

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Т. М. Ткаченко

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве
учебного пособия для студентов учреждений высшего образования
по специальностям «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства
(по направлениям)», «Автоматизация технологических процессов
и производств (по направлениям)»*

Минск
БГАТУ
2022

УДК 621.31(07)
ББК 31.2я7
Т48

Рецензенты:

кафедра физики твердого тела Белорусского государственного
университета
(доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой *В. В. Углов*);
кандидат физико-математических наук, главный специалист отдела
организации исследований и использования результатов
Белорусского республиканского фонда фундаментальных
исследований *Т. В. Шёлковая*

Ткаченко, Т. М.

Т48 Электротехнические и конструкционные материалы : учебное
пособие / Т. М. Ткаченко. – Минск : БГАТУ, 2022. – 212 с.
ISBN 978-985-25-0184-2.

Содержит краткую теорию курса «Электротехнические и конструкционные материалы». Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства» (по направлениям), 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (по направлениям)», а также может быть полезно инженерам-электрикам, занятым эксплуатацией электротехнического оборудования.

УДК 621.31(07)
ББК 31.2я7

ISBN 978-985-25-0184-2

© БГАТУ, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ	8
Свойства материалов	8
Способы исследований механических свойств	8
Твердость материала	13
РАЗДЕЛ 1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	19
1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ	19
1.1. Кристаллическое строение металлов и сплавов	19
1.2. Основные свойства кристаллов	21
1.3. Кристаллизация металлов из расплава	23
1.4. Дефекты кристаллических структур	24
1.5. Способы улучшения качества металла при выплавке	26
1.6. Кривая нагревания – охлаждения чистого металла	27
1.7. Сплавы. Виды сплавов	28
1.8. Простейшие диаграммы состояний сплавов	29
1.9. Способы обработки металлов и сплавов	32
1.10. Стали и чугуны	34
1.10.1. Стали	37
1.10.2. Влияние примесей на свойства сталей	37
1.10.3. Классификация сталей	38
1.10.4. Чугуны	39
1.10.5. Общая классификация чугунов	40
1.11. Сплавы цветных металлов	41
1.11.1. Сплавы меди	41
1.11.2. Сплавы алюминия	42
1.11.3. Сплавы титана	43
1.11.4. Сплавы цинка	43
1.11.5. Сплавы никеля	43
1.12. Получение металлических заготовок	44
1.12.1. Литье	44
1.12.2. Необходимые литейные свойства сплава	45
1.12.3. Получение заготовок давлением	46
1.12.4. Получение заготовок резанием	49
1.12.5. Сварка	51
1.13. Защита металлических материалов от коррозии	53
1.13.1. Консервационные материалы	54
1.13.2. Ингибиторы коррозии	55
1.14. Антифрикционные материалы	56

1.14.1. Металлические антифрикционные материалы	58
1.14.2. Неметаллические антифрикционные материалы	59
2. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	59
2.1. Полимерные материалы. Пластмассы и эластомеры	60
2.1.1 Пластмассы	61
2.1.2. Преимущества пластмасс	64
2.1.3. Недостатки пластмасс	64
2.1.4. Маркировка пластмасс.	65
2.1.5. Методы получения заготовок из пластмасс	67
2.1.6. Эластомеры	68
2.1.7. Основные типы синтетических каучуков	68
2.2. Керамические конструкционные материалы	69
2.2.1. Достоинства и недостатки керамических материалов	70
2.2.2. Техническая керамика	72
2.2.3. Применение керамики в электротехнике	73
2.3. Неорганическое стекло	73
2.3.1. Структура стекла	73
2.3.2 Классификация стекол	75
2.3.3. Свойства неорганических стекол	76
2.3.4. Достоинства и недостатки стекла	76
2.3.5. Основные промышленные виды неорганических стекол	77
2.3.6. Материалы на основе стекол	77
3. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	78
3.1. Основная классификация композитов	80
3.2. Металлические композиты	82
3.3 Композиционные материалы с неметаллической матрицей	83
3.3.1. Полимерные композиционные материалы	83
3.3.2. Композиты из полимеров с порошковыми наполнителями	84
3.3.3. Текстолиты	85
3.3.4. Композиционные материалы на основе керамики	85
3.4. Нанокompозиты	86
3.4.1. Применение и перспективы нанокompозитов	88
РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	90

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСОБЫХ СВОЙСТВАХ МАТЕРИАЛОВ В ПОЛЯХ	90
2 ПОНЯТИЕ О ЗОННОЙ ТЕОРИИ ПРОВОДИМОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	91
3. ДИЭЛЕКТРИКИ	92
3.1. Классификация диэлектриков по внутреннему строению	93
3.2. Поляризация диэлектриков	95
3.3. Механизмы поляризации диэлектриков	98
3.4. Поляризация в электрическом поле	99
3.4.1. Электронная поляризация	99
3.4.2. Ионная поляризация	100
3.4.3. Дипольная (ориентационная) поляризация	101
3.4.4 Миграционная (объемная) поляризация	102
3.5. Поляризация в отсутствие внешнего электрического поля	102
3.5.1. Спонтанная поляризация	102
3.5.2. Поляризация за счет внешних неэлектрических воздействий	104
3.6. Классификация диэлектриков по механизму поляризации	104
3.6.1. Линейные (пассивные) диэлектрики	104
3.6.2. Нелинейные (активные) диэлектрики	105
3.6.3. Применение активных диэлектриков	107
3.7. Электропроводность диэлектриков	108
3.8. Диэлектрические потери	111
3.9. Пробой диэлектриков	114
3.10. Тепловые свойства диэлектриков	118
3.11. Электропроводность газов. Пробой газов	120
3.12. Примеры газообразных электроизоляционных материалов	123
3.13. Электропроводность жидкостей. Пробой жидкостей	124
3.13.1. Пробой жидких диэлектриков	126
3.13.2. Примеры жидких диэлектриков	126
3.14. Примеры твердеющих и твердых электроизоляционных материалов	128
3.14.1. Твердые электроизоляционные материалы	129
3.14.2. Твердеющие электроизоляционные материалы	130

4. ПРОВОДНИКИ	132
4.1. Общие сведения о проводниках. Природа проводимости металлов	132
4.2. Основные электротехнические характеристики проводников	134
4.3. Классификация проводниковых материалов	138
4.4. Проводники высокой удельной проводимости	139
4.5. Проводники высокого удельного сопротивления	142
4.6. Контактные материалы	145
4.6.1. Материалы для неподвижных контактов	145
4.6.2. Материалы для подвижных контактов	146
4.7. Углеродсодержащие проводниковые материалы	147
4.7.1. Новые углеродные материалы. Фуллерены	148
4.7.2. Графен	149
4.7.3. Углеродные нанотрубки	150
4.8. Сверхпроводники и криопроводники	151
5. ПОЛУПРОВОДНИКИ	154
5.1. Механизм проводимости полупроводников	154
5.2. Электротехнические характеристики полупроводников	160
5.3. Влияние внешних факторов на собственную электропроводность полупроводников	164
5.4. Электронно-дырочный переход	166
5.5. Применение полупроводников. Простейшие полупроводниковые компоненты	168
5.5.1. Транзистор	168
5.5.2. Диод	170
5.5.3. Терморезистор	170
5.5.4. Фоторезистор	171
5.5.5. Термоэлемент и фотоэлемент	172
5.5.6. Тензорезистор	173
5.5.7. Варистор	174
5.6. Основные группы современных полупроводниковых материалов	175
5.6.1. Некристаллические полупроводниковые материалы	180
5.6.2. Применение полупроводниковых материалов	181
6. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	181

6.1. Природа магнетизма	181
6.2. Основные электротехнические характеристики магнитных материалов	183
6.3. Классификация материалов по магнитным свойствам	184
6.3.1. Диамагнетики	184
6.3.2. Парамагнетики	185
6.3.3. Ферромагнетики	186
6.4. Ферриты	193
6.4.1. Особые свойства ферритов	194
6.4.2. Классификация ферритов	194
6.5. Классификация магнитных материалов по применению	195
6.5.1 Магнитомягкие материалы	196
6.5.2. Магнитотвердые материалы	198
6.5.3. Магнитные материалы специального назначения	202
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	207
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	208

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ

Свойства материалов Способы исследований механических свойств

Современная наука выделяет четыре уровня организации микромира: молекулярный, атомный, нуклонный и кварковый. Вещества состоят из молекул, а молекулы из атомов. Атом, в свою очередь, состоит из ядра и электронов, движущихся вокруг ядра. Движение электронов комплексное: во-первых, это движение по дискретным замкнутым орбитам (орбитальное) и одновременно, во-вторых, это вращение вокруг своей оси (спиновое). Ядро примерно в 10 тысяч раз меньше размера атома, почти вся его масса состоит из протонов и нейтронов, их общее название – нуклоны (от латинского *nucleus* «ядро»). Кварки – бесструктурные точечные частицы, участвующие в сильном взаимодействии.

Атом – мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая все химические свойства данного элемента. Молекула – наименьшая частица, сохраняющая свойства данного материала. Валентные электроны – электроны внешней оболочки атома, наиболее удаленные от ядра и потому наименее прочно связанные с ним. Взаимодействие валентных электронов соседних атомов приводит к образованию химических связей, т. е. к объединению атомов в молекулу. Различают несколько основных типов химических связей между атомами: ковалентная, ионная, металлическая и водородная связь, характерная для молекул некоторых веществ (рис. 1).

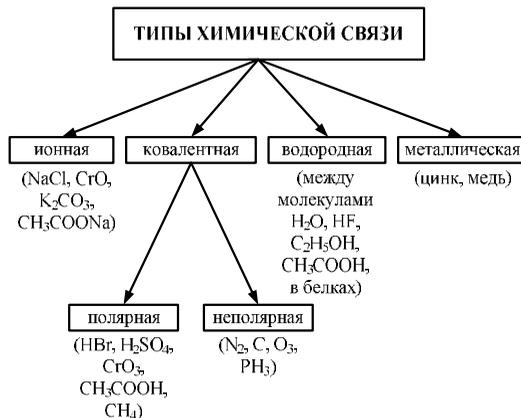


Рис. 1. Типы химической связи

Ковалентная связь – это связь, возникающая за счет образования общей пары электронов, принадлежащих двум соседним атомам. Ковалентная связь характерна для атомов неметаллов. Существует 2 типа ковалентной связи – неполярная и полярная. неполярная ковалентная связь (как правило, между одинаковыми атомами) возникает, когда внутри молекулы положительный и отрицательный заряды распределены сферически симметрично. Полярная ковалентная связь образуется, когда пара обобществленных электронов двух соседних атомов большую часть времени находится ближе к одному из атомов. В результате внутри молекулы центры положительного и отрицательного зарядов смещены один относительно другого на некоторое расстояние. Молекула, в которой положительный и отрицательный заряды распределены не симметрично, а смещены друг относительно друга, называется молекулярный диполь.

