.4. Ионно-лучевые методы . . . . .	715
15.4.1. Спектроскопия обратного рассеяния Резерфорда . . . . .	716
15.4.2. Ионный микроанализ и ионная масс-спектрометрия . . . . .	720
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>727</b>
<b>Приложение . . . . .</b>	<b>729</b>
Тестовые задания . . . . .	729
<b>Ответы к тестовым заданиям . . . . .</b>	<b>746</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>748</b>



# УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПРОДУКЦИИ И МАТЕРИАЛЫ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

---

---

Одним из основных принципов управления качеством является выбор стратегии принятия решений на основе фактического материала. Для того чтобы принять правильное решение, проводят анализ ситуации, в результате чего:

- устанавливают *причину*, которая выходит за заданные рамки допусков параметра диагностируемого продукта (процесса или изделия), т. е. причину возникновения несоответствия;
- вносят *изменения* в процессы, связанные с корректировкой параметров продукта (разрабатывают и реализуют корректирующие действия, устраняющие причину возникшего несоответствия).

Основная группа факторов, влияющих на принятие решения, приведена на рис. 1.1 в виде классической укрупненной диаграммы Исикавы (ее также называют «скелетом рыбы» — Fishbone Diagram). Диаграмма позволяет наглядно представить в графическом виде связь несоответствия с причинами, влияющими на его возникновение. На диаграмму Исикавы наносят основные «кости» (категории), которые имеют отношение к рассматриваемой проблеме. Для каждой категории строят дополнительные «кости», представляющие собой отдельные причины, а у тех, в свою очередь, добавляются свои подпричины. Продолжая детализацию, получим разветвленное дерево (скелет), связывающее причины возникновения несоответствия, находящиеся на разном уровне детализации.

Уже в укрупненной диаграмме присутствует в качестве одного из основных факторов, принимаемых во внимание при управлении качеством, категория «материалы». Однако если продолжить детализацию анализа причин, то для реального производства среди подпричин, относящихся к прочим основным причинам (оборудование, технология, измерения, человек), обнаруживается влияние свойств материалов. На рисунке 1.2 приведена часть диаграммы, построенной для технологического процесса монтажа системы управления сборочным конвейером.

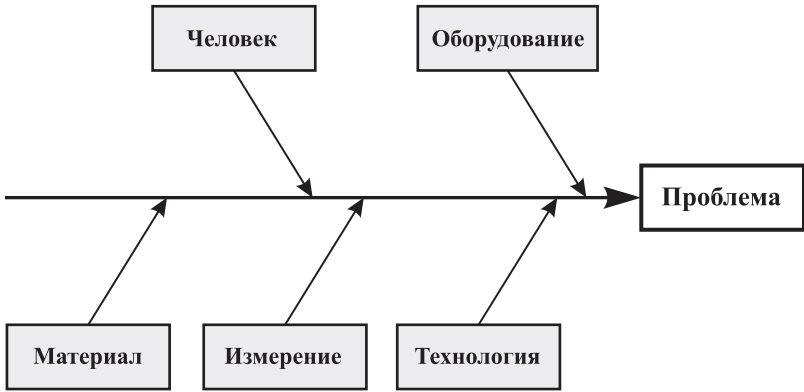


Рис. 1.1. Исходная диаграмма Исикавы

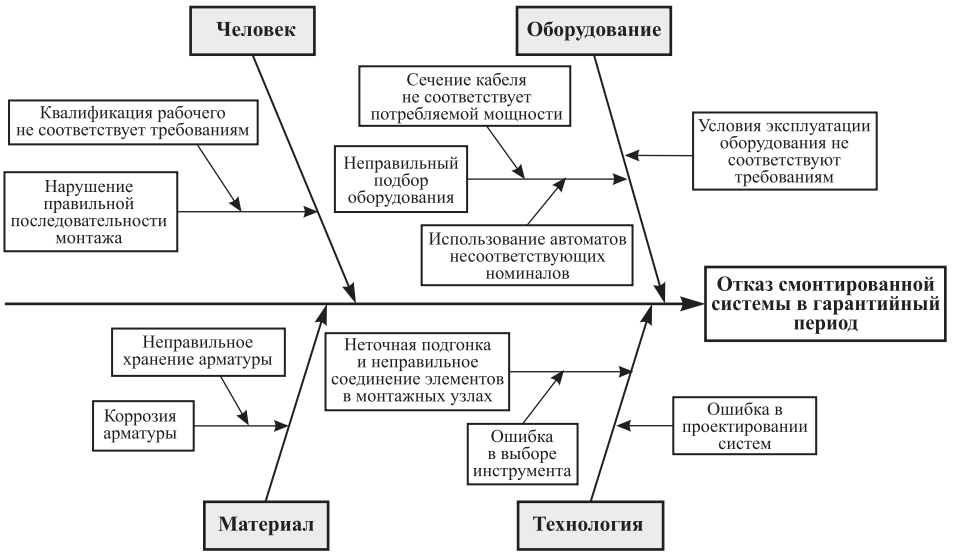


Рис. 1.2. Фрагмент диаграммы, построенной для технологического процесса монтажа системы управления сборочным конвейером

Рассмотрим некоторые подпричины.

