

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ**

**УЧЕБНИК ДЛЯ БАКАЛАВРОВ**

7–е издание, переработанное и дополненное

Под редакцией **Г. П. Фетисова**

*Рекомендовано Министерством образования и науки  
Российской Федерации в качестве учебника для  
студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по машиностроительным специальностям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва • Юрайт • 2015**

УДК 620  
ББК 30.3я73  
Ф45

*Авторский коллектив:*

**Фетисов Геннадий Павлович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов факультета прикладной механики Московского авиационного института (национального исследовательского университета);

**Матюнин Вячеслав Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов Института энергомашиностроения и механики Национального исследовательского университета «МЭИ», почетный работник высшего профессионального образования РФ;

**Соколов Владимир Сергеевич** — кандидат технических наук, профессор кафедры материаловедения факультета химико-технологического оборудования Института инженерной экологии и химического машиностроения Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ);

**Соколова Наринэ Христофоровна** — кандидат технических наук, доцент, почетный работник высшей школы;

**Гаврилюк Валерий Степанович** — кандидат технических наук, профессор кафедры технологии обработки материалов факультета машиностроительных технологий Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана;

**Гольцов Владимир Аркадьевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии конструкционных материалов факультета прикладной механики Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

*Рецензенты:*

*Герасимов С. А.* — доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения МГТУ им. Н. Э. Баумана, заслуженный деятель науки РФ;

*Лясников В. Н.* — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физического материаловедения и технологии новых материалов СГТУ им. Ю. А. Гагарина, заслуженный деятель науки РФ.

**Фетисов, Г. П.**

Ф45      *Материаловедение и технология материалов : учебник для бакалавров / Г. П. Фетисов [и др.] ; под ред. Г. П. Фетисова. — 7-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2015. — 767 с.— Серия : Бакалавр. Базовый курс.*

ISBN 978-5-9916-3327-7

В учебнике рассмотрены вопросы физико-химического строения металлических и неметаллических материалов, термической обработки и поверхностного упрочнения, понятия о механических свойствах и методах их определения, основы теории и технологии получения заготовок литьем, давлением, сваркой и пайкой, механической обработкой и даны рекомендации по их применению. Включен раздел по производству металлов и порошковой металлургии.

Содержание учебника соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования третьего поколения.

*Для студентов вузов, обучающихся машиностроительным специальностям. Может быть использован инженерно-техническими работниками.*

УДК 620  
ББК 30.3я73

© Коллектив авторов, 2008  
© Коллектив авторов, 2013, с изменениями  
© ООО «Издательство Юрайт», 2015

ISBN 978-5-9916-3327-7

## Оглавление

Предисловие .....	11
-------------------	----

### Раздел I ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

<b>Глава 1. Кристаллическое строение металлов и сплавов .....</b>	<b>17</b>
1.1. Металловедение — наука о металлах .....	17
1.2. Общие понятия о металлах и их свойствах .....	18
1.3. Энергетическое состояние металлов .....	21
1.4. Кристаллические решетки металлов и их основные типы .....	22
1.4.1. Кристаллографические направления и плоскости .....	25
1.4.2. Анизотропия свойств металлов .....	26
1.4.3. Аллотропия (полиморфизм) металлов .....	27
1.5. Дефекты кристаллического строения .....	28
1.5.1. Точечные дефекты .....	28
1.5.2. Линейные дефекты .....	29
1.5.3. Поверхностные дефекты .....	32
1.6. Кристаллизация и формирование структуры металла .....	34
1.7. Форма кристаллических образований и строение металлического слитка .....	39
1.8. Основные методы исследования строения металлов и сплавов .....	41
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>44</i>
<b>Глава 2. Основы теории сплавов .....</b>	<b>45</b>
2.1. Металлические сплавы. Общие понятия .....	45
2.2. Виды двойных сплавов .....	46
2.3. Понятие о диаграммах состояния сплавов и их построение .....	48
2.3.1. Понятие о диаграммах состояния сплавов и фазах .....	48
2.3.2. Построение диаграмм состояния .....	49
2.4. Основные типы диаграмм состояния двойных сплавов .....	51
2.4.1. Диаграмма состояния I типа .....	51
2.4.2. Диаграмма состояния II типа .....	53
2.4.3. Диаграмма состояния III типа .....	54
2.4.4. Диаграмма состояния IV типа .....	56
2.5. Связь физико-механических и технологических свойств сплавов с типом диаграммы состояния .....	57
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>59</i>
<b>Глава 3. Механические свойства и методы испытания материалов .....</b>	<b>60</b>
3.1. Общие понятия о механических свойствах и методах механических испытаний материалов .....	60
3.2. Испытания на растяжение, сжатие, изгиб .....	61
3.2.1. Растяжение .....	61
3.2.2. Сжатие .....	67

3.2.3. Изгиб .....	70
3.3. Испытания на твердость .....	73
3.3.1. Методы Бринелля, Виккерса и Роквелла .....	73
3.3.2. Метод микротвердости .....	75
3.3.3. Метод кинетической твердости .....	76
3.3.4. Связь характеристик твердости с характеристиками прочности металлов и сплавов .....	77
3.4. Испытания на трещиностойкость и сопротивление хрупкому разрушению .....	80
3.4.1. Трещиностойкость .....	80
3.4.2. Ударная вязкость .....	82
3.4.3. Хладноломкость и критическая температура хрупкости .....	85
3.5. Испытания на усталость .....	87
3.5.1. Циклы нагружения и диаграммы усталости .....	87
3.5.2. Разрушение при усталости .....	89
3.5.3. Влияние различных факторов на сопротивление материалов усталости .....	91
3.6. Испытания на жаропрочность .....	93
3.6.1. Ползучесть .....	93
3.6.2. Длительная прочность .....	96
3.6.3. Релаксация напряжений .....	97
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	101
<b>Глава 4. Дислокационный механизм пластической деформации. Наклеп и рекристаллизация</b> .....	<b>102</b>
4.1. Дислокационный механизм пластической деформации .....	102
4.2. Теоретическая и реальная прочность металлов .....	106
4.3. Разрушение и его виды .....	108
4.4. Наклеп .....	111
4.5. Рекристаллизационные процессы в наклепанном металле .....	114
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	117
<b>Глава 5. Сплавы на основе железа</b> .....	<b>118</b>
5.1. Диаграмма состояния «железо — углерод» .....	118
5.2. Классификация углеродистых сталей .....	122
5.3. Влияние постоянных примесей на углеродистые стали .....	124
5.4. Влияние углерода на свойства углеродистых сталей и их применение .....	126
5.5. Углеродистые качественные стали .....	131
5.6. Автоматные стали .....	133
5.7. Углеродистые инструментальные стали .....	135
5.8. Чугуны .....	136
5.8.1. Белый чугун .....	137
5.8.2. Серый чугун .....	138
5.8.3. Высокопрочный чугун .....	140
5.8.4. Ковкий чугун .....	141
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	143
<b>Глава 6. Термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка металлов и сплавов</b> .....	<b>145</b>
6.1. Основные превращения в стали при нагреве и охлаждении в области критических точек .....	145
6.2. Изотермический распад аустенита .....	148

