



ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Термическая обработка стали

Учебник

ИЗДАТЕЛЬСТВО
FOLIANT

Нур-Султан
2019

УДК 669 (075.8)

ББК 34.4 я73

Т 35

Автор:

Фолькер Леппле, доктор технических наук, профессор

Редакционная коллегия издательства

Гроте-Вольф Астрид, доктор

Рецензенты:

Касенов А. Ж. – кандидат технических наук, ассоциированный профессор ПГУ имени С. Торайгырова

Маженов А. Е. – преподаватель специальных дисциплин по специальности «Металлургия и машиностроение», КГКП «Павлодарский колледж цветной металлургии»

Абдрахманов Д. С. – мастер производственного обучения по специальности «Металлургия» КГКП «Павлодарский колледж цветной металлургии»

Т 35 **Термическая обработка стали:** Учебник / Пер. с немецкого. – Нур-Султан: Фолиант, 2019. – 296 с.

ISBN 978-601-338-380-4

В учебнике рассмотрены основы металловедения, продукция черной металлургии, стандартизация стали, введение в термическую обработку сталей. Приведены общие закономерности структурных и фазовых превращений при нагреве и охлаждении сплавов. Подробно выполнен анализ изменения структуры и свойств при закалке, отпуске, отжиге, химико-термической обработке и других разновидностях термической обработки. Представлены технические чертежи, сборник задач с пятью уровнями сложности, словарь английских терминов.

Предназначен для студентов учебных заведений технического и профессионального образования, обучающихся по специальностям 1000000 «Металлургия и машиностроение», 1112000 «Эксплуатация машин и электрооборудования промышленности».

УДК 669 (075.8)

ББК 34.4 я73

ISBN 978-601-338-380-4

© 2014 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney
© Издательство «Фолиант», переводная, 2019

Содержание

1 Основы металловедения	9
1.1 Строение атома	9
1.1.1 Элементарные частицы и модели атома	9
1.1.2 Электронная оболочка	11
1.2 Металлическая связь	13
1.3 Кристаллическая решетка	15
1.3.1 Элементарная ячейка кристаллической решетки	15
1.3.2 Кубическая примитивная кристаллическая решетка (ПК) ...	16
1.3.3 Кубическая объемно- центрированная кристаллическая решетка (ОЦК)	16
1.3.4 Кубическая гранецентрированная кристаллическая решетка (ГЦК) ...	17
1.3.5 Гексагональная решетка плотнейшей упаковки (ГПУ)	17
1.3.6 Полиморфизм	18
1.4 Образование кристаллической структуры	19
1.5 Дефекты кристаллической решетки	21
1.5.1 Точечные дефекты кристаллической решетки	21
1.5.1.1 Вакансии	21
1.5.1.2 Межузельные атомы	21
1.5.1.3 Атомы замещения	22
1.5.1.4 Атомы внедрения или промежуточные атомы	22
1.5.2 Линейные дефекты	23
1.5.2.1 Линейные дислокации	23
1.5.2.2 Винтовые дислокации	26
1.5.2.3 Смешанные дислокации	26
1.5.3 Поверхностные дефекты кристаллической решетки	26
1.5.3.1 Большеугловые границы зерен	26
1.5.3.2 Малоугловые границы зерен ...	27
1.5.3.3 Дефекты упаковки	27
1.6 Основы образования сплавов	27
1.6.1 Диаграммы состояния двухкомпонентных систем (бинарных систем сплавов)	28
1.6.1.1 Составление диаграмм состояния ...	28
1.6.1.2 Термический анализ чистых металлов и металлических сплавов	28
1.6.1.3 Основные типы бинарных диаграмм состояния	29
1.6.1.4 Чтение бинарных диаграмм состояния	39
1.6.2 Фазы растворения, соединения и интерметаллические фазы	42
1.6.2.1 Классификация фаз сплавов ...	42
1.6.2.2 Свойства интерметаллических фаз	43
1.6.2.3 Классификация интерметаллических фаз	43
1.6.3 Диаграммы состояния с образованием соединений	45
1.6.3.1 Диаграммы состояния с открытым максимумом точки плавления	45
1.6.3.2 Диаграммы состояния со скрытым максимумом точки плавления	46
1.6.4 Системы сплавов с превращениями в твердом состоянии	47
1.6.4.1 Системы сплавов, компоненты которых имеют аллотропные модификации	47
1.6.4.2 Системы сплавов с эвтектидным распадом смешанных кристаллов	48
1.6.5 Реальные диаграммы состояния ..	48
1.6.6 Диаграммы состояния трехкомпонентных систем	49
2 Продукция черной металлургии ...	50
2.1 Чистое железо	50
2.2 Сплавы железа и углерода	51
2.2.1 Феррит, аустенит и σ -феррит	51
2.2.1.1 Вакансии в кристаллической решетке α - и σ -железа	52
2.2.1.2 Вакансии в решетке γ -железа ..	52
2.2.1.3 Растворимость углерода железа ...	53
2.2.2 Цементит и ϵ -карбид	53
2.2.3 Графит	54
2.3 Диаграмма состояния железо- углерод	54
2.3.1 Формы затвердевания сплавов железа и углерода	55
2.3.2 Структура метастабильной диаграммы состояния железо- углерод	56
2.3.2.1 Границы и области существования фаз	56
2.3.2.2 Линия ликвидуса	56
2.3.2.3 Линия солидуса	57
2.3.2.4 Наименования основных групп сплавов	57
2.3.3 Процессы затвердевания в метастабильной системе	57