*Нарушение правил последовательности монтажа* может быть вызвано несколькими причинами, в том числе разрушением маркировочных знаков, что вносит путаницу в сборку. Первопричиной здесь является низкая стойкость материалов, использованных при изготовлении маркеров, к воздействиям технологической среды (кислоты, щелочь, вода, трение и т. п.).

*Неточная подгонка и неправильное соединение элементов в монтажных узлах* возникают вследствие отклонения от заданных параметров как материала, из которого выполнены коммутационные элементы монтажных узлов, так и материала, из которого изготовлен инструмент и оснастка.

Даже в первопричинах «человеческого фактора» могут лежать свойства материалов. Рассеяние внимания работника (приводящее к снижению качества продукции) возможно, например, из-за раздражения, связанного с качеством ткани спецодежды, фактурой поверхности ручного инструмента и т. д. Ряд примеров, показывающих, насколько многосторонним является влияние свойств материалов на качество продукции, можно продолжить. Таким образом, эффективное управление качеством в производстве невозможно без учета (а следовательно, и знания) свойств используемых материалов.

### 1.1. Показатели качества

Под *качеством* подразумевается совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Основные факторы, оказывающие влияние на качество продукции, приведены на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Факторы, оказывающие влияние на качество продукции

Качество продукции может быть оценено с помощью набора характеристик свойств продукции, которые называются показателями качества.

**Показатель технического эффекта** или назначения позволяет оценить полезный эффект от применения продукции по назначению. Например, концентрация (плотность) дислокаций в кремниевом монокристалле,

предназначенном для производства больших интегральных схем или твердость и износостойкость сплава для производства пар трения.

**Показатели надежности** характеризуют способность изделия (в частности, материала как изделия) сохранять заданные свойства в течение определенного срока при наличии оговоренных внешних воздействий.

В число показателей надежности входят безотказность (вероятность возникновения отказа при определенных условиях), время наработки на отказ, сохранность, ресурс или срок службы. Применительно к материалам сюда же относят предел временной усталости, температуростойкость и другие показатели, рассмотренные в последующих главах.

**Показатели экономического использования** позволяют оценить затраты материальных ресурсов, связанные с изготовлением продукции и ее последующим применением.

Если речь идет о материалах, то экономические показатели включают в себя также оценку экономической эффективности замены ранее использованных материалов на новые, обладающие улучшенными свойствами.

Например, пластики с повышенной текучестью в рабочем диапазоне температур дают возможность использовать более простые по конструкции, а значит, и менее дорогие пресс-формы. Замена быстрорежущей стали на более прочную и износостойкую металлокерамику позволяет выпускать режущий инструмент, имеющий больший ресурс работы. В результате сокращаются материальные и временные затраты на переналадку станков и периодическую замену инструмента.

**Эргономические показатели** дают возможность оценить качество продукции с точки зрения приспособленности ее к применению (эксплуатации) человеком. Обычно данные показатели носят характер экспертной оценки.

**Экологические показатели** характеризуют уровень вредных воздействий на природу при использовании промышленной продукции.

**Показатели безопасности** позволяют оценить безопасность персонала, использующего или обслуживающего изделие. Для материалов это в первую очередь их токсичность.

**Гигиенические показатели.** К ним относятся уровень шума, вибрации, излучения, запыленность и др. Очевидно, что эти параметры, характеризующие устройства, определяются также и свойствами материалов, из которых данные устройства изготовлены.

Кроме перечисленных основных используют также антропометрические и физиологические показатели, но они относятся в большей степени к конструкции изделий, а не к материалам, из которых они выполнены.

В частных случаях могут применяться *дополнительные показатели качества*, а именно:

- технологичность;
- наукоемкость;
- патентная чистота;
- патентоспособность и др.

Качество любой промышленной продукции, исключая программное обеспечение объекты интеллектуальной собственности, в значительной

степени зависит от свойств примененных в ней материалов. Это обусловлено тем, что требования к качеству материалов и связанных с ними технологий лежат в основании логической последовательности процесса развития техники (рис. 1.4).



**Рис. 1.4.** Логическое развитие объектов техники

Применительно к материалам система управления качеством направлена в первую очередь на обеспечение воспроизводимости заданной для данного материала группы свойств и максимально возможного улучшения показателей этого материала, а также технологических процессов, с ним связанных. Причем разнообразие промышленно применимых материалов и их основных технологических и потребительских свойств огромно.