6.3. Превращения в аустените при непрерывном охлаждении. Мартенситное превращение .....	153
6.4. Термическая обработка .....	155
6.5. Химико-термическая обработка .....	165
6.6. Термомеханическая обработка .....	170
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	171
<b>Глава 7. Поведение материалов в особых условиях</b> .....	<b>172</b>
7.1. Жаростойкость и методы ее повышения .....	172
7.2. Жаропрочность и методы ее повышения. Явление ползучести .....	174
7.2.1. Испытания на ползучесть .....	175
7.2.2. Длительная прочность .....	177
7.2.3. Пути повышения жаропрочности .....	178
7.3. Термическая усталость. Влияние температуры испытания .....	180
7.4. Низкие температуры .....	181
7.5. Радиационное облучение .....	183
7.6. Глубокий вакуум .....	185
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	186
<b>Глава 8. Легированные стали</b> .....	<b>187</b>
8.1. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства стали .....	187
8.2. Классификация легированных сталей .....	196
8.3. Маркировка легированных сталей .....	198
8.4. Цементуемые легированные стали .....	200
8.5. Улучшаемые легированные стали .....	203
8.6. Высокопрочные стали .....	206
8.7. Пружинно-рессорные стали общего назначения .....	210
8.8. Шарикоподшипниковые стали .....	212
8.9. Износостойкие стали .....	215
8.10. Коррозионностойкие (нержавеющие) стали и сплавы .....	216
8.11. Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы .....	223
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	231
<b>Глава 9. Цветные металлы и сплавы</b> .....	<b>233</b>
9.1. Сплавы на основе легких металлов .....	233
9.1.1. Магний и его сплавы .....	233
9.1.2. Алюминий и его сплавы .....	238
9.1.3. Титан и его сплавы .....	258
9.2. Медь и ее сплавы .....	267
9.2.1. Латунни .....	269
9.2.2. Бронзы .....	272
9.2.3. Медно-никелевые сплавы .....	276
9.2.4. Области применения меди и ее сплавов .....	281
9.3. Жаропрочные и жаростойкие никелевые сплавы .....	282
9.3.1. Жаропрочные сплавы на железоникелевой и никелевой основе .....	282
9.3.2. Жаростойкие сплавы .....	284
9.4. Тугоплавкие металлы и сплавы на их основе .....	285
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	290
<b>Глава 10. Неметаллические материалы</b> .....	<b>291</b>
10.1. Полимеры .....	292
10.1.1. Молекулярная структура полимеров .....	292
10.1.2. Термомеханические свойства полимеров .....	296

10.2. Пластмассы .....	301
10.2.1. Термопластичные пластмассы .....	302
10.2.2. Полярные термопласты .....	304
10.2.3. Терморезистивные пластмассы .....	309
10.2.4. Пластмассы с порошковыми наполнителями .....	312
10.2.5. Газонаполненные пластмассы .....	313
10.3. Резины .....	316
10.3.1. Разновидности ингредиентов резины .....	317
10.3.2. Приготовление резиновых смесей .....	321
10.3.3. Формообразование деталей из резины .....	322
10.3.4. Влияние условий эксплуатации на свойства резин .....	324
10.4. Клеи .....	326
10.4.1. Состав и классификация клеев .....	327
10.4.2. Формирование клеевого соединения .....	329
10.4.3. Конструкционные клеи .....	331
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	339
<b>Глава 11. Композиционные материалы .....</b>	<b>340</b>
11.1. Принципы создания и основные типы композиционных материалов .....	340
11.2. Композиционные материалы с нуль-мерными наполнителями .....	343
11.2.1. Композиционные материалы с алюминиевой матрицей .....	344
11.2.2. Композиционные материалы с никелевой матрицей .....	345
11.3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями .....	347
11.3.1. Упрочнение волокнами .....	347
11.3.2. Армирующие материалы и их свойства .....	353
11.3.3. Получение композиционных материалов на металлической основе, армированных волокнами .....	362
11.3.4. Композиционные материалы с алюминиевой матрицей .....	364
11.3.5. Композиционные материалы на никелевой матрице .....	368
11.4. Эвтектические композиционные материалы .....	369
11.4.1. Эвтектические композиционные материалы на алюминиевой основе .....	370
11.4.2. Эвтектические композиционные материалы на основе никеля .....	372
11.5. Композиционные материалы на неметаллической основе .....	374
11.5.1. Свойства композиционных материалов с полимерной матрицей .....	375
11.5.2. Обработка и соединение композиционных материалов .....	384
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	386

## Раздел II МЕТАЛЛУРГИЯ

<b>Глава 12. Основы производства металлов .....</b>	<b>390</b>
12.1. Получение стали .....	390
12.2. Получение алюминия .....	393
12.3. Получение магния .....	394
12.4. Получение титана .....	395
12.5. Получение меди .....	396
12.6. Получение никеля .....	397
12.7. Получение металлов повышенной чистоты .....	398
12.7.1. Электрошлаковый переплав .....	398

12.7.2. Электронно-лучевой переплав .....	399
12.7.3. Методы зонной плавки и направленной кристаллизации ...	400
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	401
<b>Глава 13. Порошковая металлургия</b> .....	<b>402</b>
13.1. Методы получения порошков .....	403
13.2. Формирование порошков .....	405
13.3. Спекание порошков .....	408
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	410