Ионная связь образуется за счет электростатического притяжения между противоположно заряженными ионами, образующимися за счет перехода электронов от одного атома к другому. Ионная связь, как правило, образуется между атомами, имеющими большие различия электроотрицательностей (сильно различающееся число электронов на внешнем валентном уровне).

Металлическая связь характерна для металлов, в результате чего все они имеют ряд общих свойств (высокая теплопроводность и электропроводность, повышенная способность к пластической деформации, хорошая отражательная способность – металлический блеск и др.). Атомы металла на внешнем валентном уровне имеют небольшое число электронов, при этом атомы имеют сравнительно большие радиусы. В результате валентные электроны (иногда не все) могут отрываться от атомов. Атомы превращаются в положительно заряженные «ионные остовы», а обобществленные электроны относительно свободно перемещаются по всему объему, образуя «электронный газ».

Расположение частиц в пространстве – атомов, групп атомов (молекул) или ионов формирует структуру материала – кристаллическую или аморфную. Кристаллическая структура материала характеризуется правильным (регулярным) расположением частиц (атомов, молекул или ионов) в строго определенных положениях в пространстве. Эти места называются узлами кристаллической решетки.

В аморфных твердых телах частицы располагаются хаотично, иногда они могут образовывать небольшие локальные группы, содержащие несколько частиц (ближний порядок).

Так формируются различные материалы.

При выборе материала для какого-либо его использования в технике подбирается нужная совокупность свойств. Свойства условно группируются как физические (механические, электрические, магнитные, тепловые и т. д.), химические, технологические (характеризующие обрабатываемость материала), эксплуатационные и т. д.

Иногда в отдельную группу собирают комплекс свойств, важных для частной задачи. Например, из физических свойств иногда выделяют механические, как наиболее важные при использовании материала в качестве конструкционного, то есть способного выдерживать в процессе эксплуатации механические нагрузки. К механическим свойствам материала относят прочность, упругость, пластичность, твердость, ударную вязкость и др.

Твердость – это способность материала сопротивляться поверхностной деформации под действием более твердого тела.

Прочность – способность материала сопротивляться разрушению под действием внешних сил.

Упругость – способность материала возвращаться к первоначальной форме после прекращения действия внешних сил.

Пластичность – свойство материала изменять свои размеры и форму под действием внешних сил, и сохранять эти изменения после прекращения действия сил.

Ударная вязкость – способность материала сопротивляться разрушению под действием динамической нагрузки.

Характеристики прочности и пластичности материала обычно определяют при испытаниях на статическое растяжение. При этом испытуемый образец закрепляют в захватах разрывной машины и деформируют при плавно возрастающей (статической) нагрузке. Чтобы исключить влияние размеров образца, испытание проводят на стандартных образцах с определенным соотношением между расчетной длиной l_0 и площадью поперечного сечения F_0 . Наиболее широко применяются образцы круглого сечения – стержни (рис. 2). По результатам испытаний строят диаграммы растяжения образца в координатах «нагрузка – деформация» или «напряжение – деформация» (пример исследований стали на рис. 3).

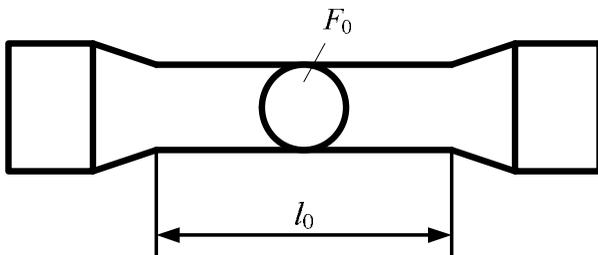


Рис. 2. Стандартный образец для испытаний на растяжение

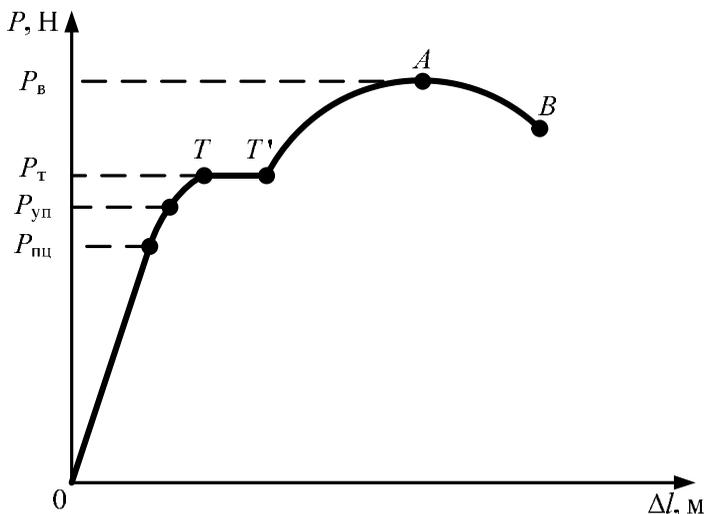


Рис. 3. Диаграмма растяжения образца из низкоуглеродистой стали:

$P_{уп}$ – сила, действующая на образец в момент прекращения действия закона Гука, $P_{т}$ – сила, приводящая к пластической деформации образца, $P_{в}$ – сила, приводящая к разрушению образца

По кривой растяжения определяют следующие характеристики механических свойств металла.

Предел упругости σ_y – максимальное напряжение, до которого образец испытывает только упругую деформацию, МПа:

$$s_y = \frac{P_{уп}}{F_0}, \quad (1)$$

где $P_{уп}$ – сила, действующая на образец в момент прекращения действия закона Гука, Н;

F_0 – площадь поперечного сечения образца, м².

Если напряжения меньше предела упругости σ_y , материал работает в области упругой деформации.

Предел текучести σ_T – это напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке, МПа:

$$s_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (2)$$

где P_T – сила, приводящая к пластической деформации образца, Н;

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – это напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,02 % от начальной длины.

Предел прочности (временное сопротивление разрыву) σ_B – это напряжение максимальной нагрузки, которую выдерживает образец до разрушения, МПа:

$$s_B = \frac{P_B}{F_0}, \quad (3)$$

где P_B – сила, приводящая к разрушению образца, Н.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к разрушению образца. Кроме характеристик прочности, определяют также характеристики пластичности. Основными характеристиками пластичности металлов являются относительное удлинение и относительное сужение.

Относительное удлинение (δ) определяется по формуле, %:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100 \%, \quad (4)$$

где l_0 и l_k – начальная и конечная длины образца до и после разрыва соответственно, м.

Относительное сужение (Ψ) определяется по формуле, %:

$$\Psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100 \%, \quad (5)$$

где F_0 и F_k – начальная и конечная площади поперечного сечения образца до и после испытания (разрушения) соответственно, m^2 .

Твердость материала

Наибольшее распространение на практике получили методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу (рис. 4). Для грубой оценки твердости материала пользуются также простым методом Мооса.

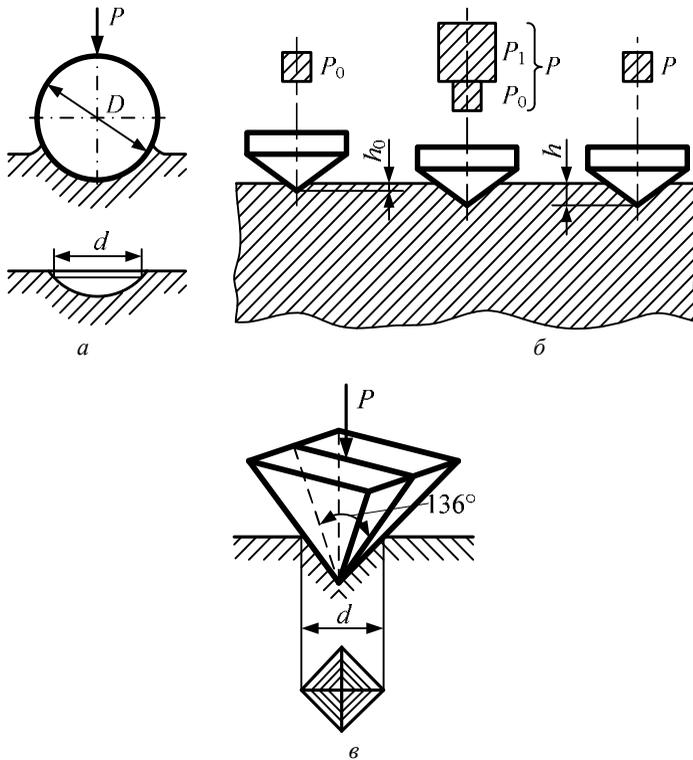


Рис. 4. Схема измерения твердости:

a – по Бринеллю (НВ); b – по Роквеллу; c – по Виккерсу; D – диаметр стального закаленного шарика, мм; d – диаметр (длина диагонали) отпечатка, мм; P – приложенная (общая) нагрузка, H ; P_0 и P_1 – предварительная и основная нагрузки соответственно, H ; h_0 и h_1 – глубина вдавливания индентора при предварительной и основной нагрузках соответственно, мм

Твердость по Моосу. Шкала Мооса используется для быстрой сравнительной диагностики твердости материалов при помощи царапания. Метод назван по фамилии его автора, Фридриха Мооса. Шкала представляет собой набор из десяти эталонных минералов, расположенных в порядке нарастания твердости. Каждому присвоен индекс системы Мооса от 1 до 10, табл. 1.

Таблица 1

Эталонные минералы в системе твердости по Моосу

Наименование материала	Твердость
Тальк	1
Гипс (или каменная соль)	2
Известковый шпат	3
Плавиновый шпат	4
Апатит	5
Полевой шпат (ортоглаз)	6
Кварц	7
Топаз	8
Корунд	9
Алмаз	10

Чтобы оценить неизвестный материал по твердости в системе Мооса, материал царапают эталонами и находят тот, который его уже не царапает. Таким образом, твердость испытываемого материала по шкале Мооса будет лежать в диапазоне последнего по счету царапающего эталона и первого не царапающего. Например, если материал повреждается апатитом, но не царапается флюоритом, то его твердость определяется в диапазоне от четырех до пяти по шкале Мооса. «Твердость 4–5» – так будет звучать характеристика данного минерала.

Данная методика предназначена для предварительной, грубой сравнительной оценки степени твердости материала.

Материалы, имеющие индекс ниже 7, считаются мягкими, выше 7 – твердыми. В целом подавляющее большинство природных соединений имеют индекс Мооса от 2 до 6 (табл. 2).