Не затрагивая экономические показатели, рассмотрим следующий пример. При производстве полупроводниковых кристаллов не контролируются механические свойства готовой продукции. В то же время выпускающий завод должен обеспечить заданный уровень таких характеристик, как плотность дислокаций в монокристалле, время жизни неравновесных носителей заряда, тип проводимости и ее величина, допустимые уровни концентраций примесей, перечень этих примесей, и др.

Напротив, при производстве бериллиевых бронз, предназначенных для изготовления упругих элементов в контакторах, система мероприятий по управлению качеством продукции должна обеспечить прежде всего заданные значения механических свойств выпускаемых сплавов (пределы упругости и прочности, твердость и др.), величины электро- и теплопроводности.

## 1.2. Управление качеством и жизненный цикл продукции

*Система управления качеством* представляет собой совокупность технических и организационных мер, реализуемых на всех стадиях жизни промышленной продукции — от изучения рынка (маркетинговых исследований) и формулирования технического задания на разработку изделия до утилизации и переработки продукции в конце срока ее службы (см. рис. 1.3).

На рисунке 1.5 изображена замкнутая цепь, состоящая из звеньев (этапов) жизненного цикла промышленной продукции.

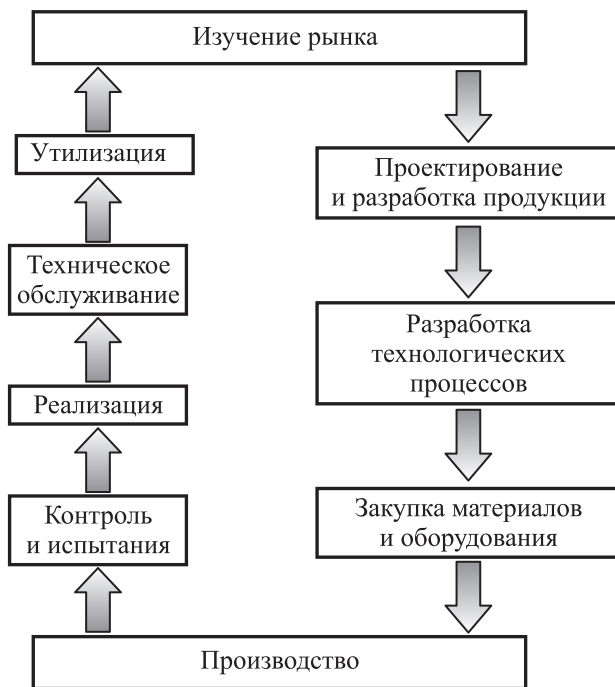


Рис. 1.5. Этапы жизненного цикла промышленной продукции

**Предпроизводственная стадия.** К ней относятся первые четыре этапа, отмеченные на рис. 1.5. На этой стадии исследуют *потребности рынка* и возможности предприятия по их удовлетворению. На основании исследований вырабатывают требования к перспективной конкурентоспособной продукции, реализация которой могла бы удовлетворить имеющийся

спрос. Данные требования излагают в Техническом задании на *разработку* нового изделия (продукции).

Параллельно с процессом разработки осуществляют *выбор материалов*, свойства которых позволяют реализовать проектируемые параметры перспективного изделия. Основываясь на результатах разработки и учитывая конструктивные и иные особенности опытного образца, отрабатывают *технологию производства*, включая создание системы контроля качества используемых материалов, комплектующих изделий и готовой продукции.

**Производственная стадия.** Вторая стадия жизненного цикла продукции. К ней относится собственно производство, контроль качества и реализация изделий.

Из теории построения систем управления известно, что они призваны решать следующие задачи:

- стабилизация,
- выполнение программы,
- слежение,
- оптимизация.

Система управления качеством на этапе производства (изготовления) продукции решает в первую очередь задачу стабилизации. Эта задача в данном случае заключается в обеспечении соответствия показателей качества продукции тем требованиям, которые были сформулированы в документации на нее (в техническом задании — ТЗ, технических условиях — ТУ, конструкторско-технологической документации — КТД и т. д.). Гарантией соблюдения указанных требований является *контроль качества* выполнения отдельных технологических операций и *параметров* готовой продукции.

Для контроля качества и приемки изделий предусмотрены следующие *категории контрольных испытаний*:

- приемо-сдаточные,
- периодические,
- типовые,
- сертификационные.

Все типы испытаний, предусмотренных для данной продукции, и их параметры (периодичность, полнота, метрологические характеристики и др.) должны быть изложены в ТУ на продукцию.

Приемо-сдаточные испытания предназначены для контроля изготовленной партии изделий на соответствие требованиям ТУ.