### Раздел III ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

<b>Глава 14. Физическая природа и условия кристаллизации</b> .....	<b>413</b>
14.1. Определение, область применения .....	413
14.2. Развитие отечественного литейного производства .....	414
14.3. Физическая природа кристаллизации металлов .....	415
14.4. Литейные свойства .....	417
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	422
<b>Глава 15. Основные этапы производства отливок</b> .....	<b>423</b>
15.1. Особенности конструирования отливок .....	424
15.2. Технологический процесс изготовления отливок .....	429
15.3. Формовочные смеси .....	429
15.4. Проектирование и изготовление литейной оснастки .....	432
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	436
<b>Глава 16. Способы литья</b> .....	<b>437</b>
16.1. Литье в песчаные формы .....	437
16.1.1. Технологические особенности литья в песчаные формы ....	437
16.1.2. Заливка форм. Охлаждение, выбивка и очистка отливок ....	442
16.2. Литье по выплавляемым моделям .....	442
16.3. Литье в оболочковые формы .....	446
16.4. Литье в металлические формы .....	448
16.5. Литье под давлением .....	451
16.6. Центробежное литье .....	453
16.7. Получение отливок методом направленной кристаллизации .....	454
16.7.1. Специальные способы литья .....	454
16.7.2. Технологические основы получения отливок со столбчатой структурой .....	457
16.7.3. Монокристаллическое литье .....	458
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	461

### Раздел IV ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

<b>Глава 17. Физико-механические основы обработки металлов давлением...</b>	<b>465</b>
17.1. Понятие о механизме пластического деформирования при обра- ботке давлением .....	465
17.2. Основные параметры, характеризующие пластическую деформа- цию при обработке металлов давлением .....	467
17.3. Влияние различных факторов на пластичность металлов и сопро- тивление пластическому деформированию .....	469
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	472

<b>Глава 18. Нагрев металла для обработки давлением и нагревательные устройства .....</b>	<b>473</b>
18.1. Назначение и режимы термического нагрева .....	473
18.2. Нагревательные устройства .....	476
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>480</i>
<b>Глава 19. Получение машиностроительных профилей .....</b>	<b>481</b>
19.1. Прокатное производство .....	481
19.2. Производство распространенных видов проката .....	485
19.3. Производство бесшовных и сварных труб .....	486
19.4. Производство специальных видов проката .....	488
19.5. Волочение .....	490
19.6. Прессование .....	493
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>496</i>
<b>Глава 20. Получение машиностроительных заготовок .....</b>	<b>497</b>
20.1. Ковка .....	497
20.2. Горячая объемная штамповка .....	499
20.3. Разновидности горячей объемной штамповки .....	500
20.4. Специализированные методы получения поковок .....	507
20.5. Исходные материалы и резка заготовок для машиностроительных поковок .....	511
20.6. Отделочные операции после ГОШ .....	512
20.7. Основные этапы технологического процесса горячей объемной штамповки .....	514
20.8. Технологические особенности ковки и штамповки цветных, высоколегированных, труднодеформируемых металлов и сплавов .....	516
20.9. Холодная объемная штамповка .....	520
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>523</i>
<b>Глава 21. Листовая штамповка .....</b>	<b>524</b>
21.1. Разделительные операции листовой штамповки .....	524
21.2. Формоизменяющие операции листовой штамповки .....	526
21.3. Оборудование и инструмент для листовой штамповки .....	530
21.4. Другие способы листовой штамповки .....	531
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>534</i>

## Раздел V СВАРКА И ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

<b>Глава 22. Физико-химические основы образования сварного соединения ...</b>	<b>537</b>
22.1. Образование сварного соединения. Определение сварки .....	537
22.2. Особенности применения сварки плавлением и давлением .....	540
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>541</i>
<b>Глава 23. Термические виды сварки .....</b>	<b>542</b>
23.1. Сварочные источники теплоты .....	542
23.2. Ручная дуговая сварка .....	550
23.3. Автоматическая дуговая сварка под флюсом .....	553
23.4. Электрошлаковая сварка .....	555
23.5. Дуговая сварка в защитных газах .....	556
23.6. Плазменная сварка .....	561
23.7. Электроно-лучевая сварка .....	562



23.8. Сварка в вакууме полым катодом .....	563
23.9. Лазерная сварка .....	564
23.10. Газовая сварка .....	566
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	566
<b>Глава 24. Термомеханические методы сварки .....</b>	<b>567</b>
24.1. Контактная сварка .....	567
24.2. Конденсаторная сварка .....	576
24.3. Диффузионная сварка .....	576
24.4. Индукционно-прессовая (высокочастотная) сварка .....	578
24.5. Сварка трением .....	580
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	581
<b>Глава 25. Механические методы сварки .....</b>	<b>582</b>
25.1. Холодная сварка .....	582
25.2. Сварка взрывом .....	584
25.3. Ультразвуковая сварка .....	586
25.4. Магнитоимпульсная сварка .....	588
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	589
<b>Глава 26. Сопутствующие процессы при сварке. Особенности сварки конструкционных материалов .....</b>	<b>590</b>
26.1. Свариваемость .....	590
26.2. Характеристика свариваемости металлов и сплавов .....	603
26.3. Тепловые процессы при сварке .....	611
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	617
<b>Глава 27. Сварка пластмасс .....</b>	<b>618</b>
27.1. Классификация способов сварки пластмасс .....	618
27.2. Сварка нагретым газом .....	618
27.3. Сварка экструдированной присадкой (расплавом) .....	619
27.4. Контактная тепловая сварка .....	619
27.5. Сварка ультразвуком, трением и вибротрением .....	619
27.6. Сварка токами высокой частоты и инфракрасными лучами .....	621
27.7. Сварка лазером и световым лучом .....	622
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	622
<b>Глава 28. Специальные термические процессы в сварочном производстве ...</b>	<b>623</b>
28.1. Резка .....	623
28.2. Наплавка .....	625
28.3. Напыление .....	626
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	627
<b>Глава 29. Пайка металлов .....</b>	<b>628</b>
29.1. Основные понятия и определения .....	628
29.2. Способы пайки .....	632
29.2.1. Способы пайки по удалению оксидной пленки .....	632
29.2.2. Способы пайки по кристаллизации паяного шва .....	635
29.2.3. Способы пайки по получению припоя .....	636
29.2.4. Способы пайки по заполнению зазора .....	637
29.2.5. Способы пайки по виду источника нагрева .....	638
29.3. Технологический процесс пайки .....	642
29.4. Особенности пайки различных материалов .....	644

29.5. Конструирование паяных соединений .....	649
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	651
<b>Глава 30. Контроль качества сварных и паяных изделий .....</b>	<b>652</b>
30.1. Дефекты сварных и паяных соединений .....	652
30.2. Методы контроля качества сварных и паяных соединений .....	653
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	660