2.3.4 «Стальной угол» метастабильной системы.....	61	5.3.1 Суть и цель.....	80
3 Стандартизация стали	65	5.3.2 Ликвации и их образование	80
3.1 Нелегированные стали с содержанием Mn < 1% (автоматные стали).....	66	5.3.3 Область применения.....	83
3.2 Нелегированные стали с содержанием Mn > 1%, нелегированные автоматные стали и легированные стали с содержанием отдельных легирующих элементов < 5%.....	67	5.3.4 Технология	83
3.3 Легированные стали с содержанием как минимум одного легирующего элемента $\geq 5\%$	67	5.3.5 Внутренние процессы.....	83
3.4 Быстрорежущие стали	68	5.3.6 Недостатки и проблемы диффузионного отжига	84
3.5 Дополнительные символы	70	5.4 Рекристаллизационный отжиг.....	84
4 Введение в термическую обработку сталей	70	5.4.1 Суть и цель.....	84
4.1 Цели термической обработки сталей.....	70	5.4.2 Область применения	85
4.2 Классификация методов термической обработки	70	5.4.3 Внутренние процессы.....	85
4.3 Принцип термической обработки ..	72	5.4.4 Температура рекристаллизации ..	86
5 Отжиг	74	5.4.5 Технология	87
5.1 Отжиг для укрупнения зерна (высокий отжиг)	74	5.4.6 Размер зерна после рекристаллизационного отжига.....	87
5.1.1 Суть и цель отжига для укрупнения зерна	74	5.4.6.1 Зависимость размера зерна от степени деформации при постоянной продолжительности отжига	88
5.1.2 Область применения	75	5.4.6.2 Зависимость размера зерна от температуры отжига при постоянной степени деформации	89
5.1.3 Технология	75	5.4.7 Увеличение размера зерна и вторичная рекристаллизация	89
5.1.4 Внутренние процессы.....	75	5.4.8 Преимущества и недостатки рекристаллизационного отжига.....	90
5.1.5 Образование крупных зерен	76	5.4.9 Отдых кристаллов.....	90
5.1.6 Недостатки отжига для укрупнения зерна.....	77	5.4.10 Холодная и горячая деформация ..	91
5.2 Отжиг для снятия напряжений	77	5.5 Нормализационный отжиг сталей ..	92
5.2.1 Собственные напряжения.....	77	5.5.1 Область применения	92
5.2.1.1 Виды собственных напряжений...77		5.5.2 Технология и внутренние процессы ..	93
5.2.1.2 Возникновение собственных напряжений.....	77	5.5.3 Продолжительность нормализационного отжига	94
5.2.1.3 Последствия собственных напряжений	78	5.6 Мягкий отжиг сталей (отжиг на шаровидные карбиды)	95
5.2.2 Суть и цель	78	5.6.1 Область применения	95
5.2.3 Область применения	79	5.6.2 Технология	95
5.2.4 Технология	79	5.6.3 Внутренние процессы.....	96
5.2.5 Внутренние процессы.....	79	6 Закалка	98
5.2.6 Границы применения.....	79	6.1 Суть и цель закалки	98
5.3 Диффузионный (гомогенизационный) отжиг	80	6.2 Принцип закалки.....	98
		6.3 Температура закалки	99
		6.4 Скорость охлаждения и образование кристаллической структуры.....	100
		6.4.1 Перлитные превращения.....	101
		6.4.1.1 Очень медленное охлаждение в перлитной области.....	101
		6.4.1.2 Ускоренное охлаждение в перлитной области.....	102
		6.4.2 Бейнитные превращения.....	103
		6.4.3 Мартенситные превращения.....	105
		6.5 Мартенсит.....	107