Изделия, у которых при приемо-сдаточных испытаниях проверяют не все эксплуатационные параметры, подвергаются в процессе хранения и эксплуатации периодическим испытаниям.

Цикличность (раз в месяц, раз в квартал или иное) и объем периодических испытаний (размер выборки из партии и перечень контролируемых параметров) должны быть указаны в ТУ.

Типовые испытания проводят в том случае, если в выпускаемую продукцию планируется ввести конструктивные или технологические изменения. Таким испытаниям подвергают образцы продукции, имеющие указанные

изменения. Целью типовых испытаний является выяснение допустимости вводимых в изделие или технологию его производства изменений.

Сертификационные испытания необходимы для установления соответствия испытываемых изделий требованиям государственных стандартов и ТУ на данные изделия.

Все вышеперечисленные испытания, кроме сертификационных, проводит отдел технического контроля (ОТК). Он является, как правило, самостоятельным структурным подразделением промышленного предприятия.

Сертификационные испытания проводит уполномоченный государством орган по сертификации (испытательный центр). По результатам испытаний он выдает сертификаты и лицензию на применение знаков соответствия. В дальнейшем сертифицированный продукт подвергается периодическим испытаниям, и в случае, если очередная проверка выявила отклонения качества продукции от параметров, по которым проводилась сертификация, орган по сертификации приостанавливает или отменяет действие выданных им сертификатов.

**Стадия эксплуатации (потребления).** Управление качеством на этой стадии сводится к максимально возможному использованию потребительских свойств промышленной продукции в соответствии с ее назначением и областью применения. Такие свойства (применительно к промышленным материалам) могут полностью или частично утрачиваться под действием субъективных и объективных обстоятельств.

К объективным обстоятельствам относится деградация характеристик материалов под влиянием внешних воздействий (коррозия металлов в агрессивных средах, деструкция полимеров под действием света, снижение прочностных характеристик в результате длительного и/или циклического механического воздействия, изменение структуры материала, инициированное повышением температуры, снижение электрической прочности электроизоляционных материалов во влажной среде и т. д.).

К субъективным обстоятельствам относится нарушение правил применения (например, технологии обработки) и хранения.

Утрата одного или нескольких свойств продукции (в частности, деградация характеристик материалов) может привести к отказу изделия, т. е. невозможности выполнения своих функций. Следовательно, на стадии эксплуатации особое внимание в системе управления качеством нужно уделять надежности продукции.

*Надежность* на стадии эксплуатации поддерживается в основном за счет рациональной организации системы хранения, технического обслуживания и ремонта, т. е.:

- организации условий хранения (контроль уровня влажности, освещенности, температуры, типа и состояния упаковки);
- соблюдения технологической дисциплины (последовательности выполнения технологических операций и их режимов) при изготовлении из материалов деталей и узлов;
- организации технического обслуживания и соблюдения условий использования материалов в составе изделий (смазка рабочих поверх-



ностей в парах трения, антикоррозионная защита поверхностей металлических деталей и т. д.).

В процессе эксплуатации изделие последовательно проходит три состояния:

- работоспособное (вероятность выхода из строя близка к нулю);
- предотказное (вероятность отказа резко повышается);
- неработоспособное.

Очевидно, что длительность пребывания изделия в первых двух состояниях (в сумме они составляют срок службы) и соотношение их продолжительностей зависит:

- от надежности изделия (закладывается на этапе проектирования и реализуется на этапе изготовления);
- специфики применения (назначение изделия и внешние условия эксплуатации);
- стратегии обслуживания (перечень работ по техническому обслуживанию и ремонту изделия и совокупность правил проведения этих работ).

*Стратегия обслуживания* зависит от заложенной на стадии проектирования надежности изделия, а также от специфических особенностей изделия и условий его применения.

Применительно к эксплуатации материалов примером ремонтпригодного изделия может служить стальной кузов автомобиля. Изделие эксплуатируется в течение периода  $T_1$ . Далее выполняют профилактический ремонт кузова, т. е. снимают старое антикоррозионное покрытие, удаляют металл в образовавшихся очагах коррозии, вновь проводят антикоррозионную обработку. После этого изделие в очередной раз запускают в эксплуатацию. Процедуру обслуживания повторяют с заданной цикличностью в течение всего срока службы изделия. Последний может ограничиваться суммарным коррозионным разрушением, накапливающимся в процессе эксплуатации кузова.

В том случае, если изделие не является ремонтпригодным, стратегия обслуживания, например микросхемы в составе радиоэлектронного узла, сводится к контролю и управлению режимом эксплуатации (предотвращение подачи на контакты микросхемы вольтовых и токовых сигналов, амплитуды и/или длительности которых превышают допустимый предел, контроль и управление температурным режимом работы).