## Раздел VI ОСНОВЫ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

<b>Глава 31. Основы механической обработки заготовок деталей машин ...</b>	<b>665</b>
31.1. Общие положения. Схемы обработки .....	665
31.2. Параметры технологического процесса резания .....	669
31.3. Физико-химические и механические основы процесса резания ...	673
31.4. Тепловые процессы в зоне резания и смазочно-охлаждающие среды ...	678
31.5. Влияние вибрации системы СПИД и технологической наследственности на качество обработанных поверхностей .....	680
31.6. Инструментальные режущие материалы .....	681
31.7. Износ и стойкость режущего инструмента. Параметры износа .....	685
31.8. Определение параметров оптимального режима резания .....	689
31.9. Технологические процессы обработки резанием и их структура ...	691
31.10. Обрабатываемость конструкционных материалов резанием .....	702
31.11. Металлорежущие станки .....	703
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	714
<b>Глава 32. Основы физико-химических методов размерной обработки ...</b>	<b>715</b>
32.1. Электроэрозионная размерная обработка .....	715
32.2. Электрохимическая размерная обработка .....	725
32.3. Ультразвуковая абразивная размерная обработка .....	731
32.4. Лучевые методы размерной обработки .....	736
32.5. Комбинированные методы размерной обработки .....	744
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	746
<b>Глава 33. Контроль качества обработки .....</b>	<b>747</b>
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	754

## Раздел VII НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

<b>Глава 34. Основные понятия и определения .....</b>	<b>757</b>
34.1. История нанотехнологий. Основные понятия .....	757
34.2. Области применения нанотехнологий .....	759
34.3. Методы получения наноразмерных частиц .....	761
34.3.1. Физические методы .....	761
34.3.2. Химические методы .....	763
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	765
<b>Литература .....</b>	<b>766</b>

## Предисловие

Материаловедение и технология материалов относятся к числу основополагающих учебных дисциплин для специальностей машиностроительного профиля. Это связано прежде всего с тем, что получение, разработка новых материалов, способы их обработки являются основой современного производства и во многом определяют уровнем своего развития научно-технический и экономический потенциал страны. Проектирование рациональных, конкурентоспособных изделий, организация их производства невозможны без должного технологического обеспечения и достаточного уровня знаний в области материаловедения и технологии. Последние являются важнейшим показателем образованности инженера в области техники.

Наконец, материаловедение и технология конструкционных материалов служат базой для изучения многих специальных дисциплин.

В настоящем учебнике рассмотрены физико-химические основы строения и свойств конструкционных металлических и неметаллических материалов, приведены широко используемые методы определения механических свойств материалов при различных видах нагружения, изложены основы термической обработки и поверхностного упрочнения деталей. Значительное внимание при этом уделено дислокационной концепции прочности.

В учебнике представлены все основные технологические процессы: литейное производство, обработка металлов давлением и резанием, сварка и пайка, а также основы современного производства металлов, порошковой металлургии и нанотехнологий.

Освоив представленный в учебнике материал, студенты должны будут:

### ***знать***

- основы строения и свойств материалов;
- современные технологические процессы обработки материалов;

### ***уметь***

- выбирать оптимальный материал для детали, изделия, в том числе с учетом его технологических свойств;
- назначать рациональную технологию изготовления деталей и изделий;

### ***владеть***

- методами анализа и поиска материала для изделия;
- методами оценки влияния на свойства материала сопутствующих процессов при производстве изделия;

- навыками проектирования технологичных деталей и конструкций.

Учебник написан коллективом авторов, представляющих ведущие технические высшие учебные заведения России: Национальный исследовательский университет «МАИ», авторы: профессор Г. П. Фетисов (разд. I (параграф 9.4), II, III, V, VII), доцент В. А. Гольцов (разд. VI), доцент Н. Х. Соколова (гл. 5, 7); Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана: профессор В. С. Гаврилюк (разд. IV); Национальный исследовательский университет «МЭИ»: профессор В. М. Матюнин (гл. 1—4, 6, 9 (параграф 9.3)); Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ): профессор В. С. Соколов (гл. 8, 9 (параграфы 9.1, 9.2), 10, 11).

Раздел I

**ОСНОВЫ  
СТРОЕНИЯ  
И СВОЙСТВ  
МАТЕРИАЛОВ**



---

В результате освоения материалов данного раздела студенты должны **знать**

- основы строения металлов и сплавов, неметаллических и композиционных материалов;
- химические, физические, механические и технологические свойства материалов;
- современные методы исследования структуры и свойств материалов;
- связь между составом, строением и свойствами материалов;
- пути управления структурой и свойствами материалов;
- основные источники учебной и научно-технической информации по конструкционным материалам;

**уметь**

- принимать технически обоснованные решения по выбору материалов, управлению их свойствами, контролю качества и назначению в зависимости от условий изготовления и эксплуатации изделий машиностроения;
- эффективно применять материалы с учетом долговечности, безопасности, экономичности и экологической чистоты;

**владеть**

- терминологией в области материаловедения;
  - навыками поиска информации о структуре и свойствах материалов;
  - навыками применения полученной информации для обоснованного выбора материалов.
- 

В общей учебной дисциплине «Материаловедение» главным объектом изучения является материал. Поэтому, прежде чем дать определение науки «Материаловедение», необходимо выяснить значение понятия «материал». Обычно в общей дисциплине «Материаловедение» и в более частной дисциплине «Металловедение» используют понятия «вещество», «материал», «металл». Чтобы раскрыть смысл этих понятий и выявить связь между ними, целесообразно вначале обратиться к основному фундаментальному понятию окружающего нас мира — понятию «материя» [16].

*Материя* — объективно существующая реальность в виде различных форм и уровней организации объектов окружающего нас мира, характеризуемая массой и энергией, а также другими производными характеристиками (пространство, время, дискретность, непрерывность, типы связей элементов и т.д.).

*Вещество* — форма существования материи, которая характеризуется массой покоя и, следовательно, дискретностью, т.е. возможностью существования в виде индивидуальных частиц (тел).

*Материал* — вид вещества или совокупность нескольких его типов, предназначенные для получения продукции в виде сырья для изделий.

*Конструкционный материал* — любой вид материала, предназначенный для изготовления деталей машин и приборов, конструкций, подвергающийся различным технологическим воздействиям.

Для получения основных материалов востребованы те природные, синтетические или искусственные химические вещества (железные руды, оксиды, углеводороды и др.), которые обладают нужными свойствами или могут их приобрести в процессе технологической обработки.

Материалы, используемые человеком, можно разделить на три основные группы:

- первая группа — металлические материалы;
- вторая группа — неметаллические материалы;
- третья группа — композиционные материалы.