Твердости некоторых металлов по шкале Мооса

Наименование материала	Твердость
Олово	1,5
Цинк	2,5
Золото	2,5–3
Серебро	2,5–3
Алюминий	2,5–3
Медь	3
Бронза	3
Никель	4
Платина	4–4,5
Сталь	4–4,5
Железо	4,5
Палладий	4,75
Родий	6
Титан	6
Укрепленная сталь	7–8
Вольфрам	7,5
Карбид вольфрама	8,5–9

Твердость по Бринеллю обозначают HB (от английского Hardness Brinell). Твердость по Бринеллю определяют вдавливанием в поверхность металла стального закаленного шарика диаметром 2,5; 5 и 10 мм (рис. 4, а). Прикладываемая нагрузка задается в зависимости от вида испытываемого материала и размера образца. Значение твердости HB определяют отношением нагрузки (P) к площади сферической поверхности отпечатка ($F_{сф}$). Если вычислить поверхность отпечатка, имеющего форму шарового сегмента, то HB определится формулой

$$HB = \frac{2P}{\pi D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (6)$$

где P – приложенная нагрузка, кгс;

D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Обычно расчеты не производят, а пользуются готовыми стандартными таблицами, с помощью которых по диаметру полученного отпечатка (лунки) определяют число твердости НВ.

Твердость по Роквеллу. Твердость по Роквеллу HR определяют вдавливанием в поверхность испытуемого материала алмазного конуса с углом при вершине 120° , иногда стального закаленного шарика малого диаметра ($D = 1,6$ мм). Конус применяют для материалов с твердостью больше 230 НВ, а шарик – для материалов с твердостью меньше этой величины. Твердость определяется по глубине впадины (рис. 4, б).

Твердость по Роквеллу, в зависимости от твердости испытуемых материалов, обозначают с добавлением третьей буквы: HRA, HRB, HRC. Шкала С служит для испытания твердых материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 230 до 700 кгс/мм^2 , например, закаленной стали. Алмазный конус вдавливают под нагрузкой 150 кгс. Интервал измерения твердости по шкале С – от 22 до 68 единиц, твердость обозначается HRC. Шкала А используется при испытании очень твердых материалов, например, твердых сплавов или тонких поверхностных слоев ($0,5 \dots 1,0$ мм). Применяют тот же алмазный конус, но вдавливают под нагрузкой в 60 кгс. Значение твердости определяют по шкале С, но обозначают HRA. Интервал измерения твердости по этой шкале от 70 до 85 единиц.

Шкала В предназначена для испытания мягких материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 60 до 230 кгс/мм^2 , например, бронзы. Стальной шарик диаметром 1,59 мм вдавливают под нагрузкой в 100 кгс. Твердость измеряется в пределах от 25 до 100 единиц шкалы В и обозначается HRB.

Преимуществами способа измерения твердости по Роквеллу являются быстрота измерений, возможность измерять твердость закаленных сталей и других очень твердых материалов, а также тонких изделий, покрытий и слоев толщиной до $0,4\text{--}0,7$ мм.

Твердость по Виккерсу. Твердость по Виккерсу (рис. 4, в) определяют вдавливанием в поверхность алмазной четырехгранной пирамиды с углом между противоположными гранями $\alpha = 136^\circ$. Нагрузка от 5 до 100 кг. Измеряются обе диагонали отпечатка алмазной пирамиды. Используются таблицы для определения числа твердости по среднеарифметической длине диагоналей.

Преимущества метода Виккерса: можно измерять твердость как мягких, так и особо твердых, металлов и сплавов, твердость

поверхностных слоев после закалки, наклепа, цементации, азотирования, а также твердость покрытий. Метод имеет высокую точность.

Применение метода Виккерса для измерений микротвердости (твердости фаз в металлах, очень тонких поверхностных слоев и покрытий толщиной в сотые доли миллиметра) отличается только тем, что четырехгранная пирамида имеет меньшие размеры, и при вдавливании используются меньшие нагрузки: от 5 до 500 г.

Оценку ударной вязкости металлов проводят на маятниковых копрах. Для ударных испытаний используют надрезанные образцы. Вязкость оценивают по величине нагрузки, а также по виду излома образцов: кристаллическому – для хрупких материалов и волокнистому – для пластичных. Ударную вязкость обозначают KCV, KCU и KCT, где KC – символ ударной вязкости, третий символ показывает вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U), трещина (T).

Для проведения испытания образец устанавливают на маятниковом копре (рис. 5) надрезом в сторону, противоположную удару маятника, который поднимают на определенную высоту.

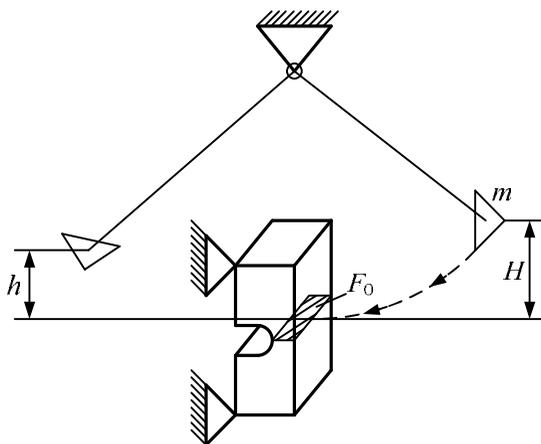


Рис. 5. Схема испытания на ударную вязкость (маятниковый копр)

На разрушение образца затрачивается работа A , Дж:

$$A = m \cdot (H - h), \quad (7)$$

где m – вес маятника, кг;

H и h – высоты подъема маятника до и после удара соответственно, м.

Значение ударной вязкости КС определяется по формуле

$$КС = \frac{A}{F_0}, \quad (8)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения в месте надреза, м².

Технологические свойства материалов определяют пригодность материала для изготовления из него детали тем или иным способом, то есть характеризуют способность материала подвергаться различным способам холодной и горячей обработки. Это литейные свойства, деформируемость, свариваемость, обрабатываемость режущим инструментом и т. п.

Технологические свойства определяют при технологических пробах, которые дают качественную оценку пригодности металлов к тем или иным способам обработки. Образец, подвергнутый технологической пробе, осматривают. Признаком того, что образец выдержал испытание, является отсутствие трещин, надрывов, расслоения или излома и т. д.

Эксплуатационные свойства материалов характеризуют способность материала работать в конкретных условиях:

- износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения;
- коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться действию агрессивных кислотных и щелочных сред;
- жаростойкость – способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре;
- жаропрочность – это способность материала сохранять прочность и твердость при высоких температурах;
- хладостойкость – способность материала сохранять пластические свойства при отрицательных температурах;
- антифрикционность – способность материала прирабатываться к другому материалу.

РАЗДЕЛ 1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Конструкционные материалы – материалы, предназначенные для изготовления деталей, воспринимающих в процессе эксплуатации механическую нагрузку.

Условная классификация конструкционных материалов представлена на рис. 6.



Рис. 6. Условная классификация конструкционных материалов

Черные металлы и сплавы – это железо и сплавы, в которых основным компонентом является железо. Основные сплавы железа – чугун и сталь (железо с углеродом). К черным металлам условно относят также хром и марганец.

Цветные металлы и сплавы: легкие – бериллий, магний, алюминий. Их сплавы нашли широкое применение в авиации, космической и автомобильной технике, благородные – серебро, золото, платина и др., обладают высокой устойчивостью против коррозии. К этой группе может быть отнесена и медь, легкоплавкие – цинк, ртуть, олово, свинец и др. Отличаются низкой температурой плавления и в основном используются для получения сплавов на основе других металлов.

1. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ

1.1. Кристаллическое строение металлов и сплавов

Большинство металлов и сплавов имеют кристаллическую структуру и металлический тип химической связи атомов.

Кристаллическая структура характеризуется тем, что атомы в пространстве занимают только определенные положения, называемые узлами кристаллической решетки. Тип кристаллической структуры задается элементарной ячейкой (рис. 7).

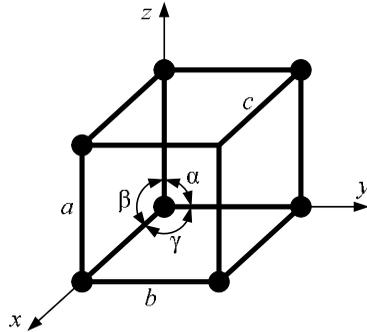


Рис. 7. Элементарная ячейка

В общем случае, **элементарная ячейка** – это минимальный по объему параллелепипед, перемещением которого вдоль его ребер (трансляциями) можно воспроизвести всю кристаллическую решетку.

Ячейка характеризуется тремя сторонами – a , b , c и тремя углами между ними – α , β , γ .

На рис. 8 показан фрагмент кубического кристалла и выбор его элементарной ячейки.

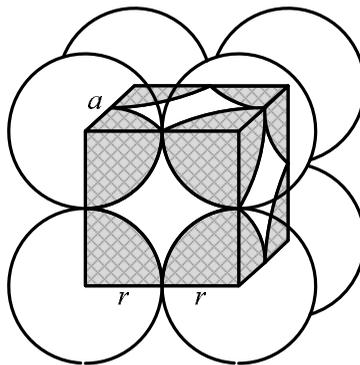


Рис. 8. Элементарная ячейка кубического кристалла:
 r – радиус атома, a – расстояние между центрами соседних атомов

Если несколько кристаллов имеют подобные углы и ребра элементарных ячеек, то образуют группу – сингонию. **Сингония** – классификационное подразделение кристаллов по признаку симметрии элементарной ячейки.

В природе существует более 230 различных кристаллографических форм, но всего 7 сингоний.

Семь типов сингоний, из которых создается все множество различных кристаллических структур: кубическая, тетрагональная, гексагональная, тригональная, ромбическая, моноклинная и триклинная.

Почти все металлы кристаллизуются в **трех основных типах решеток**: объемно центрированная кубическая (ОЦК), гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рис. 9).

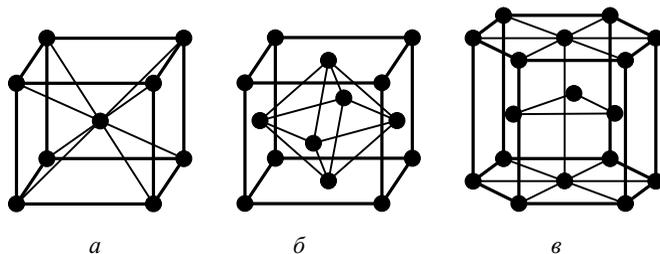


Рис. 9. Типы кристаллических решеток:
a – объемно центрированная (ОЦК); *б* – гранецентрированная (ГЦК);
в – гексагональная плотноупакованная (ГПУ)

Отношение суммарного объема, занимаемого атомами в кристаллической решетке, к ее полному объему, называется **плотностью упаковки**. Решетки ГЦК, ОЦК и ГПУ являются структурами плотных упаковок. В ГЦК и ГПУ решетках атомы занимают 74 % от объема решетки, а межатомные пустоты («поры») 26 %. В ОЦК решетке атомы занимают 68 %, а «поры» – 32 %.