Следует обратить внимание на то, что факт нахождения изделия в работоспособном, а не в предотказном состоянии, не всегда очевиден для большинства случаев. Поэтому для таких изделий стратегия обслуживания в ряде случаев предусматривает разработку процедуры, определяющей работоспособность, а также выбор критерия (или набора критериев) для количественной оценки работоспособности.

Важность сбалансированной стратегии обслуживания таких изделий определяется как экономическими, так и техническими факторами, в том числе факторами, связанными с безопасностью эксплуатации изделий.

Действительно, если проверку работоспособности производить слишком часто, то значительная доля времени будет занята простоями,

связанными с выполнением проверок. Такая ситуация снижает производительность изделия и оборудования, в состав которого это изделие входит в качестве комплектующего и, как результат, ухудшает экономические показатели его применения. В то же время необоснованно редкие проверки работоспособности приводят к двум негативным последствиям:

- вероятность отказов оборудования возрастает, а следовательно, снижается его экономическая эффективность из-за значительных временных и материальных затрат на проведение ремонтных работ и устранение последствий, вызванных отказом изделия;
- непрогнозируемый отказ оборудования представляет опасность для здоровья или жизни людей, а также окружающей среды.

В общем случае задачу оптимизации обслуживания продукции, требующей периодического испытания ее работоспособности, решают следующим образом:

- разрабатывают показатели оценки эффективности использования оборудования;
- используя разработанные показатели, оценивают и выбирают оптимальный перечень испытаний работоспособности изделий и объем выборки для испытаний;
- исходя из перечня испытаний и выборки устанавливают оптимальную периодичность проведения испытаний.

### 1.3. Нормативно-правовая база управления качеством

Основные понятия и положения в области управления и обеспечения качества продукции, применяемые в международной и отечественной практике, изложены в документах ИСО, МЭК и Госстандарта РФ.

ИСО (International Organization for Standardization) действует с 1947 г., в ее состав входят организации из 130 стран, в том числе из России. ИСО создана для содействия глобальной стандартизации и разрабатывает международные стандарты практически для всех отраслей промышленности, кроме тех, что относятся к компетенции МЭК.

МЭК — Международная электротехническая комиссия, основана в 1906 г. Она призвана содействовать международному сотрудничеству в вопросах стандартизации и смежных проблемах в области электротехники, радиоэлектроники и связи. С момента образования ИСО МЭК является ее самостоятельным филиалом.

Официальные языки ИСО и МЭК — английский, французский и русский.

Начиная с 2000 г. семейство стандартов ИСО основывается на следующих четырех базовых стандартах:

- ИСО 9000. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
- ИСО 9001. Системы менеджмента качества. Требования.

- ИСО 9004. Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению деятельности.
- ИСО 19011. Руководящие указания по проверке систем менеджмента качества и охраны окружающей среды.

Стандарт ИСО 9000 заменил более ранние нормативные документы ИСО 8402–94 и ИСО 9000-1–94.

Стандарт ИСО 9001 объединил в себе ранее действовавшие ИСО 9001, ИСО 9002 и ИСО 9003.

В России стандарты ИСО вводятся так называемым методом обложки. То есть делается их аутентичный перевод, они утверждаются под соответствующими названиями и регистрируются по действующим в стране правилам.

Для согласования и систематизации действия всех участников разработки, производства и использования продукции в Российской Федерации утверждены пять классификаторов:

- Общероссийский классификатор предприятий и организаций (ОКПО);
- Общероссийский классификатор продукции (ОКП);
- Общероссийский классификатор услуг населению (ОКУН);
- Международный классификатор «Товарная номенклатура внешней экономической деятельности» (ТН ВЭД);
- Международный классификатор стран мира.

Законодательной базой управления качеством в России являются следующие государственные законы:

- закон о защите прав потребителей;
- закон о стандартизации;
- закон об обеспечении единства измерений;
- закон о сертификации продуктов и услуг.

Технической особенностью производства материалов и их дальнейшего промышленного использования является то обстоятельство, что свойства материалов могут кардинальным образом меняться под действием внешних и внутренних факторов (механических нагрузок, теплового и радиационного воздействия и т. д.). Например, два сплава с одинаковым элементарным составом, подвергшиеся разному тепловому воздействию, могут иметь неодинаковую структуру и, как следствие, существенно различающиеся свойства. Поэтому технически грамотное построение системы управления качеством требует не только знаний исходных свойств материалов, но и ясного представления о тех процессах, в результате протекания которых характеристики материалов изменяются. Причем такие изменения возможны на всех этапах жизненного цикла продукции.

### **Контрольные вопросы**

1. Что означает понятие «качество» применительно к промышленной продукции?
2. Перечислите факторы, влияющие на качество.