Внутри каждой группы существует многообразие подгрупп в зависимости от структуры, агрегатного состояния и состава материалов.

*Структура (строение) материала* — это взаимное расположение и связь составных частей, или внутреннее устройство материала.

Обычно различают несколько уровней структурной организации материалов: атомный, нано-, микро-, мезо- и макроуровни.

*Состав* — совокупность частей или структурных составляющих (атомов, веществ) материальной системы, образующих единое целое.

*Свойства* — качественная или количественная характеристика материалов, определяющая их общность или различие. Различают следующие основные свойства материалов: *химические, физические, механические, технологические, эксплуатационные (служебные)* (более подробно см. в параграфе 1.2).

Исходя из вышеперечисленных представлений о материалах и их свойствах, можно перейти к определению материаловедения как науки.

**Материаловедение** — наука, изучающая фундаментальные связи между составом, строением и свойствами материалов и закономерности их изменения под воздействием конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов. Основная цель изучения этих закономерностей заключается в прогнозировании структуры и свойств материалов, разработке способов управления ими, а также принципов выбора и создания материалов с заданными свойствами.

Значение материаловедения в развитии мировой цивилизации всегда было и продолжает оставаться основополагающим. Более того, влияние новых материалов, создаваемых человеком, на научно-технический прогресс постоянно увеличивается. Новые мате-

риалы являются стимулом для появления и развития новых технических решений и высокоэффективных технологий. Достаточно привести такие примеры, как алюминиевые сплавы и композиционные материалы в авиакосмической технике, жаропрочные и жаростойкие материалы в теплоэнергетике, сверхпроводники и аморфные сплавы в электро- и радиотехнике, полупроводниковые материалы и жидкие кристаллы в электронике, сплавы с эффектом памяти формы в медицине и др. В настоящее время бурно развиваются наноматериаловедение и нанотехнологии, позволяющие получать новые материалы, новые структуры и их комбинации с необычайно высокими физико-механическими и служебными свойствами.

Цели, задачи и области исследований в материаловедении с течением времени расширялись и углублялись. Развитие теоретических основ химии, физики, механики твердого тела, термодинамики и других наук, разработка новых методов и технических средств для исследования структуры и свойств материалов на разных масштабных уровнях способствовали развитию материаловедения. Так, например, теория дислокаций стала базой физического материаловедения, расширила границы понимания механизмов пластической деформации, теоретической и реальной прочности металла. Новые подходы синергетики привели к универсальному понятию структуры и позволили перейти от понятия «микроструктура» к понятию «динамическая структура». Фрактальное материаловедение связывает свойства материалов с их фрактальной структурой, самоорганизующейся вблизи неравновесных фазовых переходов. Управление формированием фрактальной структуры дает возможность создавать материалы нового поколения с уникальными физико-механическими свойствами.

Таким образом, произошло становление материаловедения как междисциплинарной науки, успехи в развитии которой предопределяет взаимодействие с фундаментальными смежными науками.



# Глава 1

## КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Исторически сложилось так, что с давних пор металлические материалы используются в машиностроении более широко, чем неметаллические. Несмотря на успехи, достигнутые в создании новых неметаллических материалов, все же основными конструкционными материалами в машиностроении были и еще долго будут оставаться металлы и их сплавы. В связи с этим первоначально получило развитие металловедение как самостоятельная часть материаловедения. Поэтому в последующих главах разд. I будут сначала изложены основные положения науки о металлах — металловедения.

### 1.1. Металловедение — наука о металлах

Металл с древних времен играл важную роль в развитии человечества. Достаточно вспомнить такие периоды мировой истории, как бронзовый век или железный век, чтобы представить значение того или иного металла в развитии цивилизации.

Металл и сейчас остается фундаментом мирового научно-технического прогресса. Металлы, созданные природой, и многочисленные металлические сплавы, созданные человеком, являются основным конструкционным материалом для всех отраслей промышленности.

Среди наук о металлах (металлургия, технология металлов и др.) металловедение является основной. Существует следующее определение металловедения как науки.

**Металловедение** — наука, изучающая связь между составом, строением и свойствами металлических материалов, закономерности их изменения при механических, термических, химических и других воздействиях.

Теоретической базой металловедения являются физика, химия, термодинамика, механика и другие науки. Поэтому развитие металловедения неразрывно связано с развитием перечисленных фундаментальных наук.

Основные физико-механические, технологические и служебные свойства металлов и сплавов определяются прежде всего их внут-

ренным строением, которое зависит от химического состава и характера внешних воздействий в процессе обработки и эксплуатации деталей и конструкций.

Отечественная наука внесла большой вклад в развитие металловедения. Впервые существование связи между строением стали и ее свойствами установил знаменитый русский металлург П. П. Аносов. Он первым применил микроскоп для изучения структуры металла, разработал процесс газовой цементации, исследовал влияние отжига на структуру и свойства стали. Ученый раскрыл утраченный секрет древней булатной стали и описал его в своей книге «О булатах», вышедшей в свет в 1841 г. В 1868 г. великий русский ученый-металлург Д. К. Чернов открытием критических точек в стали установил подлинно научную причину изменения ее свойств при термической обработке, за что получил международное признание. На Всемирной выставке в Париже (1900) известный французский металлург Г. Монгольфье сказал: «Считаю своим долгом открыто и публично заявить в присутствии стольких знатоков и специалистов, что наши заводы и все сталелитейное дело обязаны настоящим успехам в значительной мере трудам и исследованиям русского инженера Д. К. Чернова, и приглашаю всех выразить ему нашу признательность и благодарность от имени всей металлургической промышленности». А в 1903 г. вышла книга американского металлурга Х. Гоу со следующим посвящением: «Профессору Дмитрию Константиновичу Чернову, отцу металлургии железа».

В последующие годы существенный вклад в развитие металловедения внесли Н. С. Курнаков, А. А. Байков, А. М. Бочвар, И. А. Одинг, С. Т. Кишкин, С. С. Штейнберг, Г. П. Курдюмов, А. П. Гуляев, Ю. М. Лахтин и их ученики.

Среди известных зарубежных ученых, без научных трудов которых были бы невозможны успехи в развитии металловедения, следует назвать Ф. Осмонда, Г. Таммана, Э. Бейна, М. Мейла, Г. Розебума и др.