6.5.1 Основы образования мартенсита.....	107	6.13 Диаграммы время – температура аустенизации	140
6.5.2 Формы существования мартенсита.....	109	6.13.1 Непрерывные диаграммы ВТА.....	141
6.5.3 Кристаллография образования мартенсита.....	110	6.13.1.1 Аустенизация доэвтектоидных сталей.....	141
6.5.4 Элементарная ячейка мартенсита.....	113	6.13.1.2 Аустенизация заэвтектоидных сталей.....	143
6.5.5 Критическая скорость охлаждения.....	114	6.13.2 Изотермические диаграммы ВТА.....	145
6.5.5.1 Нелегированные стали.....	115	6.13.2.1 Аустенизация доэвтектоидных сталей.....	145
6.5.5.2 Легированные стали.....	115	6.13.2.2 Аустенизация заэвтектоидных сталей.....	145
6.5.5.3 Заключение	116	6.13.3 Определение точности диаграмм ВТА	146
6.6 Растворимость углерода аустенита.....	117	6.13.4 Практические указания по аустенизации	146
6.7 Диапазон температур образования мартенсита.....	117	6.14 Методы определения твердости	147
6.8 Остаточный аустенит и глубокое охлаждение.....	119	6.14.1 Классификация методов определения твердости	147
6.9 Твердость после закалки	120	6.14.2 Метод определения твердости по Бринеллю.....	148
6.10 Закалочное напряжение.....	121	6.14.3 Метод определения твердости по Виккерсу.....	150
6.11 Мгновенное охлаждение.....	124	6.14.4 Метод определения твердости по Роквеллу.....	152
6.11.1 Основы процесса мгновенного охлаждения.....	124	6.14.5 Сравнение методов определения твердости	155
6.11.2 Параметры средств мгновенного охлаждения и их назначение.....	124	6.14.6 Переоценка значений твердости	156
6.11.3 Средства мгновенного охлаждения.....	126	6.15 Проверка закалочной способности – испытание на прокаливаемость методом торцевой закалки.....	157
6.12 Диаграммы время – температура превращений	128		
6.12.1 Диаграмма состояния нелегированных сталей.....	128	7 Отпуск и термическое улучшение	160
6.12.2 Значение диаграмм ВТП	129	7.1 Отпуск.....	160
6.12.3 Непрерывные диаграммы ВТП.....	129	7.1.1 Суть и цель отпуска.....	160
6.12.3.1 Создание непрерывных диаграмм ВТП.....	129	7.1.2 Внутренние процессы при отпуске.....	161
6.12.3.2 Примеры считывания	131	7.1.3 Отпуск нелегированных сталей.....	164
6.12.3.3 Составление непрерывных диаграмм ВТП.....	133	7.1.3.1 Влияние температуры отпуска	164
6.12.4 Изотермические диаграммы ВТП.....	133	7.1.3.2 Влияние продолжительности отпуска	164
6.12.4.1 Структура изотермических диаграмм ВТП.....	134	7.1.4 Отпуск легированных сталей....	165
6.12.4.2 Примеры считывания	134	7.1.4.1 Отпуск сталей с элементами, не образующими карбид.....	166
6.12.4.3 Составление изотермических диаграмм ВТП.....	135		
6.12.5 Диаграммы ВТП заэвтектоидных сталей	136		
6.12.6 Границы применения диаграмм ВТП	138		
6.12.7 Влияние элементов сплава на превращение аустенита.....	138		