1.2. Основные свойства кристаллов

Анизотропия – это неодинаковость физических свойств материала по различным направлениям. Анизотропия является закономерным следствием кристаллического строения. Количество

атомов, расположенных на разных направлениях в кристалле, и расстояния между ними различны, соответственно свойства вдоль разных направлений также различны.

Полиморфизм – способность твердого материала при одном и том же химическом составе иметь различные кристаллические структуры, называемые полиморфными модификациями.

Полиморфизм простых веществ (т. е. состоящих из одного химического элемента) называют аллотропией, а модификации называются аллотропными.

Полиморфные модификации одного и того же элемента – совершенно разные материалы. Например, полиморфные модификации химического элемента углерода С: если атомы углерода С формируют слоистую структуру – возникает материал графит. Если атомы углерода формируют кубическую структуру – это алмаз. На рис. 10 представлены другие модификации углерода.

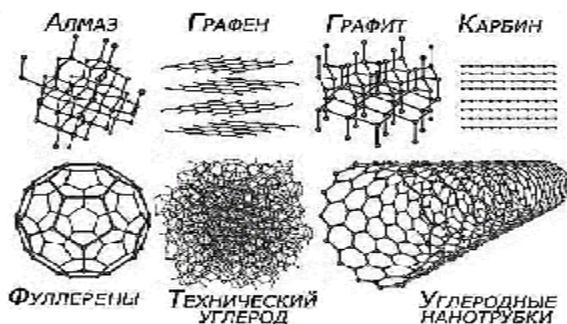


Рис. 10. Аллотропные формы (полиморфные модификации) углерода

Полиморфизм свойственен многим металлам (железо, кобальт, титан, цирконий, марганец и др.). Полиморфные превращения происходят не только в чистых металлах, но и в сплавах, а также в химических соединениях и сопровождаются скачкообразным изменением всех свойств металлов или сплавов.

При затвердевании металла из расплава последовательно образуются различные кристаллические формы. Низкотемпературную кристаллическую форму металла обычно обозначают буквой α , а далее по степени возрастания температуры кристаллизации соответствующей фазы последовательно буквами β , γ и т. д. (по греческому алфавиту).

1.3. Кристаллизация металлов из расплава

Монокристалл – кристалл вещества, во всем объеме которого кристаллическая решетка однородна, то есть не имеет дефектов. Внешние границы монокристалла, повторяя правильность его внутреннего строения, должны иметь плоские грани (рис. 11).

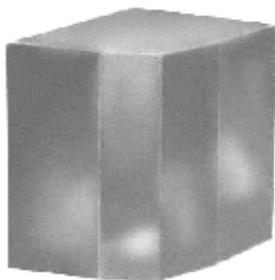


Рис. 11. Монокристалл сегнетовой соли

Реальный процесс кристаллизации вещества из расплава при неконтролируемых условиях обычно приводит к одновременному образованию большого числа мелких сросшихся кристаллов и затвердеванию расплава.

Сначала происходит процесс зарождения участков кристаллической решетки в расплаве и затем – рост кристаллов из образовавшихся центров (рис. 12).

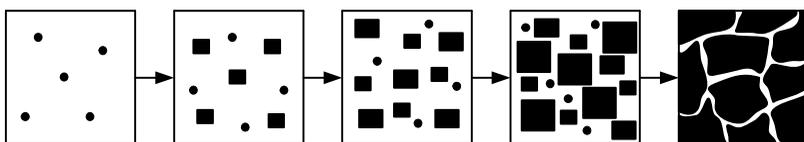


Рис. 12. Зарождение и рост кристаллитов из расплава

Одновременно в расплаве металла имеется огромное количество центров кристаллизации. Ими могут быть тугоплавкие примеси и флуктуации (небольшие отклонения) по температуре и по составу. Растущие из этих центров кристаллизации кристаллы ориентированы произвольно. Они называются зернами (или кристаллитами). При соприкосновении их рост прекращается.

Таким образом, структура металла, охлажденного из расплава, представляет собой огромное количество хаотично ориентированных кристаллитов, сросшихся между собой. Такая структура металла называется **поликристаллической**.

В зависимости от характера зарождения центров кристаллизации может быть **гомогенная**, когда кристаллы самопроизвольно зарождаются на флуктуациях, и **гетерогенная**, когда кристаллизация происходит на уже имеющихся центрах кристаллизации, например, тугоплавких примесях (частицы оксидов, нитридов, карбидов и т. д.).

Свойства поликристаллического металла из-за хаотичной ориентации зерен **изотропны**, то есть одинаковы по всем направлениям. Если в поликристаллическом металле необходимо создать анизотропию свойств, производят его специальные обработки.

Текстурирование – это упорядочение ориентации кристаллических зерен, достигаемое специальной обработкой поликристаллических материалов.

1.4. Дефекты кристаллических структур

Дефектами кристалла называются его структурные несовершенства. Существует 4 вида дефектов структуры по размерности:

- 1) точечные;
- 2) линейные;
- 3) поверхностные (плоские);
- 4) объемные.

Точечные и линейные дефекты могут возникать внутри кристаллита (зерна), плоские и объемные – между зернами при их сочленении.

Точечные дефекты (0-мерные) кристаллической решетки имеют атомный (не более нескольких атомных диаметров) размер во всех трех измерениях. Виды точечных дефектов: вакансия, внедрение (родного или чужеродного атома), замещение (рис. 13).

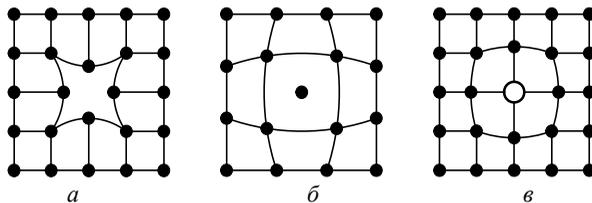


Рис. 13. Виды точечных дефектов:
а – вакансия; б – внедрение; в – замещение

Вакансия – незаполненный узел кристаллической решетки. Вакансии влияют на свойства материалов, их наличие в решетке сообщает атомам подвижность, которая называется диффузией.

Внедрение – лишний атом родного или чужого химического элемента, расположенный между узлами кристаллической решетки.

Замещение – атом чужеродного химического элемента, замещающий основной атом в узле кристаллической решетки.

К **линейным дефектам** (одномерным) кристаллической решетки относят краевые и винтовые дислокации.

Дислокация (от лат. – смещение, перемещение) – это линейный (одномерный) дефект, который имеет атомные размеры в двух измерениях, а в третьем может иметь протяженность по всей длине кристалла. **Краевая дислокация** – это лишняя атомная полуплоскость (экстраплоскость) в части кристалла. **Винтовая дислокация** – это частичный сдвиг кристаллической решетки, при котором образуется ступенька, проходящая по части кристалла (рис. 14).

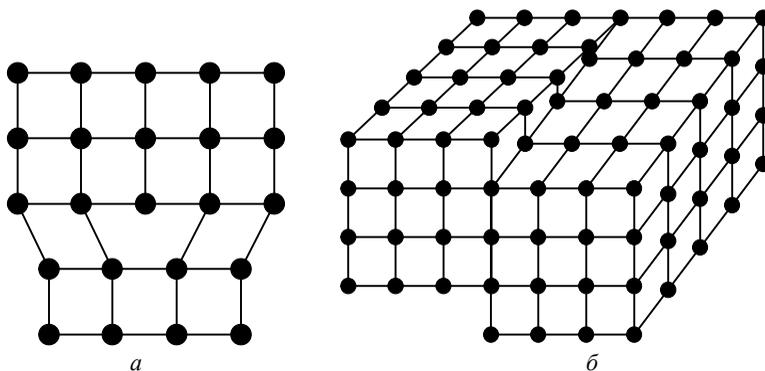


Рис. 14. Виды линейных дефектов:
а – краевая; б – винтовая дислокации

Поверхностными (плоскими) дефектами являются двумерные дефекты на границах зерен и субзерен. При поликристаллическом строении зерна в металлах повернуты одно относительно другого, и на границах между ними атомы не имеют правильного расположения (рис. 15).

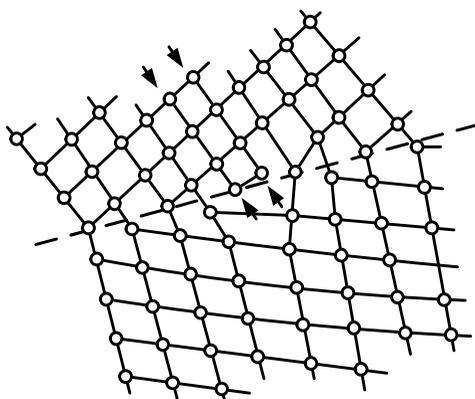


Рис. 15. Плоскость смыкания зерен

Объемные дефекты образуются между зернами металла и имеют значительные размеры в трех измерениях. Это поры, раковины, пустоты, включения шлаков, окислов и т. д. Эти дефекты существенно снижают прочностные свойства металла (рис. 16).



Рис. 16. Фотография газотермического покрытия с порами

1.5. Способы улучшения качества металла при выплавке

При выплавке металла стремятся получить мелкозернистую структуру, которая легче поддается дальнейшей обработке. Для

этого следует либо создать максимальное число центров кристаллизации, либо проводить кристаллизацию из расплава при медленном охлаждении (малая скорость роста кристаллов).

Увеличение числа центров кристаллизации достигается модифицированием металла: в расплав металла добавляют посторонние тугоплавкие вещества – модификаторы. По механизму воздействия различают модификаторы, не растворяющиеся в жидком металле (выступают в качестве дополнительных центров кристаллизации) и поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые растворяются в металле, но, осаждаясь на поверхности растущих кристаллов, препятствуют их росту.

1.6. Кривая нагревания – охлаждения чистого металла

Для графического описания процесса кристаллизации строят кривые охлаждения металлов и сплавов (рис. 17).