## **1.2. Общие понятия о металлах и их свойствах**

В середине XVIII в. великий русский ученый М. В. Ломоносов в книге «Первые основания металлургии или рудных дел» дал металлу следующее определение: «Металлом называется светлое тело, которое ковать можно». Исходя из этого определения, М. В. Ломоносов насчитывал всего шесть металлов: золото, серебро, медь, железо, свинец и олово. Известные ранее ртуть и сурьма не подходили под это определение, так как ртуть при нормальных условиях является жидкостью, а сурьма настолько хрупка, что ее нельзя ковать.

Позднее металлам стали приписывать и другие свойства, например электрические и теплопроводные, непрозрачность в не слишком тонком слое, характерный металлический блеск и др.

В настоящее время техническое определение металла не претерпело существенных изменений: металлы — это вещества, обладающие в твердом состоянии высокими электро- и теплопроводностью, а также ковкостью (пластичностью), специфическим блеском и другими свойствами, обусловленными наличием свободных электронов.

С точки зрения химии под металлами понимают определенную группу элементов в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Эти элементы при химическом взаимодействии с элементами, являющимися неметаллами, отдают им свои внешние (валентные) электроны, которые прочно связаны с ядром. У металлов на наружных электронных оболочках содержится меньшее количество электронов, чем у неметаллов.

Можно дать еще одно определение металла и с физической точки зрения: «Металл — это твердое тело, обладающее поверхностью Ферми» [15]. Под поверхностью Ферми понимают модель картины движения электронов в металле. По виду модели поверхности Ферми можно описать свойства данного металла и его поведение в различных условиях. Однако это сложная задача, требующая еще своего решения в целях объяснения и предсказания комплекса физико-механических свойств различных металлов.

Металлы принято делить на две группы: черные и цветные.

Железо (Fe) и сплавы на его основе (стали, чугуны) называют *черными* металлами, а остальные металлы (Be, Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Nb, Mo, Ag, Sn, W, Au, Hg, Pb и др.) и их сплавы — *цветными*.

Черные металлы наиболее широко используются в промышленности. Примерно 90% всех конструкционных и инструментальных материалов производятся на основе железа. Стоимость черных металлов ниже стоимости цветных, что является одной из причин широкого распространения первых.

Цветные металлы по сходным свойствам подразделяются на легкие металлы, обладающие малой плотностью (Be, Mg, Al, Ti); легкоплавкие металлы (Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Bi); тугоплавкие металлы с температурой плавления выше, чем у железа (Ti, Cr, Zr, Nb, Mo, W, V, Re и др.); благородные металлы, обладающие химической инертностью (Pd, Ag, Os, Pt, Au и др.); урановые металлы, используемые в атомной энергетике (U, Th, Pl); редкоземельные металлы, используемые в качестве присадок к различным сплавам (Ce, Pr, Nb, Sm и др.); щелочноземельные металлы, используемые в качестве теплоносителей в атомных реакторах (Li, Na, K, Cs и др.).

В машиностроении также широко используются черные (в основном) и цветные металлы. Например, в котлоагрегатах (углеродистые, низколегированные и высоколегированные стали), турбоагрегатах (жаропрочные стали и сплавы).

Следует отметить, что перечисленными выше свойствами могут обладать не только чистые металлы, но и многочисленные металлические сплавы. В большинстве случаев сплавы превосходят по своим служебным свойствам чистые металлы в условиях воздействия рабочих нагрузок, температуры, агрессивной среды и других эксплуатационных факторов.

Разнообразие свойств металлов и их сплавов является главной причиной их широкого использования в технике. Наличие тех или иных свойств в металлах и сплавах зависит от особенностей их внутреннего строения. Основные свойства металлов и сплавов можно подразделить на физические, химические, механические, технологические и специальные.

К *физическим* свойствам относятся магнитные, электро- и теплопроводные, а также плотность, теплоемкость, температура плавления и др.

*Химические* свойства характеризуют специфику межатомного взаимодействия металла с другими веществами, в том числе с окружающей средой, например *коррозию*.

Среди *механических* свойств следует назвать прежде всего такие, как прочность, твердость, пластичность, трещиностойкость.

От физических, химических и механических свойств зависят технологические и специальные свойства металлов и сплавов. К *технологическим* свойствам относятся литейные, ковкость, свариваемость, обрабатываемость режущим инструментом, а к специальным — жаропрочность, жаростойкость, износостойкость, коррозионная стойкость и др.

К специальным относятся также такие свойства, как *служебные* или *эксплуатационные*, которые характеризуют работоспособность и долговечность деталей и конструкций, изготовленных из металлов и сплавов.

Эксплуатационные свойства зависят от комплекса различных свойств (механических, физических, химических и др.).

Среди механических свойств прочность занимает особое место, так как от нее прежде всего зависит неразрушаемость изделий. Учение о прочности и разрушении металлов является важной частью металловедения. Современные представления о природе прочности и физических механизмах разрушения позволяют обоснованно сделать выбор металла для изготовления деталей и конструкций в зависимости от эксплуатационных воздействий.

### 1.3. Энергетическое состояние металлов

Любой материал, включая металлы, является физико-химической системой. Поэтому для металлов характерны основные закономерности, определяющие поведение физико-химических систем. Одна из важных закономерностей заключается в том, что устойчивость всех тел возрастает при уменьшении энергии. Энергетические соотношения зависят от внутренней структуры металла. Чем прочнее связи между атомами, тем большую энергию необходимо затратить для разделения этих атомов.

Энергию механических систем подразделяют на потенциальную и кинетическую. Потенциальная энергия, являющаяся частью энергии механической системы, зависит от положения частиц системы или тела во внешнем силовом поле. Например, потенциальная энергия может быть связана с действием сил гравитации или кулоновских сил, возникающих в электрических полях. Кинетическая энергия является энергией движения. Например, непрерывное движение (колебания) атомов в металле в результате теплового возбуждения оказывает существенное влияние на его свойства.

Если в механической системе имеет место минимум потенциальной энергии, то система находится в устойчивом состоянии, которое называют стабильным равновесием. На рис. 1.1 приведены три положения (I, II, III) прямоугольного бруска. В состоянии III брусок находится в наиболее устойчивом состоянии (стабильном равновесии), так как его центр тяжести расположен ниже, чем в состояниях I или II. При переходе бруска из положения I в положение III его потенциальная энергия уменьшается. Вместе с тем если отсутствует внешнее воздействие, то положение I тоже может сохраняться сколь угодно долго. Такое состояние называют *метастабильным равновесием*. Чтобы перевести брусок из положения I в положение III, необходимо его приподнять и наклонить, для чего требуется затратить определенную работу. Эта дополнительная работа называется *энергией активации* ( $\Delta E^*$ ). Для перевода системы из состояния стабильного равновесия III в состояние метастабильного равновесия I энергия активации  $\Delta E_2^*$  должна быть больше, чем при обратном переводе  $\Delta E_1^*$ .