3. Какие показатели используют для характеристики качества продукции?
4. Из каких этапов складывается жизненный цикл промышленной продукции?
5. На какие категории (типы) подразделяются контрольные испытания продукции?
6. Перечислите основные стандарты ИСО.
7. Какие государственные акты составляют законодательную базу управления качеством в России?
8. Что отражает диаграмма Исикавы?

## АТОМНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

---

---

Жидкости и твердые тела в отличие от газов находятся в конденсированном состоянии. При этом атомы в них располагаются ближе друг к другу, чем в газах, что приводит к более сильному их взаимодействию. В результате этого жидкости и твердые тела имеют постоянный собственный объем (при постоянной температуре и давлении), а твердые тела и постоянную форму.

Атомы в твердых телах удерживаются силами химических связей. К основным типам связей относятся: ковалентная (гомеополярная), ионная (гетерополярная) и металлическая. Они возникают в результате обмена или объединения валентных электронов.

### 2.1. Типы химических связей

**Металлическая связь.** Ее энергия составляет  $\sim(1-4) \cdot 10^5$  Дж/моль. Слабосвязанные валентные электроны в металлах легко покидают свои атомы и свободно перемещаются в пределах кристалла. Таким образом происходит объединение валентных электронов всех атомов в кристалле.

Металлы можно рассматривать как системы, построенные из расположенных в узлах решетки положительных ионов, образующих «остов» кристалла, и отрицательно заряженного электронного газа, состоящего из коллективизированных валентных электронов. Ионы и электроны связаны электростатическими силами. Для металлов характерны высокие значения электро- и теплопроводности, пластичности, прочности.

**Ковалентная связь.** Образуется в результате обобществления (спаривания) валентных электронов соседних атомов. При этом два внешних электрона с противоположными спинами принадлежат одновременно обоим атомам, и каждый из атомов имеет стабильную двух- или восьмиэлектронную конфигурацию внешней электронной оболочки. Ковалентная связь характеризуется четко выраженной направленностью (образуется в направлении наибольшей плотности электронного облака).

Вещества с типично ковалентной связью: алмаз, углерод, элементарные полупроводники кремний, германий и др. Энергия связи весьма значительна  $\sim(0,3-1) \cdot 10^6$  Дж/моль. Для ковалентных кристаллов характерны

высокие значения температуры плавления, твердости, низкая пластичность.

**Ионная связь.** Является результатом электростатического притяжения разноименно заряженных ионов и образуется между атомами элементов с различной электроотрицательностью (электроотрицательность характеризует способность какого-либо атома в молекуле присоединять к себе электроны при образовании химической связи). При достаточном сближении электронные оболочки таких атомов соприкасаются, но взаимного их проникновения не происходит.

Типично ионная связь образуется между элементами I и VII групп (NaCl, CsF и т. д.). В данном случае атом металла отдает валентный электрон и становится положительно заряженным ионом, а атом неметалла его принимает и становится отрицательно заряженным ионом.

При этом они достраивают свои внешние электронные оболочки до устойчивой восьмиэлектронной конфигурации (типа электронной оболочки ближайшего в Периодической системе инертного газа).

Энергия ионной связи сопоставима с ковалентной. Ионные соединения отличаются, как правило, высокой температурой плавления, твердостью, прочностью и низким температурным коэффициентом линейного расширения. Все электроны в ионных кристаллах локализованы на орбиталях отдельных атомов и не могут принимать участие в электропроводности, поэтому ионные кристаллы являются изоляторами.

**Связь Ван-дер-Ваальса.** Наиболее слабая химическая связь, обычно она реализуется между нейтральными атомами и молекулами. Ее энергия почти на два порядка ниже энергий ионной и ковалентной связей. Силы Ван-дер-Ваальса действуют в любых кристаллах независимо от природы взаимодействующих атомов. Они невелики и в случае наличия в кристалле намного более сильного межатомного взаимодействия (металлической, ковалентной или ионной связи) силы Ван-дер-Ваальса существенной роли не играют.

Связь Ван-дер-Ваальса характерна для молекулярных кристаллов (кристаллов инертных газов: аргона, неона, криптона, ксенона, а также Cl<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HCl и др.). При этом в кристаллах инертных газов имеется только связь Ван-дер-Ваальса, в большинстве же молекулярных кристаллов (Cl<sub>2</sub>, I<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HCl и др.) действуют два вида связей — внутримолекулярные и межмолекулярные. Именно более слабые межмолекулярные связи и являются в них связями типа Ван-дер-Ваальса, а внутримолекулярные носят обычно ковалентный характер.