7.1.4.2 Отпуск сталей с элементами, образующими карбид.....	166	8.3.1 Введение в цементацию.....	197
7.1.5 Явления охрупчивания при отпуске сталей.....	167	8.3.2 Принцип цементации.....	197
7.1.5.1 Охрупчивание при 300 °С.....	167	8.3.3 Обуглероживание.....	198
7.1.5.2 Охрупчивание при 500 °С (охрупчивание при отпуске).....	168	8.3.3.1 Принцип обуглероживания.....	198
7.1.6 Изменения объема в результате отпуска.....	169	8.3.3.2 Глубина обуглероживания.....	199
7.1.7 Схемы отпуска.....	170	8.3.3.3 Науглероживание и обезуглероживание.....	199
7.1.8 Отпуск: резюме.....	170	8.3.3.4 Среды и методы обуглероживания.....	200
7.2 Термическое улучшение.....	171	8.3.4 Нитроцементация.....	205
7.2.1 Суть и цель термического улучшения.....	171	8.3.4.1 Принцип нитроцементации.....	205
7.2.2 Принцип термического улучшения.....	172	8.3.4.2 Средства обработки для нитроцементации.....	206
7.2.3 Внутренние процессы при термическом улучшении.....	172	8.3.4.3 Технология нитроцементации.....	207
7.2.4 Глубина термического улучшения.....	173	8.4.4.4 Преимущества и недостатки нитроцементации.....	208
7.2.5 Схемы отпуска для термического улучшения.....	175	8.3.5 Закалка краевого слоя.....	209
7.2.6 Термически улучшенные стали.....	175	8.3.5.1 Температура закалки.....	209
7.2.6.1 Использование термически улучшенных сталей.....	176	8.3.5.2 Твердость поверхности.....	210
7.2.6.2 Стандартизация термически улучшенных сталей.....	176	8.3.5.3 Технология закалки.....	210
7.2.6.3 Легирующие элементы в термически улучшенных сталях.....	181	8.3.6 Глубина цементации.....	213
7.2.7 Специальные методы термического улучшения.....	182	8.3.7 Глубокое охлаждение.....	213
7.2.7.1 Изотермическая закалка.....	182	8.3.8 Отпуск.....	214
7.2.7.2 Патентирование.....	184	8.3.9 Цементируемые стали.....	214
8 Технология поверхностной закалки.....	185	8.3.9.1 Свойства цементируемых сталей.....	214
8.1 Введение в технологию поверхностной закалки.....	186	8.3.9.2 Стандартизация цементируемых сталей.....	214
8.2 Поверхностная закалка.....	186	8.3.9.3 Легирующие элементы в цементируемых сталях.....	216
8.2.1 Методы поверхностной закалки.....	186	8.4 Азотирование и карбонитрация.....	217
8.2.1.1 Закалка погружением.....	187	8.4.1 Введение в азотирование и карбонитрацию.....	217
8.2.1.2 Газопламенная закалка.....	188	8.4.2 Структура азотированных слоев.....	218
8.2.1.3 Индукционная закалка.....	189	8.4.2.1 Соединительный слой.....	218
8.2.1.4 Лазерная закалка.....	192	8.4.2.2 Диффузионный слой.....	220
8.2.1.5 Электронно-лучевая закалка.....	192	8.4.3 Кривая изменения твердости и глубина азотирования.....	222
8.2.1.6 Сравнение методов поверхностной закалки.....	193	8.4.3.1 Твердость соединительного слоя.....	222
8.2.2 Показатели испытаний при поверхностной закалке.....	194	8.4.3.2 Твердость диффузионного слоя.....	223
8.2.3 Материалы для поверхностной закалки.....	195	8.4.3.3 Глубина азотирования.....	223
8.3 Цементация.....	197	8.4.4 Методы азотирования.....	224
		8.4.4.1 Газовое азотирование.....	224
		8.4.4.2 Плазменное азотирование.....	225
		8.4.5 Метод карбонитрации.....	226
		8.4.5.1 Порошковая карбонитрация.....	227
		8.4.5.2 Карбонитрация в соляной ванне.....	227
		8.4.5.3 Газовая карбонитрация.....	228
		8.4.5.4 Плазменная карбонитрация.....	228
		8.4.6 Сравнение методов азотирования и карбонитрации.....	229
		8.4.7 Преимущества и недостатки азотирования и карбонитрации.....	229

8.4.8 Применение азотирования и карбонитрации.....	231	10.2 Текстовые данные и данные о состоянии.....	242
8.4.9 Азотированные стали.....	232	10.2.1 Метод термической обработки.....	242
8.5 Борирование.....	233	10.2.2 Твердость поверхности.....	242
8.5.1 Введение в борирование.....	233	10.2.3 Глубина закалки.....	243
8.5.2 Структура и толщина слоев бора.....	233	10.2.4 Глубина обуглероживания (CD).....	244
8.5.2.1 Соединительный слой.....	233	10.2.5 Толщина соединительного слоя (CLT).....	244
8.5.2.2 Диффузионная зона.....	234	10.3 Параметры термически обработанных заготовок.....	245
8.5.2.3 Толщина слоя при борировании.....	234	10.3.1 Глубина поверхностной закалки.....	245
8.5.3 Значения твердости и кривые изменения твердости.....	235	10.3.2 Глубина закалки плавлением.....	246
8.5.4 Методы борирования.....	235	10.3.3 Глубина цементации.....	247
8.5.4.1 Борирование в твердых средах.....	235	10.3.4 Глубина азотирования.....	248
8.5.4.2 Борирование в жидких средах.....	236	10.4 Графическое изображение данных термической обработки.....	249
8.5.4.3 Борирование в газообразных средах.....	236	10.4.1 Термическая обработка всей заготовки.....	249
8.5.5 Материалы для борирования.....	236	10.4.2 Локальная термическая обработка.....	249
8.5.6 Преимущества и недостатки борирования.....	237	10.4.3 Маркировка точек измерения.....	250
8.5.7 Указания по исполнению заготовок, подлежащих борированию.....	238	10.5 Термическая обработка в иллюстрациях.....	251
8.6 Другие методы поверхностной закалки (метод диффузии металла).....	238	10.6 Инструкция по термической обработке и план термической обработки.....	251
9 Правила поведения и меры предосторожности для охраны здоровья.....	241	10.7 Заключение.....	252
10 Данные для термической обработки на технических чертежах.....	242	11 Русско-английские термины.....	254
10.1 Область применения и действие символов.....	242	12 Сборник задач.....	261