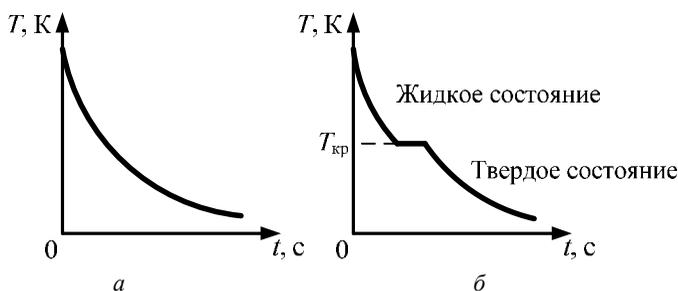


Рис. 17. Кривая охлаждения:

a – аморфного материала; *б* – кристаллического материала

При кристаллизации из расплава, атомы прекращают хаотичное тепловое движение и останавливаются в узлах решетки, выделяя теплоту кристаллизации. При этом кинетическая энергия переходит в тепловую (экзотермический процесс). В обратном процессе плавления металла поглощается энергия, называемая теплотой плавления (эндотермический процесс). Переход вещества из кристаллического состояния в жидкое и обратный переход есть фазовый переход первого рода (характеризуется скачкообразным изменением плотности, внутренней энергии и энтропии).

Процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое – это первичная кристаллизация, процесс изменения кристаллической структуры в твердом состоянии – это вторичная кристаллизация. Рекристаллизация – это процесс зарождения и (или) роста новых зерен в металле или сплаве за счет других зерен той же фазы, сопровождающийся повышением их структурного совершенства. Скорость рекристаллизации резко (экспоненциально) возрастает с повышением температуры. Особенно интенсивно рекристаллизация протекает в пластически деформированных материалах.

Температуры, при которых происходит кристаллизация или рекристаллизация, называются критическими точками.

1.7. Сплавы. Виды сплавов

Металлические материалы, применяемые в технике, классифицируют не только по цвету на черные и цветные, но и по составу на чистые металлы, используемые преимущественно в электротехнике, и сплавы металлов, которые применяются гораздо шире.

Сплав – это макрооднородный материал, полученный из нескольких простых веществ, называемых компонентами, из которых хотя бы один является металлом.

Компонента сплава – простое вещество, из которого получали сплав.

Четкую границу между металлами и сплавами провести трудно, так как даже в чистых металлах имеются «следовые» примеси других элементов. Почти все металлы, имеющие промышленное значение, на самом деле являются сплавами. Способы получения сплавов: охлаждением из расплава смеси компонент, совместным осаждением компонент из газовой фазы, электроосаждением из растворов и расплавов, диффузионным насыщением и др. Исходные простые вещества для получения сплава называются компонентами. Любой сплав, являясь макрооднородным, на микроуровне может проявлять неоднородность, т. е. состоять из частей, имеющих различные структуры и свойства.

Фаза – пространственно ограниченная и отличная от других часть системы, имеющая свою кристаллическую решетку и свойства.

Сплав, состоящий из одной фазы, называется гомогенным. Сплав, состоящий из нескольких фаз, называется гетерогенным.

Виды сплавов в зависимости от характера взаимодействия компонент:

1. Механическая смесь (компоненты сплава химически не взаимодействуют).

2. Твердый раствор (все компоненты неразличимы в единой для всех кристаллической решетке).

3. Химическое соединение (сплав с определенным соотношением компонент).

В случае получения сплава из двух компонент (условно A и B):

1. Если компоненты A и B химически не взаимодействуют – образуется механическая смесь $A+B$.

2. Твердый раствор – это сплав AB , в котором компонент B в твердом виде хаотично распределен в кристаллической решетке компонента A .

3. Химическое соединение – это сплав с определенным соотношением компонент A_mB_n .

1.8. Простейшие диаграммы состояний сплавов

Фазовая диаграмма (диаграмма состояний) – это чертеж, где отражаются фазовый состав и структура сплава в зависимости от концентрации компонент и температуры. Простейшими являются диаграммы состояний сплавов в системе двух компонент A и B :

1. Диаграмма состояния механической смеси: в твердом состоянии компоненты A и B не растворимы, взаимная растворимость есть только в жидком состоянии (рис. 18).

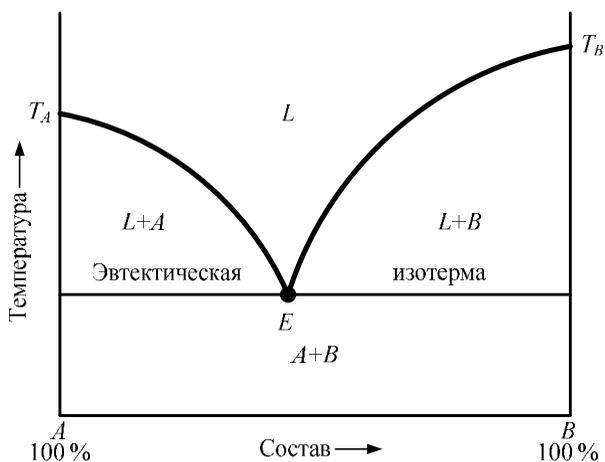


Рис. 18. Диаграмма состояний механической смеси компонент A и B : точка E – эвтектика; L – область существования жидкой фазы; T_A – температура плавления компонента A , T_B – температура плавления компонента B

Эвтектика (точка E) – равновесие жидкой фазы и двух или более твердых фаз. Эвтектика существует в системе взаимно нерастворимых компонент только при определенном значении состава и определенном значении температуры. Эвтектическая изотерма – линия одной температуры, при которой в системе существует эвтектика.

В области фазовой диаграммы выше линии L («liquidus» в переводе с латинского – жидкий) – в системе компонент A и B существует только жидкая фаза.

2. Диаграмма состояния неограниченного твердого раствора (компоненты A и B образуют твердый раствор в любом соотношении) представлена на рис. 19.

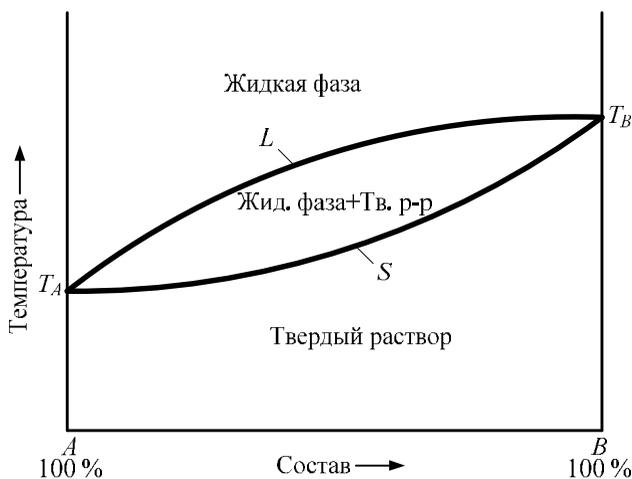


Рис. 19. Диаграмма состояний неограниченного твердого раствора между компонентами A и B :

L – линия ликвидус; S – линия солидус

Линия L (ликвидус) – отделяет область существования жидкой фазы в системе. Выше линии L в системе $A + B$ существует только расплав, ниже линии S («solidus» в переводе с латинского – твердый) – компоненты A и B в системе находятся только в твердом виде.

3. Диаграмма состояния ограниченной взаимной растворимости компонент A и B (рис. 20).

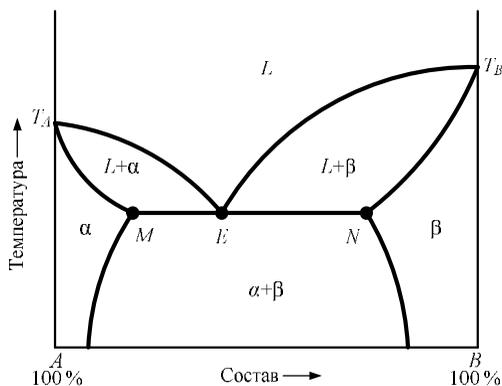


Рис. 20. Диаграмма состояний двойной системы с ограниченными твердыми растворами:

L – область существования жидкой фазы (расплава) компонент A и B ; α и β – области существования твердых растворов компонент B в A и A в B соответственно; $(L + \alpha)$ и $(L + \beta)$ – области сосуществования жидкой фазы и твердых растворов α и β соответственно; $(\alpha + \beta)$ – область сосуществования двух твердых растворов; $T_A E T_B$ и $M E N$ – линии ликвидуса и солидуса соответственно; E – эвтектическая точка

В системе только по краям составов (по несколько процентов одной компоненты в другой) существуют два ограниченных твердых раствора α и β .

4. Диаграмма состояния химического соединения (рис. 21).

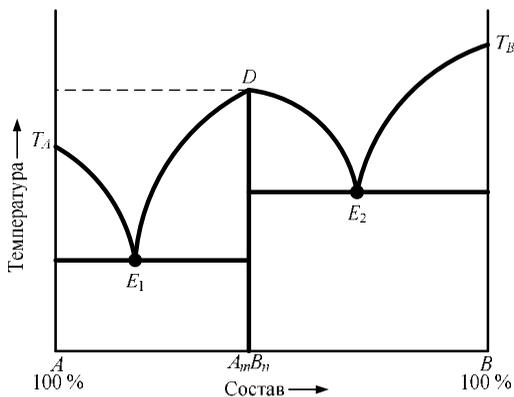


Рис. 21. Диаграмма состояния химического соединения:

E_1 и E_2 – эвтектические точки; D – химическое соединение состава $A_m B_n$.

В точке D при строго определенном соотношении компонент и определенной температуре образуется химическое соединение состава A_mB_n .

1.9. Способы обработки металлов и сплавов

Любая обработка сплава проводится с целью изменения структуры и свойств материалов. В результате получают требуемый комплекс свойств.

Обработке подвергаются как массивные заготовки сплавов, так и готовые детали.

Способы обработки металлов и сплавов (по механизму воздействия):

1. Механическая обработка. При механическом воздействии на материал последовательно с увеличением нагрузки происходят: упругая деформация, пластическая деформация, затем зарождение трещины, ее рост и, наконец, разрушение материала.

Деформацией называется изменение формы и размеров тела под действием нагрузки. Упругая деформация – деформация, исчезающая после снятия нагрузки, обработать материал она не позволит.

Пластическая деформация – деформация, сохраняющаяся после снятия нагрузки. Именно она позволяет производить механическую обработку металла. Осуществляется пластическая деформация путем сдвига одной части кристалла относительно другой. Механизм пластической деформации – скольжение дислокаций. В плоскости скольжения движутся сотни дислокаций, в результате их выхода на поверхность образуются ступеньки, изменяющие форму каждого зерна. Зерна постепенно вытягиваются в направлении пластического течения. При повышении нагрузки движущиеся дислокации встречаются с препятствиями (точечными дефектами, другими дислокациями) и тормозятся или переплетаются с ними. При этом плотность дислокаций увеличивается, мешая их дальнейшему продвижению. Поэтому для осуществления дальнейшей деформации требуется увеличение нагрузки. То есть, благодаря переплетению дислокаций, металл может выдерживать увеличенную нагрузку – он упрочняется. Это явление называется наклепом.