В основе связей типа Ван-дер-Ваальса лежит поляризация молекул, образующих молекулярный кристалл. Она обусловлена взаимным влиянием полей электронов, движущихся вокруг ядер соседних атомов. При образовании связи Ван-дер-Ваальса не происходит ни обобществления, ни обмена электронами, имеет место лишь действие сил притяжения между молекулами или атомами, являющимися малыми диполями.

В свободных атомах «центры тяжести» положительных зарядов (ядер) и отрицательных зарядов (электронов) совпадают, и в них электрический

момент в среднем равен нулю. Однако даже в таких атомах существует флуктуирующий дипольный момент, определяемый мгновенными положениями электронов в атоме. Мгновенное электрическое поле, связанное с этим моментом, будет приводить к возникновению индуцированного дипольного момента в соседних атомах, при этом величина поля, индуцированного диполем, обратно пропорциональна кубу расстояния между ними.

Таким образом, при сближении двух атомов электроны каждого атома смещаются относительно ядра, т. е. в присутствии соседнего атома данный атом превращается в электрический диполь. Этой возникшей поляризацией соседних атомов объясняется взаимное притяжение диполей, при этом энергия системы уменьшается. Тем не менее выигрыш в энергии, обусловленный взаимодействием соседних диполей, невелик, и данной энергии недостаточно для деформирования электронных оболочек. Следовательно, как уже отмечалось, связь является слабой; ее роль существенна лишь в тех случаях, когда более сильные связи не образуются. Силы Ван-дер-Ваальса являются короткодействующими, они быстро убывают с увеличением расстояния между атомами.

## 2.2. Аморфные и кристаллические тела

В зависимости от степени упорядочения атомов твердые тела подразделяют на два класса: кристаллические (рис. 2.1, *а*) и аморфные (рис. 2.1, *б*).

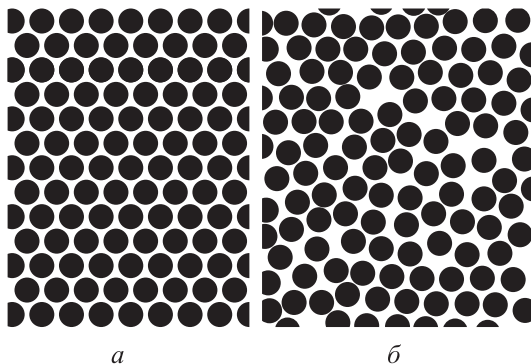


Рис. 2.1. Кристаллические (*а*) и аморфные (*б*) тела

Для *аморфных твердых тел* (см. рис. 2.1, *б*) характерны изотропность свойств и отсутствие определенной температуры плавления. Изотропность свойств аморфных тел проявляется в том, что характеристики их тепло- и электропроводности, прочности, теплового расширения, скорости роста и травления и т. д. не зависят от направления, в котором они измеряются. При повышении температуры аморфные твердые тела размягчаются и постепенно в некотором интервале температур переходят в жидкое состояние.

В аморфных твердых телах отсутствует дальний порядок — строгая периодическая повторяемость атомов в пространстве, однако им при-

сущ ближний порядок, соблюдаемый в пределах первой координационной сферы (составленной всеми соседними атомами, ближайшими к данному), т. е. соблюдающийся лишь на расстояниях 0,5–1,0 нм. Примерами аморфных тел являются стекла, полимезированные пластмассы.

подавляющее большинство твердых тел имеют кристаллическое строение (см. рис. 2.1, а). *Кристаллическим твердым телам* присущ дальний порядок, когда правильное упорядоченное расположение атомов в пространстве распространяется не только на ближайших соседей, но и на соседей, находящихся на более далеком расстоянии, т. е. далеко за пределы первой координационной сферы. При этом атомы твердого тела образуют пространственную кристаллическую решетку.

Кристаллическое состояние твердого тела более стабильно, чем аморфное. Например, при нагреве, длительной выдержке при комнатной температуре, иногда при деформации твердые тела переходят частично или полностью из аморфного состояния в кристаллическое. В отличие от аморфных кристаллические твердые тела сохраняют свою форму при нагреве. Их плавление и переход в жидкое состояние происходит при определенной температуре (температуре плавления).

Для описания кристаллического строения твердых тел пользуются понятием *кристаллической решетки*. Она представляет собой пространственную сетку, в узлах которой располагаются атомы, ионы или молекулы, образующие твердое тело. В идеальной кристаллической решетке атомы расположены в строго определенном геометрическом порядке.

### 2.3. Типы кристаллических решеток

Идеальную кристаллическую решетку можно построить путем многократного повторения с последовательной трансляцией (переносом в пространстве) в трех направлениях кристаллических элементарных ячеек, которые являются первичными звеньями кристаллической решетки.