Предисловие

Когда сегодня в обществе говорят о высоких технологиях, обычно имеют в виду информационные технологии и системы автоматизации. Иногда к ним относят также авиационно-космическое оборудование. И только специалисты знают, что многие **области материаловедения** также относятся к высоким технологиям. Многие машины, установки и приборы достигли своего сегодняшнего уровня производительности только благодаря созданию новых или совершенствованию уже существующих материалов. Умение изготавливать, обрабатывать и применять материалы с более высокими эксплуатационными характеристиками будет постепенно играть все большую роль в создании новых, более конкурентоспособных продуктов и технологий и тем самым внесет значительный вклад в эффективное использование ресурсов и охрану окружающей среды.

Среди множества существующих материалов **сталь** по-прежнему занимает особое место и является наиболее активно используемой группой материалов, так как на ее свойства можно в значительной степени влиять путем изменения химического состава (легирования) или термической обработки, адаптируя их к требованиям конкретного производства.

Если говорить о целенаправленной адаптации свойств материала к производственным условиям, то здесь первостепенное значение принадлежит термической обработке. При этом под термической обработкой понимается процесс, в ходе которого заготовку подвергают температурному воздействию в течение определенного времени, а также при необходимости другим дополнительным физическим и химическим методам воздействия, чтобы придать ей необходимые для дальнейшей обработки свойства (например, повысить прочность или улучшить износостойкость).

Сегодня для правильного выбора и применения термической обработки недостаточно одного опыта и знания методики. Разнообразие сортов стали, которые все больше отличаются друг от друга своими свойствами и методами обработки, а также сужающиеся границы применения во все возрастающей степени требуют понимания сути этой группы материалов. Знание взаимосвязи структуры, строения и свойств, а также возможности их изменения приобретают все большее значение. Поэтому в данном учебном пособии особое внимание было уделено как изложению **основ теории металлов и сплавов**, так и подробному описанию определенных методов термической обработки, сопровождающихся **изменением свойств материалов**.

Термическая обработка стали представляет собой сложную и многоплановую область знаний, которую невозможно полностью осветить в учебных пособиях по материаловедению в связи с их ограниченным объемом. Но, с другой стороны, и студенты, и специалисты-практики едва ли в состоянии изучить огромное количество доступной литературы, посвященной отдельным аспектам термической обработки. Цель данного учебного пособия по термической обработке стали — сформировать у читателя фундаментальное **общее представление**. Для углубления полученных знаний в конце книги будет предложен список литературы по данной теме.

Данное 11-е издание по сравнению с предыдущим, 10-м, более адаптировано к современному уровню стандартизации.

Структура книги не только позволяет использовать ее как основу для проведения занятий по изучению оборудования для термической обработки стали, но и дает возможность читателю самостоятельно приобрести ценные знания в этой области. Мы старались подать материал таким образом, чтобы он был в равной степени интересным и полезным как для квалифицированных рабочих, так и для тех, кто еще только постигает азы профессии. Специалистам-практикам эта книга также может дать углубленные знания, которые позволят им оптимизировать выбор материалов и технологий с учетом качества и производственных издержек, а также выявлять и устранять ошибки, возникающие в процессе термической обработки.

Мы понимаем, что в одной книге невозможно описать все существующие методы и технологии, поэтому будем благодарны за предложения по улучшению данного издания и указания на ошибки, которые вы можете направлять на адрес издательства или по электронной почте (lektorat@europa-lehrmittel.de).

1 Основы металловедения

Макроскопические свойства металлов и происходящие при их изменении внутренние процессы можно объяснить только исходя из их микроскопического строения. Поэтому в следующих разделах будут изложены основы металловедения, от атома до реальной кристаллической структуры, как минимум, в объеме, необходимом для понимания внутренних процессов, происходящих при термической обработке.

1.1 Строение атома

Свойства металла определяются его внутренним строением. Для понимания и оценки свойств материала, а также процессов, происходящих при их целенаправленном изменении, например, путем термической обработки, следует начинать с мельчайших составляющих материи — атомов. Поэтому в разделе 1.1 речь пойдет о строении атомов.