Наклеп – явление повышения прочности и твердости, и снижения пластичности материала при холодной пластической деформации.

На последней стадии деформации, на границе зерен в местах скопления дислокаций образуются зародыши разрушения – микротрещины.

При дальнейшей нагрузке одна из микротрещин увеличивается и происходит разрушение детали.

Осуществляют также **термомеханическую** обработку (Т.М.О.) – это метод упрочнения металлов и сплавов, совмещающий пластическую деформацию и упрочняющую термическую обработку.

2. Термическая обработка. Термической (тепловой) обработкой называются процессы нагревания и охлаждения сплавов по определенным режимам.

В результате термической обработки происходят изменения структуры, фазового состава, механических и физических свойств материала, без изменения химического состава.

Основные виды термической обработки: закалка, отжиг, отпуск, старение.

Закалка – это нагрев до оптимальной температуры, выдержка и последующее резкое охлаждение. В результате закалки повышаются прочность и твердость и понижается пластичность сплава. Основные параметры при закалке – температура нагрева и скорость охлаждения.

Отжиг – нагрев металла до определенной температуры, выдержка в течение некоторого времени и последующее очень медленное охлаждение вместе с печью. Назначение отжигов различно, соответственно их делят на два рода.

Отжиг первого рода. Это отжиг, при котором не происходит фазовых превращений, а если они имеют место, то не оказывают влияния на конечные результаты, предусмотренные целевым назначением отжига. Различают разновидности отжига первого рода: гомогенизационный и рекристаллизационный.

Гомогенизационный – это отжиг с длительной выдержкой при высокой температуре с целью выравнивания химического состава.

Рекристаллизационный – это отжиг наклепанного сплава с целью устранения наклепа и получение определенной величины зерна.

Отжиг второго рода. Это отжиг, при котором осуществляют фазовые превращения. Различают следующие его виды: полный, неполный, диффузионный, изотермический и др.

Отпуск – нагрев сплава до различных температур (всегда ниже критической точки – точки кристаллизации), выдержка при этой температуре и охлаждение с разными заданными скоростями. Главное

назначение отпуска – получить необходимую кристаллическую структуру сплава.

Старение – термическая обработка, при которой главным процессом является распад полученного ранее пересыщенного твердого раствора (т. е. твердого раствора с лишним содержанием одной из компонент). Часто старение – это просто выдержка при комнатной температуре.

3. Термохимическая обработка. Такой обработке чаще подвергают уже полученные из сплавов детали.

Термохимическая (или химико-термическая) обработка – это тепловая обработка металлических изделий в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев без изменений в его сердцевидных зонах. К ней относятся следующие виды обработок: цементация, азотирование, цианирование, борирование, алитирование и др.

Цементация – насыщение углеродом до 0,4 %–0,5 % поверхности детали из малоуглеродистой стали. Насыщение углеродом дает, например, возможность последующей закалки, т. к. малоуглеродистые стали не закаляются.

Азотирование – насыщение поверхности стали азотом для повышения твердости, износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости (образуются нитриды металлов).

Цианирование (нитроцементация) – насыщение поверхностного слоя изделий одновременно углеродом и азотом.

Борирование – насыщение поверхности детали бором и последующая закалка для повышения твердости, коррозионной стойкости, жаростойкости и износостойкости при высоких температурах.

Алитирование – насыщение поверхности детали алюминием, который образует впоследствии защитную окисную пленку, для повышения окалинстойкости деталей.

1.10. Стали и чугуны

Стали и чугуны – это сплавы железа с углеродом.

Основные компоненты сталей и чугунов – это железо (Fe) и углерод (C):

1. Сплавы железа с углеродом с содержанием углерода до 2,14 % называются сталью.

2. Сплавы с содержанием углерода выше 2,14 % считаются чугунами.

3. Особую группу составляют сплавы с содержанием углерода менее 0,02 % (точка P), их называют техническим железом или АРМКО.

Железо – основная компонента сталей и чугунов. Температура плавления железа 1539 °С, плотность 7680 кг/м³. Основные полиморфные модификации железа показаны на кривой его охлаждения (рис. 22).

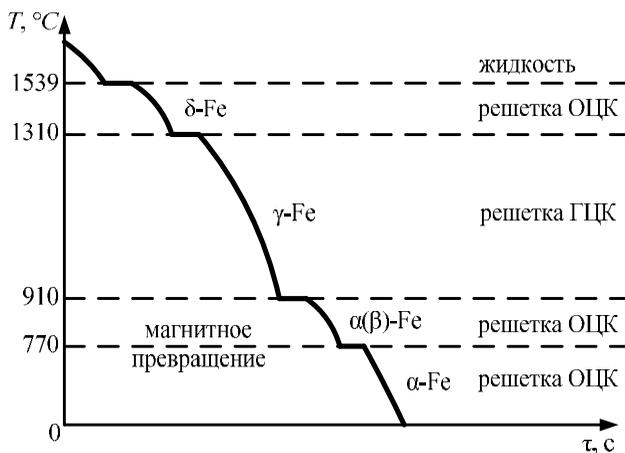


Рис. 22. Кривая охлаждения железа

Модификация железа α -Fe – существует до температуры 910 °С. Эта модификация железа имеет ОЦК кристаллическую решетку (объемно-центрированную кубическую). До температуры 768 °С эта модификация ферромагнитна, от 768 до 910 °С – немагнитна (иногда ее называют β -Fe). Модификация γ -Fe – это модификация железа с решеткой ГЦК (гранецентрированная кубическая), существует в диапазоне температур от 910 °С до 1392 °С. Это парамагнитное железо. От температуры 1392 °С до расплава при температуре 1535 °С железо снова образует ОЦК решетку (δ -Fe).

Углерод – вторая основная компонента сталей и чугунов. Это неметалл. Температура плавления углерода 3500 °С, плотность 2500 кг/м³. Встречается в природе в виде различных полиморфных модификаций: кристаллов алмаза, графита и др. Существуют также и аморфные формы (кокс, древесный уголь и др.).

В сплаве железо–углерод (Fe–C) могут образоваться следующие **основные фазы**:

1. Феррит.
2. Аустенит.
3. Цементит.

4. Углерод (Он выпадает в виде отдельной фазы при больших содержаниях в составе сплава).

Фаза **феррит** (магнитная) – это твердый раствор углерода в α – железе, представляет собой ОЦК решетку атомов Fe, атом углерода помещается в центре куба. Растворимость углерода в α – железе составляет ~0,02 % при температуре 727 °C, и 0,005 % при комнатной температуре.

Аустенит (немагнитная фаза) – твердый раствор углерода в γ – железе. Представляет собой ГЦК решетку атомов Fe, в которой атом углерода C помещается в центре каждой грани. Предельная растворимость углерода C в γ – железе при температуре 1147 °C составляет ~2,14 %.

Фаза **химическое соединение цементит** Fe₃C (карбид железа). Эта фаза вбирает в себя 6,67 % углерода. Температура плавления точно не установлена (1250, 1550 °C). При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 217 °C.

При содержании углерода в сплаве Fe–C более, чем может входить в состав фаз феррит + аустенит + цементит, углерод выпадает **в виде отдельной фазы**.

В качестве эвтектических структур в сплаве Fe–C могут находиться ледебурит и перлит. Это смеси фаз.

Ледебурит – смесь двух структур: цементита и аустенита. Пластины цементита прорастают древовидными структурами (дендритами) кристаллов аустенита.

Аустенит при охлаждении ниже примерно 700 °C может превратиться в **перлит**, также являющийся смесью двух фаз: феррита и цементита. В перлите пластинчатые структуры феррита чередуются с пластинами цементита.

Различными соотношениями железа с углеродом, а также способами термообработок сплавов получают разнообразное соотношение перечисленных фаз и, следовательно, добиваются широкого разнообразия свойств получаемых сталей и чугунов.

1.10.1. Стали

Сталь – это сплав железа с углеродом, при содержании углерода до 2,14 %. С ростом содержания углерода сталь становится более хрупкая, менее вязкая, менее пластичная, поначалу более прочная, затем менее прочная. Растет удельное сопротивление, коэрцитивная сила, падает плотность, теплопроводность, магнитная проницаемость.

1.10.2. Влияние примесей на свойства сталей

В сталях всегда присутствуют примеси, которые условно делят на четыре группы.

1. **Постоянные технологические примеси** – марганец и кремний (Mn, Si). Вводятся в процессе выплавки. Содержание марганца не более 0,5 %...0,8 %. Марганец повышает прочность, не снижая пластичности. Содержание кремния 0,35 %...0,4 %. Кремний дегазирует металл, тем самым повышает плотность слитка.

2. **Постоянные вредные примеси** – сера и фосфор (S, P).

Сера является естественной примесью в металле. Содержание серы в сталях – 0,025 %...0,06 %. На границах зерен стали сера образует соединение FeS, при этом ухудшаются коррозионная стойкость, стойкость к растрескиванию, свариваемость. Содержание фосфора в сталях 0,025 %...0,045 %. Часть фосфора, растворяясь в феррите, искажает его кристаллическую решетку. Частично фосфор собирается на границах зерен, поэтому увеличивает предел прочности, но снижаются пластичность и ударная вязкость.

3. **Скрытые примеси** – газы (азот, кислород, водород). Они попадают в сталь при выплавке и являются вредными. Азот и кислород находятся в сталях в виде хрупких неметаллических включений: окислов (FeO, SiO₂, Al₂O₃), нитридов (Fe₂N), в виде твердого раствора или в свободном состоянии, располагаясь в дефектах (раковинах, трещинах). Очень вредной примесью является растворенный водород, который значительно повышает хрупкость стали.

4. **Специальные примеси.** Примеси (элементы), специально вводимые в небольших количествах в сталь для придания ей заданных свойств, называются легирующими, а стали – легированными сталями.

В общем случае, **легирование** – это процесс контролируемого введения примесей.

1.10.3. Классификация сталей

Стали классифицируют по следующим признакам (рис. 23):

- 1) по химическому составу;
- 2) по качеству;
- 3) по структуре;
- 4) по применению.



Рис. 23. Классификация сталей

В зависимости от химического состава различают стали **углеродистые и легированные**.

В свою очередь углеродистые стали могут быть: малоуглеродистыми – с содержанием углерода менее 0,25 %; среднеуглеродистыми – 0,25 %...0,60 % и высокоуглеродистыми – 0,60 %.