*Элементарная ячейка* — это наименьший объем кристалла, который еще передает характерные особенности кристаллической решетки. Элементарная кристаллическая ячейка представляет собой элементарный параллелепипед, ребра которого принимают за оси координат кристалла ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), а наименьшие расстояния между узлами кристаллической решетки (стороны элементарного параллелепипеда) вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  обозначаются соответственно  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и называются *параметрами*, или *периодами*, *решетки*. Если кристаллическая решетка кубическая, то ее параметры (периоды) вдоль всех трех осей равны, т. е.  $a = b = c$ . Геометрически возможно существование 14 типов кристаллических решеток.

По расположению атомов в элементарной ячейке кристаллические решетки подразделяют на простые и сложные.

В *простых (примитивных) решетках* атомы располагаются только по вершинам ячейки, т. е. на долю каждой из них приходится один атом.



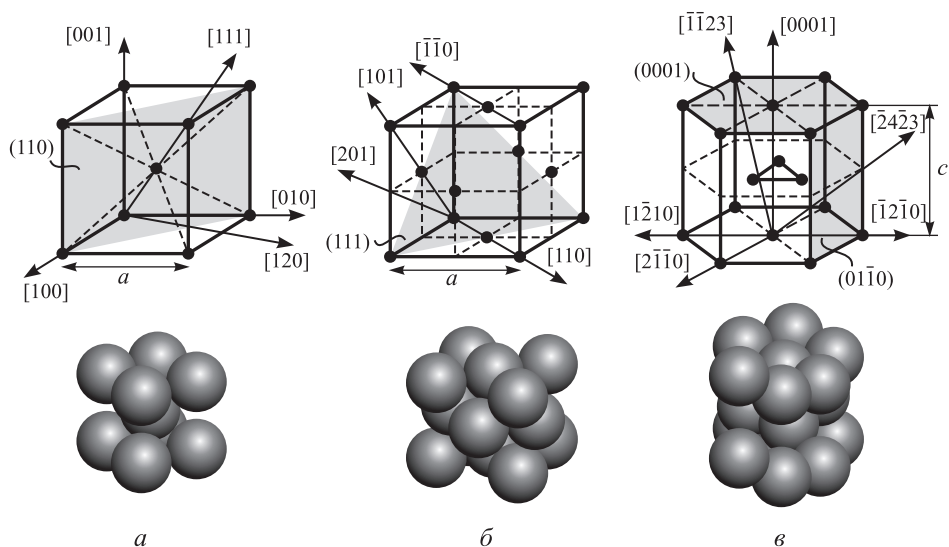
*Сложными* являются *решетки*, в которых на долю каждой ячейки приходится более одного атома. Среди них наиболее часто встречаются следующие тетрагональные решетки:

- объемноцентрированные, в которых атомы располагаются в вершинах и в центре параллелепипеда;
- гранецентрированные — решетки с атомами, расположенными в вершинах и центрах всех граней параллелепипеда;
- базоцентрированные, имеющие атомы в вершинах и центрах противоположных граней параллелепипеда.

Существуют также решетки с гексагональной симметрией.

Для промышленных металлов наиболее распространенными являются следующие типы кристаллических решеток (рис. 2.2):

- *кубическая объемноцентрированная (ОЦК-решетка*, рис. 2.2, *а*) (координационное число — число ближайших к данному соседних атомов — равно 8): V, Nb, Cr, Ta, Mo, W,  $\alpha$ -Fe (при  $t < 911$  °C),  $\beta$ -Ti (при  $t > 882$  °C),  $\beta$ -Zr (при  $t > 862$  °C),  $\beta$ -Be (при  $t > 1254$  °C) и др.;
- *кубическая гранецентрированная (ГЦК-решетка*, рис. 2.2, *б*) (координационное число равно 12): Al, Cu, Pt, Pb, Ag, Au, Ni,  $\beta$ -Co (при  $t > 400$  °C),  $\gamma$ -Fe (при  $t = 911$ – $1392$  °C), Pd и др.;
- *гексагональная плотноупакованная (ГПУ-решетка*, рис. 2.2, *в*) (координационное число равно 12): Mg, Zn, Hf, Re,  $\alpha$ -Ti (при  $t < 882$  °C),  $\alpha$ -Be (при  $t < 1254$  °C),  $\alpha$ -Co (при  $t < 400$  °C),  $\alpha$ -Zr (при  $t < 862$  °C), Cd и др.



**Рис. 2.2.** Типы наиболее распространенных кристаллических решеток металлов и схемы упаковок атомов:

*а* — объемноцентрированная кубическая, *б* — гранецентрированная кубическая, *в* — гексагональная плотноупакованная; показаны индексы некоторых направлений и плоскостей (индицируемые плоскости заштрихованы); *a*, *c* — параметры решеток. Пояснения к индицированию плоскостей и направлений см. в разд. 2.4 и 2.5