1.1.1 Элементарные частицы и модели атомов

Еще в средние века люди задумывались о строении материи. Греческий философ **Демокрит** (460–371 г. до н. э.) обосновал идею о том, что материю невозможно делить до бесконечности и что при продолжении деления мы в конце концов обязательно обнаружим первоначальные частицы, не поддающиеся дальнейшему делению. Эти неделимые частицы Демокрит назвал **атомами** (греч. *atomos* – неделимый). Согласно теории Демокрита, существуют только атомы и пустое пространство. Различные тела образуются в результате объединения разного количества атомов в разных положениях.

Лишь в 1808 году **Джон Дальтон** (1766–1844) заново открыл старый принцип Демокрита и обосновал современную теорию атома. Дальтон объединил представление об атоме с понятием элемента и в результате пришел к следующим выводам, которые, впрочем, в свое время не смог доказать:

- Материя состоит из мельчайших атомов, которые невозможно разделить на более мелкие частицы, создать и разрушить.
- Каждый элемент состоит из определенного вида атомов. Все атомы одного элемента одинаковы. Атомы разных элементов отличаются друг от друга размером и массой.
- При химических процессах общая масса всех участников реакции остается неизменной, следовательно, атомы также неизменны.
- При образовании соединения атомы и элементы соединяются в определенном численном соотношении. Этим объясняется постоянный состав химических соединений.

Если Демокрит и Дальтон придерживались мнения о том, что атомы являются неделимыми частицами материи, то английский физик **Джозеф Джон Томсон** в 1897 году открыл частицы, которые были меньше и легче самого легкого атома, атома водорода. Эти частицы с отрицательным электрическим зарядом получили название **электроны** (греч. *elektron* – янтарь). Однако сначала все еще считалось, что атомы представляют собой мельчайшие, одинаково положительно заряженные шарики, в которые встроены более легкие электроны (**модель атома Томсона**, 1897 г.). Но представление о компактном строении атома немного позже

📌 Информация

Представление Демокрита об атоме

Материя состоит из мельчайших, не поддающихся дальнейшему делению частиц – атомов. Между атомами находится пустое пространство.

📌 Информация

Гипотеза атома Дальтона

Дальтон предположил, что атомы являются неделимыми и имеют определенную неизменную массу. Он считал эти массы невообразимо малыми и думал, что их никогда не удастся определить.

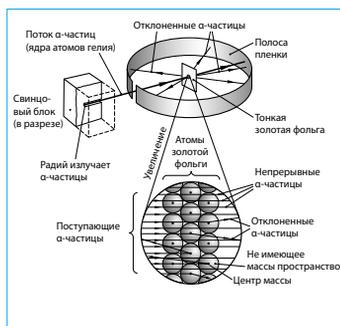


Рис. 1.1: Опыт Резерфорда с золотой фольгой (1911 г.)

было опровергнуто **Эрнестом Резерфордом** (1871–1957). В 1911 году Резерфорду и его сотрудникам удалось произвести эксперимент, который позже стал известен как **опыт Резерфорда с золотой фольгой** (рис. 1.1).

Тонкая золотая фольга (толщиной 0,002 мм) бомбардируется ядрами атомов гелия (α -частицами). Вокруг фольги по кругу установлена полоса пленки, которая затемнялась попадавшими на нее α -частицами. Опыт дал совершенно неожиданный результат. Преобладающая часть α -частиц беспрепятственно проходила сквозь золотую фольгу («это было похоже на стрельбу по призраку»). Отсюда можно сделать вывод, что атомы большей частью состоят из «не имеющего массы пространства». Поскольку уже открытый электрон представляет собой элементарную частицу, почти не имеющую массы, можно было предположить, что электроны заполняют собой большую часть атома, то есть его электронную оболочку. Примерно одна 1000000-ая α -частица отклоняется или отскакивает обратно таким образом, что частицы «рассеиваются» по полосе пленки.

Подобные эксперименты, проведенные с фольгой из других металлов (алюминия, меди, серебра и платины), дали аналогичные результаты. Из этих экспериментов Резерфорд сделал вывод о том, что большая часть объема атома пуста, так как α -частицы почти беспрепятственно проходят через множество слоев атома. Следовательно, масса атома должна концентрироваться в ничтожно малом центре. Этот центр является ядром атома, которое имеет положительный заряд, о чем говорит отклонение положительно заряженных α -частиц. Пространственное расширение атома зависит от его оболочки. Она содержит электроны. Если до этого ученые представляли себе атомы как неделимые частицы, то опыты Резерфорда привели к появлению **ядерной модели** атома.

В 1913 году Резерфорд обнаружил в открытом еще в 1886 году канальном излучении газоразрядной трубки, наполненной газообразным водородом, частицу, противоположную электрону, которую он так долго искал. Он назвал эту встречающуюся в атомах частицу материи с положительным электрическим зарядом **протон** (греч. *protón* — первая, исходная частица). Таким образом была открыта вторая элементарная частица, участвующая в строении атома.