Легированные стали подразделяют на: низколегированные – с содержанием легирующих элементов до 2,5 %; среднелегированные – от 2,5 % до 10 %; высоколегированные – свыше 10 %.

Основным легирующим элементом сталей является хром 0,8 %...1,2 %. Он повышает прокаливаемость, способствует получению высокой и равномерной твердости стали.

Дополнительные легирующие элементы вводят для получения нужного комплекса свойств стали, например: бор до 0,003 %, увеличивает прокаливаемость; титан (~0,1 %) вводят для измельчения зерна в хромомарганцевой стали и т. д.

По качеству различают стали **обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные**.

Качество стали зависит от содержания вредных примесей: серы и фосфора. Стали обыкновенного качества содержат до 0,06 % серы и до 0,07 % фосфора; качественные – до 0,035 % серы и фосфора каждого отдельно; высококачественные – до 0,025 % серы и фосфора; особо высококачественные – до 0,025 % фосфора и до 0,015 % серы.

По структуре различают стали **в отожженном и нормализованном состоянии**.

По применению стали делят на: **конструкционные** стали – для деталей машин и конструкций; **инструментальные** стали – для различного инструмента (содержат более 0,65 % углерода) и стали **с особыми свойствами**.

Например, стали с особыми свойствами – это стали с определенными магнитными характеристиками (электротехническая сталь) или с малым коэффициентом линейного расширения (суперинвар). К сталям с особыми химическими свойствами относятся также нержавеющие, жаростойкие и жаропрочные стали.

1.10.4. Чугуны

Углерод в чугунах может находиться не только в связанном виде (т. е. не только в виде феррита, аустенита или цементита), но и в свободном состоянии, выпадая в виде микровключений отдельной фазы.

Форма выделений углерода в чугунах и структура самой металлической основы (матрицы) определяют основные типы чугунов и их свойства.

1.10.5. Общая классификация чугунов

Чугуны классифицируют по следующим признакам:

- 1) по состоянию углерода;
- 2) по форме включений углерода;
- 3) по типу структуры металлической основы;
- 4) по химическому составу.

По **состоянию углерода** различают **белый чугун**, в котором весь углерод находится в связанном состоянии (твердые растворы Fe–C и цементит Fe_3C); **половинчатый чугун**, в котором основное количество углерода (более 0,8 %) находится в связанном виде, но есть свободный углерод в виде включений; **серый чугун**, в котором весь углерод или его большая часть находится в свободном состоянии в виде включений углерода.

По ГОСТ чугун в отливках маркируется буквами СЧ с добавлением двух чисел: первое число указывает предел прочности при растяжении и, через тире, второе число – удлинение в %.

По **форме включений углерода** различают **пластинчатый, вермикулярный, шаровидный, хлопьевидный** (рис. 24).

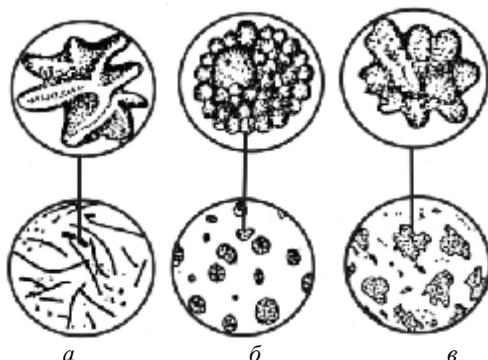


Рис. 24. Классификация чугуна в зависимости от формы включений углерода:
а – пластинчатый графит в сером чугуне; *б* – шаровидный графит в высокопрочном чугуне; *в* – хлопьевидный графит в ковком чугуне

Чугун с включениями вермикулярного графита (ЧВГ) получен позже остальных типов чугунов (1966–1968 гг.). Вермикулярный графит имеет форму взаимосвязанных графитовых лепестков, отличающихся от лепестков пластинчатого графита меньшей степенью неравноосности, меньшими размерами и округлой формой кромок. Механические свойства таких чугунов занимают промежуточные значения между чугуном с пластинчатым и чугуном с шаровидным графитом при одинаковой структуре матрицы.

По типу структуры металлической основы (матрицы) различают **ферритный, перлитный** чугуны. Существуют также чугуны со смешанной структурой, например, феррито-перлитные.

По химическому составу чугуны делят на **нелегированные** (общего назначения) и **легированные** (специального назначения).

1.11. Сплавы цветных металлов

1.11.1. Сплавы меди

Сплавы меди с цинком называются **латунями**. В качестве второстепенных компонентов, улучшающих свойства латуней, в них могут добавляться олово, свинец, алюминий и никель и др.

Латуни маркируются буквами Л с цифрами, указывающими количество меди как более дорогого, чем цинк элемента (Л96, Л90, Л80, Л68, Л62). Если латунь содержит другие элементы, то они обозначаются русскими буквами после Л: О – олово, А – алюминий, Н – никель, Ж – железо, С – свинец, К – кремний, Мц – марганец и т. д. Процентное содержание этих элементов указывается после содержания меди в порядке следования букв через дефис. Из двухфазных латуней широко известна латунь Л59.

Бронзы называются сплавы меди с любыми компонентами, кроме цинка (цинк может входить в состав сложных бронз в качестве второстепенного компонента).

Бронзы маркируются двумя буквами Бр, а затем идет обозначение второго компонента с цифрой, указывающей его среднее содержание в процентах, например, БрО10, БрА5, БрБ2 и т. д. Если компонент больше, то они перечисляются вслед за вторым, обозначаются буквой и через дефис – цифрой, указывающей содержание.

Бронзы отличаются от латуней тем, что с увеличением содержания второго компонента они быстро теряют пластичность, в то время как твердость довольно быстро возрастает (у латуней при содержании до 32 % Zn растут оба эти показателя).

Оловянная и оловянно-фосфористая бронзы являются хорошими антифрикционными сплавами для подшипников скольжения, червячных колес. Алюминиевые бронзы являются дешевыми заменителями оловянных бронз. Бериллиевая бронза (БрБ2) является твердым и упругим материалом, служащим для изготовления немагнитных пружин и не искрящего ударного инструмента.

Мельхиор (обычно 75 % меди и 25 % никеля с незначительными добавками марганца). Этот медно-никелевый сплав устойчив к коррозии, потому применяется в качестве конструкционного материала в изделиях, которые подвержены контакту с агрессивными средами.

1.11.2. Сплавы алюминия

В зависимости от пластичности сплавы алюминия подразделяются на:

1. **Деформируемые** (способные пластически деформироваться при изготовлении из них изделий),
2. **Литейные** (имеющие низкую пластичность, поэтому изделия нужной формы из них получают литьем).

К деформируемым алюминиевым сплавам относятся **дюралюмины**. Основным элементом, вводимым в них для обеспечения возможности проводить упрочняющие термообработки, является медь (Cu) (от 2,8 %–4,5 %).

Другие элементы (Mg, Mn) добавляются для улучшения комплекса свойств. Дюралюмины маркируются буквой Д с цифрой, означающей порядковый номер в системе разработки сплава (Д6, Д16, Д18 и т. д.). Для упрочнения их подвергают закалке, а затем старению, естественному (при комнатной температуре в течение 4–5 суток) или искусственному (при 150 °С, 18 ч). При старении сплав дополнительно существенно упрочняется.

Из литейных сплавов алюминия наиболее применяемые в технике – **силумины**. Это сплавы алюминия Al с кремнием Si (возможны добавки Mg, Mn и др. элементов). Наиболее типичен силумин АЛ2, содержащий 10 %–13% Si.

1.11.3. Сплавы титана

Наиболее используемый в технике сплав – **технический титан** – производится двух марок ВТ1–00 и ВТ1–0, отличающихся содержанием примесей (кислорода, азота, углерода, железа, кремния и др.). Получают сплавы титана и с другими элементами, например, с Al.

Титановые сплавы обладают рядом преимуществ перед другими конструкционными материалами: это высокие удельная прочность и жаропрочность в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Титан и его сплавы парамагнитны и высокотехнологичны, т. е. они хорошо свариваются. Перечисленные свойства определяют применение титановых сплавов в авиастроении, ракетостроении, судостроении, химическом, пищевом и транспортном машиностроении, в медицине.

1.11.4. Сплавы цинка

Сплавы цинка с алюминием Al и медью Cu применяются в качестве антифрикционных материалов. Марки антифрикционных сплавов цинка: ЦАМ 9–1,5Л; ЦАМ 10–5Л. Первая цифра означает среднее содержание Al, вторая – Cu.

Широко применимый сплав цинка – цинковый припой – сплав цинка с 40 % кадмия Cd – для пайки алюминиевых сплавов. Температура плавления этого припоя 266 °С, что позволяет ликвидировать трещины в алюминиевых деталях без высокотемпературной сварки.

Недостатком цинка и его сплавов с различными элементами является низкий предел ползучести и значительные изменения свойств и размеров при естественном старении.

1.11.5. Сплавы никеля

Свойства никелевых сплавов аналогичны свойствам чистого никеля: жаропрочность и жаростойкость; высокая коррозионная стойкость; способность выдерживать высокие силовые нагрузки в условиях повышенных температур; износостойкость и долговечность и пр.

Широко применимы никелемедные сплавы. Никель Ni и медь Cu образуют непрерывный ряд твердых растворов, т. е. возможно любое соотношение компонент в сплаве. Никелемедные сплавы, содержащие до 67 % никеля и до 33 % меди, называют **монелями**. Монель – коррозионностойкий сплав. Это определяет его применение в изделиях, которые подвержены контакту с химически агрессивными средами.

Сплавы никель – хром – железо (Ni–Cr–Fe) называют **инконелями** и **инкологиями**. Это жаропрочные сплавы, что обуславливает их применение при особо высоких температурах. Самым ранним сверхпрочным сплавом на основе никеля был сплав нимоник 80: до 80 % Ni + до 20 % Cr + 2,25 % Ti + 1,0 % Al.

Хастеллой (*Hastelloy*) – сплав никеля Ni с молибденом Mo. Также в зависимости от требуемых свойств в состав хастеллоев могут входить Cu, C и Fe. В качестве легирующих элементов: Ni, Al, W, Mn и пр. Основное применение сплавов *Hastelloy* – работа при повышенных температурах, высоком давлении и при контакте с агрессивными веществами.

1.12. Получение металлических заготовок

Заготовка – это предмет труда, из которого затем изменением формы, размеров и свойств изготавливают деталь.

Методы получения заготовок:

- 1) литье;
- 2) получение заготовок давлением;
- 3) резание;
- 4) сварка;
- 5) комбинация методов.