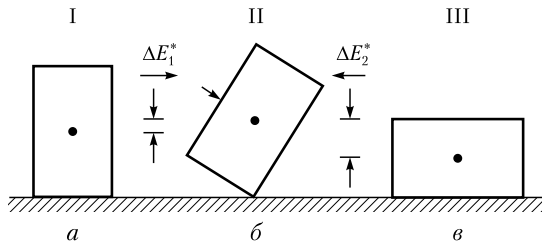


Рис. 1.1. Иллюстрация энергии активации, необходимой для перехода бруска из положения а в положения б, в и обратно

Полная внутренняя энергия системы состоит также из двух частей. Одна часть этой энергии обусловлена внутренним состоянием системы (внутренним беспорядком) и не участвует в реакциях с внешней средой. Другая часть внутренней энергии может быть переведена в работу и выделена из системы. Эта часть энергии называется *свободной энергией*. Состояние равновесия системы характеризуется уровнем свободной энергии. Минимум свободной энергии соответствует состоянию стабильного равновесия системы. В природе любая система самопроизвольно стремится к минимуму свободной энергии, т.е. к достижению наиболее устойчивого состояния.

Чаще всего анализ состояний системы поясняют на примере энергетической кривой, моделирующей механическую систему «криволинейная поверхность — шар» (рис. 1.2). Предполагается, что шар перекатывается по криволинейной поверхности и стремится занять положение с минимальным запасом потенциальной энергии, которое характеризуется положением в точке  $z$  и соответствует стабильному равновесию.

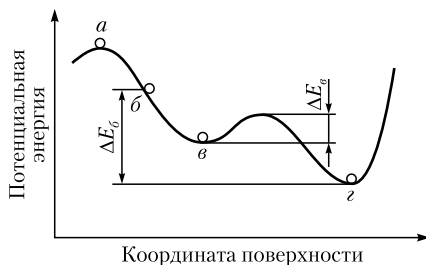


Рис. 1.2. Механическая модель системы «поверхность — шар»

В положении  $в$  система обладает относительной устойчивостью, что соответствует метастабильному равновесию. Для перехода из метастабильного в стабильное состояние система должна преодолеть энергетический барьер  $\Delta E_г$ . В положении  $б$  система находится в неустойчивом состоянии и обладает запасом свободной энергии  $\Delta E_б$ . В точке  $а$  система не имеет относительной устойчивости, а ее состояние называется *лабильным*.

#### 1.4. Кристаллические решетки металлов и их основные типы

Металлы и сплавы имеют кристаллическое строение. Это означает, что атомы в занимаемом ими пространстве расположены строго упорядоченно, находясь в определенных местах на вполне определенных расстояниях друг от друга. В пределах одного кристалла наблюдается повторяющаяся картина расположения атомов. Если соединить атомы воображаемыми линиями в трех взаимно перпендикулярных направлениях, то получится пространственная

кристаллическая решетка. Ее наименьшим структурным образованием является элементарная ячейка, контур которой представляет какое-нибудь составленное из атомов геометрическое тело, например куб или шестигранную призму. Элементарные ячейки, примыкая друг к другу и многократно повторяясь, образуют более крупные твердые тела правильной геометрической формы — *кристаллы*. Кристаллы, формирующиеся в процессе роста под воздействием окружающих кристаллов и имеющие поэтому неправильную геометрическую форму, называют *кристаллитами*. Кристаллиты в поликристаллическом теле, отделенные от других кристаллитов большеугловыми границами (см. подпараграф 1.5.3) и обладающие определенной кристаллографической ориентировкой, называют *зернами*.

Ориентировка ячеек в соседних зернах различна, а в пределах каждого зерна одинакова. Поэтому в кристаллической решетке зерен существует ближний и дальний порядки. Ближний порядок означает постоянство ближних атомов-соседей у каждого атома, а дальний — удаленных.

Наиболее простой геометрической формой кристаллической решетки металлов является кубическая. Эта форма решетки имеет две разновидности: *объемно-центрированную кубическую (ОЦК)* и *гранецентрированную кубическую (ГЦК)*. На рис. 1.3, *а, б* показаны схемы этих решеток. У обоих типов рассматриваемых решеток основу ячеек составляют восемь атомов, образующих куб и находящихся в его вершинах. Остальные атомы находятся или в центре куба (один атом на пересечении диагоналей в решетке ОЦК), или в центре каждой из его граней (шесть атомов в решетке ГЦК).

Кристаллические ОЦК-решетки в числе прочих металлов имеют хром, ванадий, молибден. А ГЦК-решетки имеют алюминий, медь, никель и другие металлы. Характерными признаками кристаллической решетки являются параметр решетки, координационное число и плотность упаковки атомов. *Параметром* (или периодом) кристаллической решетки  $a$  считают межатомное расстояние в ячейке (см. рис. 1.3). *Координационное число* (к.ч.) определяет

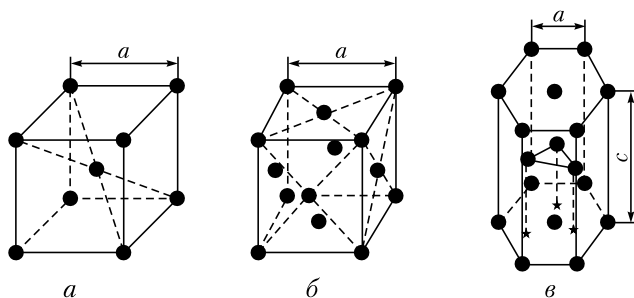


Рис. 1.3. Основные типы кристаллических решеток

число ближайших соседей каждого атома. А под *плотностью упаковки* (п.у.) понимают число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку. Для решетки ОЦК п.у. = 2 (один атом в вершине куба, а второй в центре куба), к.ч. = 8 (например, для атома, расположенного в центре куба). Для решетки ГЦК п.у. = 4, к.ч. = 12. Параметр решетки  $a$  для ОЦК-решеток и ГЦК-решеток одинаков по всем трем направлениям в пространстве.

Таким образом, ГЦК-решетка является более плотной, чем ОЦК-решетка. От плотности упаковки кристаллической решетки зависит прочность металлов.