Нейтрон был открыт только в 1930 году немецкими физиками **В. Боте** и **Х. Беккером**, но они интерпретировали его как γ -излучение, обладающее большим запасом энергии. Только английский физик **Д. Чедвик** в 1932 году доказал, что речь идет о нейтральных частицах, масса которых приблизительно равна массе протона. Постулат о существовании нейтронов выдвинул еще Резерфорд в 1920 году. Название «нейтрон» было предложено **У. Д. Харкинсом** в 1921 году.

Электроны, протоны и нейтроны – это **элементарные частицы**, участвующие в строении атома (таблица 1.1). В результате комбинации атомных ядер, состоящих из протонов и нейтронов, с атомными оболочками, состоящими из электронов, образуются 112 известных на сегодняшний день **элементов**. Отдельные виды атомов отличаются друг от друга разным количеством этих элементарных частиц. Из элементов образуются миллионы молекул химических соединений, а из них в свою очередь создается бесконечное многообразие форм существования живой и неживой природы.

Информация

Представление Демокрита об атоме

Материя состоит из мельчайших, не поддающихся дальнейшему делению частиц – атомов. Между атомами находится пустое пространство.

Таблица 1.1: Элементарные частицы, участвующие в строении атома

Заряд	Электрон(ы) Отрицательный(е)	Протон(ы) Положительный(е)	Нейтрон(ы) Нейтральный
	$-1,602 \cdot 10^{-19}$ Ас	$+1,602 \cdot 10^{-19}$ Ас	0 Ас
Масса покоя ¹⁾	$9,11 \cdot 10^{-31}$ кг = 0,00055 <i>u</i>	$1,6725 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00728 <i>u</i>	$1,6748 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00867 <i>u</i>

¹⁾ $1u$ = атомная единица массы. Она определена как 1/12 абсолютной массы нуклида углерода ^{12}C ($1u = 1,6606 \cdot 10^{-27}$ кг).

Сегодня известно несколько сотен элементарных частиц, которые, однако, не участвуют в строении атома. Обычно различают две группы элементарных частиц в зависимости от их массы:

- «легкие» **лептоны** (греч. *leptos* – легкий);
- «тяжелые» **адроны** (греч. *hadross* – крупный, массивный).

Каждая элементарная частица имеет свою античастицу. Например, существование **античастицы** электрона, **позитрона**, было предсказано еще в 1928 году и фактически открыто в космическом излучении в 1932 году.

Большое количество известных элементарных частиц позволяет предполагать, что они представляют собой не исходные структурные элементы, а, в свою очередь, состоят из еще более мелких частиц. Если подструктура лептона еще вызывает сомнения, то адроны состоят из более мелких элементов, **кварков**. Различают адроны, состоящие из двух кварков, **мезоны**, и адроны с тремя кварками, **барионы**, к которым относятся протоны и нейтроны (в 1966 году это было доказано экспериментально). Однако данное пособие не предполагает более глубокого рассмотрения этого вопроса. В источнике [10] подробно описаны свойства основных элементарных частиц. В рамках материаловедения достаточно классической картины трех участвующих в строении атома элементарных частиц: электрона, протона и нейтрона.

Исходя из вышеизложенного, строение атома можно представить следующим образом:

1. Атом состоит из очень малого **ядра атома** ($\varnothing 10^{-14}$ – 10^{-15} м) и окружающей ядро атомной или **электронной оболочки** ($\varnothing 10^{-10}$ м).
2. Очень малое ядро атома состоит из положительно заряженных частиц, протонов и (за исключением атома водорода) незаряженных частиц, нейтронов. Оболочка атома занята только отрицательно заряженными электронами. Количество протонов в ядре (**зарядовое число**) также служит **порядковым номером в периодической системе элементов (ПСЭ)**.
3. В электронейтральном атоме количество протонов (+) в ядре должно быть равно количеству электронов (-) в оболочке. Если нейтральный атом теряет один или несколько электронов, он становится одно- или многократно положительно заряженным **ионом (катионом)**. Если к нейтральному атому добавляется один или несколько электронов, возникает одно- или многократно отрицательно заряженный ион (**анион**).
4. Большая часть массы атома сконцентрирована в ядре. Масса частиц ядра (протона и нейтрона) примерно одинакова, тогда как масса электрона составляет всего 1/1836 массы протона (таблица 1.1).

1.1.2 Электронная оболочка

При химических процессах в электронной оболочке атомов постоянно происходят изменения, тогда как ядра атомов совершенно не меняются. Поэтому структура и поведение электронной оболочки имеют особое значение для химии и, следовательно, для материаловедения.

Положительные заряды (протоны) атомного ядра компенсируются соответствующим количеством отрицательных зарядов (электронов) в электронной оболочке. При этом электроны в составе оболочки окружают ядро атома не хаотично, а распределяются равномерно. Микроструктура электронной оболочки представлена в разработанной датским физиком **Нильсом Бором** (1885–1962) и названной его именем **Боровской**

Информация

Плотность атомов

Кубик железа (Fe) с гранью длиной 10 м и соответствующим объемом 1000 м^3 весит около 7600 тонн.

Но весь объем, занятый ядрами атомов железа, составляет менее 1 мм^3 . Оставшийся объем практически не имеет массы и заполнен только силовыми полями.

Следовательно, плотность атома меньше, чем плотность нашей планетарной системы, если сравнить ядро атома с Солнцем, а окружающие его электроны — с планетами.

модели атома. Согласно этой модели, электроны движутся вокруг ядра атома по пространственным **орбитам**, подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца. Поэтому данная модель атома получила еще одно название – **планетарная модель**.

В атомах с несколькими электронами они «вращаются» вокруг атомного ядра по определенным траекториям (оболочкам) (рис. 1.2). В результате своего движения электроны приобретают кинетическую энергию (энергию движения), а вследствие силы притяжения положительного ядра атома – также потенциальную энергию (энергию положения). Поэтому каждый электрон обладает совершенно определенным энергетическим состоянием в зависимости от оболочки, на которой он находится. Поэтому отдельные орбиты Боровской модели атома можно сравнить с разными прерывистыми энергетическими уровнями.

Электроны в электронной оболочке распределяются по разным уровням энергии, которые для наглядности можно отождествить с электронными оболочками Боровской модели атома.

Оболочку атома можно разделить максимум на 7 оболочек, которые обозначаются по направлению изнутри наружу цифрами от 1 до 7, **главными квантовыми числами**, или заглавными буквами К, L, M, N и т. д. 1-я оболочка (оболочка К) находится ближе всех к ядру атома, а 7-я (оболочка Q), напротив, максимально удалена от него. В свою очередь, оболочки (за исключением первой) делятся на максимум n подуровней, обозначенных буквами s, p, d, f и т. д. (таблица 1.2). Подуровни характеризуют орбитальное квантовое состояние соответствующего электрона, причем в химии обычно рассматривают только подуровни s, p, d и f.

В результате притока энергии (например, тепла) или столкновения с другими электронами отдельные электроны атома могут на короткое время переместиться на удаленную дальше от ядра оболочку и, следовательно, на более высокий энергетический уровень. Возвращаясь на свою первоначальную оболочку, они снова отдают избыточную энергию в форме электромагнитного излучения. Этот эффект используется, например, при генерировании рентгеновского излучения в рентгеновской трубке.

Если приток энергии достаточно велик, потенциальная энергия электрона может стать настолько большой, что он отделяется от атома и становится свободным. В результате атом теряет электрон и превращается в положительно заряженный ион (катион). Этот процесс играет роль, например, при плазменном азотировании (раздел 8.4.4.2).

Расположение и наполнение электронами отдельных оболочек подчиняется определенным закономерностям:

1. Наполнение оболочек электронами обычно осуществляется таким образом, что сначала заполняются состояния меньшей энергии. Соответственно, заняли сначала 1-ю оболочку, затем 2-ю оболочку и т. д. Однако, как только внешняя оболочка занята восемью электронами, достигается стабильный промежуточный продукт, и хотя в рассматриваемой оболочке может быть поглощено больше электронов, электронами заполняется следующая более высокая оболочка. Только после заполнения этой более

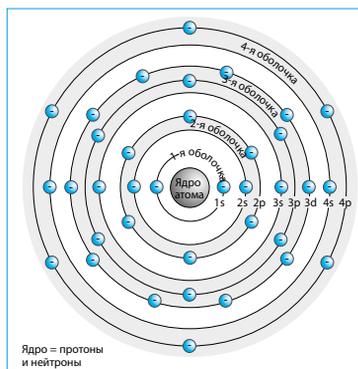


Рис. 1.2: Боровская модель электронной оболочки (изображение до подуровня 4p)

Таблица 1.2: Строение уровней электронной оболочки

Оболочка	Главное квантовое число n	Подуровни	Максимальное количество электронов
Подуровень К	1	1s	2
Подуровень L	2	2s	2
		2p	6
Подуровень M	3	3s	2
		3p	6
		3d	10
Подуровень N	4	4s	2
		4p	6
		4d	10
		4f	14
Подуровень O	5	5s	2
		5p	6
		5d	10
Подуровень P	6	6s	2
		6p	6
		6d	10
		6f	14
Подуровень Q	7	7s	2