Однако наиболее плотной из рассматриваемых кристаллических решеток является *гексагональная плотноупакованная решетка* (ГПУ). Схема этой решетки представлена на рис. 1.3, в. Ячейка этой решетки представляет собой шестигранную призму с центрированными основаниями, между которыми на некотором расстоянии от центров трех граней расположены еще три атома. Характеристики решетки ГПУ: параметры решетки  $a$  и  $c$  ( $c > a$ ); если  $c/a = 1,633$ , то к.ч. = 12, п.у. = 6. Решетку ГПУ имеют магний, цинк, бериллий и другие металлы.

Параметры кристаллических решеток металлов составляют от 0,2 до 0,7 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

В ячейках кристаллических решеток атомы касаются друг друга внешними слоями электронных оболочек. Межатомные силы сцепления, обеспечивающие целостность кристаллической решетки, создаются электромагнитным взаимодействием, обусловленным наличием у атомов валентных электронов. У металлов, находящихся в твердом состоянии, валентные электроны, освобождаясь от своих атомов, движутся между атомами, которые становятся положительно заряженными ионами. Это объясняется тем, что внешние электроны металлов, в отличие от внешних электронов неметаллов, слабо связаны с ядром. Поэтому атомы металлов легко теряют внешние электроны, превращаясь в ионы. Освободившиеся электроны образуют так называемый электронный газ. Принадлежащие всему зерну свободные электроны, взаимодействуя с положительными ионами, обеспечивают целостность кристаллической решетки. Такая межатомная связь в кристаллической решетке получила название *металлической*. Металлическая связь может существовать как между одноименными атомами в чистых металлах, так и между разнородными — в сплавах. Металлическая межатомная связь не имеет направленного характера. Электроны электронного газа не связаны с отдельными ионами, а в одинаковой степени принадлежат всем ионам металла.

Благодаря наличию электронного газа металлы обладают высокими электро- и теплопроводностью, а также металлическим блеском. Под действием электрического поля свободные электроны



приобретают направленное движение, обеспечивающее протекание тока. Высокая теплопроводность металла обусловлена также участием свободных электронов (наряду с ионами) в передаче тепла. А характерный металлический блеск металлов обусловлен взаимодействием свободных электронов с электромагнитными световыми волнами.

### 1.4.1. Кристаллографические направления и плоскости

При изучении и исследовании упорядоченности расположения атомов в кристаллической решетке используют кристаллографические направления и плоскости.

*Кристаллографическими направлениями* являются прямые или лучи, выходящие из какой-нибудь точки отсчета, вдоль которых на определенном расстоянии друг от друга располагаются атомы. Например, точками отсчета могут служить вершины куба, а кристаллографическими направлениями при этом являются его ребра и диагонали граней (рис. 1.4, а).

*Кристаллографическими плоскостями* являются плоскости, на которых расположены атомы. Например, кристаллографическими плоскостями могут быть грани куба или его диагональные плоскости (рис. 1.4, б, в, г).

Кристаллографические направления и плоскости принято обозначать *индексами Миллера*. Чтобы определить индекс какого-либо направления, необходимо найти координаты ближайшего к точке отсчета атома, лежащего на этом направлении, выраженные через параметры решетки. Например, координаты ближайшего атома

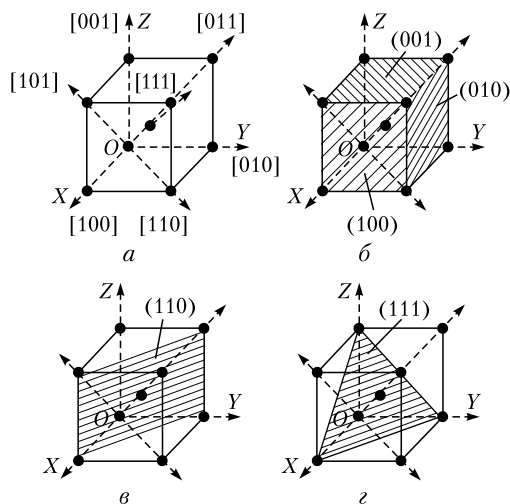


Рис. 1.4. Основные кристаллографические направления (а) и плоскости (б–г)

вдоль оси  $OX$  выразятся через 100 (см. рис. 1.4, *a*). Этими цифрами в квадратных скобках принято обозначать индекс направления вдоль оси  $OX$  и параллельных ему направлений: [100].

Индексы направлений вдоль осей  $OY$  и  $OZ$  и параллельных им направлений выражают соответственно как [010] и [001]. Направления вдоль диагоналей граней  $XOZ$ ,  $XOY$ ,  $YOZ$  и диагонали куба имеют соответственно следующие индексы: [101], [110], [011] и [111] (см. рис. 1.4, *a*).

Для определения индекса кристаллографической плоскости следует вначале найти координаты ближайших точек ее пересечения с осями координат, проведенными из точки отсчета  $O$ . Затем обратные величины найденных координат следует записать в обычной последовательности в круглых скобках. Например, координатами точек пересечения с осями координат интересующей нас ближайшей плоскости, параллельной плоскости  $XOY$  (т.е. плоскости верхней грани куба, см. рис. 1.4, *b*), являются числа  $\infty$ ,  $\infty$ , 1. Поэтому индекс этой кристаллографической плоскости будет (001).

Индексы плоскостей, параллельных плоскостям  $XOZ$  и  $YOZ$ , записываются в виде (010) и (100) (см. рис. 1.4, *b*). Индекс вертикальной диагональной плоскости куба выразится через (110), а индекс наклонной плоскости, пересекающей со всеми тремя осями координат на удалении одного параметра решетки, примет вид (111) (см. рис. 1.4, *в, г*).

Кристаллографические направления и плоскости позволяют более детально и наглядно исследовать различные процессы, происходящие в кристаллических телах, и особенности их свойств вдоль различных направлений и плоскостей.

### 1.4.2. Анизотропия свойств металлов

В кристаллических решетках металла вдоль различных направлений находится разное количество атомов. Например, в ОЦК-решетке по направлению вдоль диагонали куба [111] и в ГЦК-решетке по направлению вдоль диагоналей граней [110], [101], [011] размещается большее количество атомов, чем по направлениям вдоль ребер кубов [100], [010], [001]. В связи с этим в кристаллических телах должно наблюдаться различие свойств в зависимости от кристаллографического направления. Это различие в свойствах называется *анизотропией*.

Среди физико-механических свойств металлов от кристаллографического направления существенно зависят прочность, пластичность, вязкость. В этом можно убедиться, если вырезать образцы из металла вдоль различных кристаллографических направлений и испытать их на разрывной машине. Также различается и коэффициент линейного расширения металла в зависимости от кристалло-