1.12.1 Литье

Литье – формообразование из жидкого (расплавленного) металла путем заполнения им полости заданной формы и размеров с последующей кристаллизацией.

Продукция литья называется **отливкой**.

Литье – один из старейших способов получения заготовок практически любой конфигурации с массой от долей грамма до сотен тонн. Литье дает возможность получения изделий из малопластичных материалов, переработка которых другими способами затруднена или невозможна. Наиболее распространенным материалом для получения заготовок литьем является чугун.

Технологический процесс литейного производства:

- 1) подготовка формовочных и стержневых смесей;
- 2) изготовление форм и стержней;

- 3) плавка металла;
- 4) сборка и заливка формы;
- 5) удаление отливок из формы;
- 6) термическая обработка отливок – в отдельных случаях.

По технологическим признакам литейное производство включает в себя свыше 50 способов.

Наибольшее применение получили **способы литья**:

- 1) литье в песчаные формы (в землю);
- 2) в оболочковые формы;
- 3) в металлические формы (кокили);
- 4) литье по выплавляемым моделям;
- 5) литье под давлением;
- 6) центробежное литье и др.

1.12.2. Необходимые литейные свойства сплава

Жидкотекучесть – способность сплава воспроизводить рельеф литейной формы. При недостаточной жидкотекучести форма заполняется не полностью (недолив), и отливка бракуется. Высокой жидкотекучестью обладают силумины, серые чугуны, кремнистые бронзы.

Малая усадка – уменьшение сплава в объеме и линейных размерах при затвердевании. Описывается коэффициентом усадки:

$$k = \frac{l_{\text{ф}} - l_{\text{от}}}{l_{\text{от}}} \times 100 \% , \quad (9)$$

где $l_{\text{ф}}$ и $l_{\text{от}}$ – размеры формы и отливки соответственно, м.

Низкая ликвация – неоднородность химического состава сплава, возникающая при кристаллизации. Ликвация – результат того, что сплавы, в отличие от чистых металлов, кристаллизуются не при одной температуре, а в некотором интервале температур. Ликвация может быть дендритной или зональной:

Дендритная ликвация наблюдается в микрообъемах сплава, близких к размеру зерен.

Зональная ликвация наблюдается во всем объеме слитка. Пример зональной ликвации – отливка из сплава свинца с цинком содержит внизу слитка свинец Pb + 1,6 % Zn цинка,

а сверху слитка Zn + 1,2 % Pb). Ликвация усиливается при увеличении скорости охлаждения сплава. Ликвация уменьшается в результате гомогенизационного или диффузионного отжига.

Основные **достоинства** литья: низкая стоимость технологической оснастки, возможность получать любые по массе и размерам отливки.

Недостатки: низкая точность размеров; большая шероховатость поверхности; неодинаковость свойств сплава по объему, крупнозернистая структура отливки с невысокими механическими свойствами.

1.12.3. Получение заготовок давлением

Обработка давлением – придание заготовке требуемой формы и необходимых размеров пластической деформацией слитка или болванки.

В ходе обработки металла давлением разрушается грубозернистая литая структура, устраняются пористость и рыхлость, улучшается металлургическое качество и создается благоприятная ориентировка зерен металла.

Способы получения заготовок давлением:

- 1) прокатка;
- 2) прессование;
- 3) волочение;
- 4) ковка;
- 5) штамповка;
- 6) комбинации перечисленных способов.

Прокатка – это процесс деформирования слитка или иной проделговатой металлической заготовки между двумя вращающимися валками, расстояние между рабочими поверхностями которых меньше высоты заготовки.

Комплекс оборудования, с помощью которого производится прокатка, называется прокатным станом.

Разнообразную продукцию, получаемую в результате прокатки, называют **сортамент проката**.

Сортамент стального проката:

- 1) сортовой прокат простого, фасонного и специального профиля;
- 2) листовой прокат;
- 3) трубы бесшовные;
- 4) периодический прокат.

Прессование – вид обработки металлов давлением, при котором металл, заключенный в замкнутую форму (матрицу), выдавливается через отверстие меньшей площади, чем площадь сечения исходного материала (рис. 25).

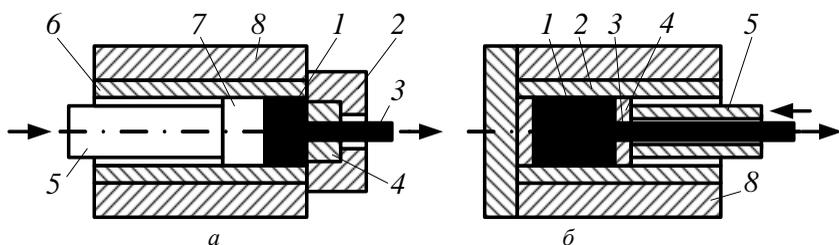


Рис. 25. Принципиальная схема установки для прессования:

а – прямое прессование; *б* – обратное прессование; 1 – заготовка; 2 – держатель матрицы; 3 – изделие; 4 – матрица; 5 – пуансон; 6 – направляющая втулка; 7 – пресс-шайба; 8 – контейнер

Прессование широко применяется для обработки металлов, как с низкими, так и высокими пластическими свойствами благодаря осуществлению трехосного сжатия, повышающего пластичность металла и позволяющего значительно деформировать его. Прессованием получают изделия из высокоуглеродистой и легированной стали, алюминия, титана и их сплавов, а также других металлов. Широко используют прессование для производства прутков, труб, различных профилей из алюминиевых, медных, никелевых сплавов. В сравнении с прокаткой прессование обеспечивает быстрый переход от одного размера и формы изделий к другим, возможность получения сплошных и полых профилей самых сложных очертаний. К недостаткам прессования следует отнести высокие отходы металла, большую неравномерность механических свойств по длине и поперечному сечению изделия, сравнительно низкие скорость и производительность процесса.

Волочение – процесс протягивания заготовки через постепенно сужающееся отверстие матрицы (волочительный глазок).

В результате поперечное сечение заготовки уменьшается, а ее длина увеличивается (рис. 26).

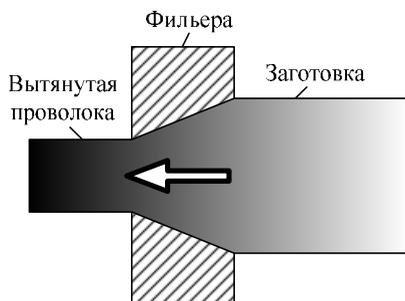


Рис. 26. Принципиальная схема процесса волочения

Волочением изготавливают проволоку.

Ковка – деформирование металла путем целенаправленно наносимых ударов или нажатий. Изделие, полученное в результатековки, называется **поковкой**.

В зависимости от используемого оборудования реализуется (рис. 27):

1. Свободная ковка.
2. Штамповка (ковка в штампах).

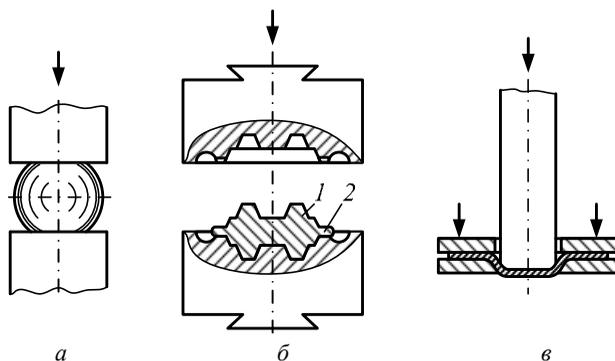


Рис. 27. Принцип устройства штампов при ковке и штамповке металла:
а – свободная ковка; *б* – объемная штамповка; *в* – листовая штамповка; *1* – поковка;
2 – облой (излишки материала, остающиеся на детали после обработки)

При штамповке требуемые формы и размеры заготовки получаются в результате принудительной деформации металла в ручье специального приспособления – штампа. Исходные заготовки для штамповки отрезаются от сортового или периодического проката.

1.12.4. Получение заготовок резанием

Резка металла – это отделение частей (заготовок) от сортового, листового или литого металла.

Все способы обработки резанием условно делятся на две группы:

1. Термическая резка и резка воздействием струи.
2. Механическая резка.

Термическая резка и резка воздействием струи также делятся на виды:

1. Газокислородная резка.
2. Плазменная резка.
3. Лазерная резка.
4. Гидроабразивная резка.

Процесс **газокислородной резки** металла заключается в сжигании твердого подогретого металла в струе чистого кислорода. Части детали разделяются вдоль линии разжигения и сжигания металла.

Плазменная резка металла производится за счет интенсивного расплавления металла вдоль линии резания теплом сжатой электрической дуги и последующего удаления жидкого металла высокоскоростным плазменным потоком. Плазма – это полностью или частично ионизированный газ, обладающий температурой порядка 15000 °С–20000 °С. Соответственно, производительность плазменной резки будет в разы выше газокислородной, температура которой достигает всего 1800 °С.

Этот вид является одним из самых экономичных способов. Плазменная резка экономически целесообразна для обработки: алюминия и сплавов на его основе толщиной до 120 мм; меди толщиной до 80 мм; легированных и углеродистых сталей толщиной до 50 мм; чугуна толщиной до 90 мм.

Лазерная резка – заключается в интенсивном воздействии лазерного луча на металл. Лазерный луч позволяет разрезать металлы толщиной до 15–20 мм, наибольший эффект достигается при толщине 6 мм.

Преимущества метода лазерной резки: самая маленькая ширина реза, которая может достигать всего 0,1 мм; высокая производительность, высокое качество поверхности; отсутствие динамических или статических напряжений, воздействующих на металл, благодаря четко направленному световому потоку лазера в зону резания.

Общий недостаток методов газокислородной, плазменной и лазерной видов резки в том, что высокая температура меняет состав и структуру сплава на срезе, следовательно, требуется дополнительная механическая обработка краев.

Гидроабразивная резка – резка струей воды, выходящей из сопла под огромным давлением. Это самая инновационная технология резки металла, она способна резать сталь толщиной до 300 мм. При резке мягких материалов используется чистая струя воды, а за счет перемешивания в качестве абразива гранатового песка можно производить резку материалов любой твердости (рис. 28).

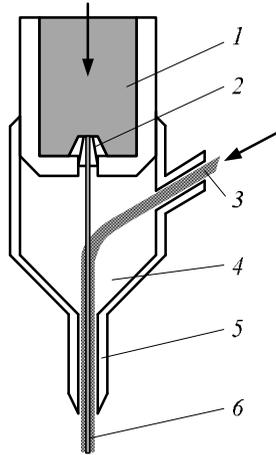


Рис. 28. Принципиальная схема гидроабразивной резки:
1 – емкость с водой под давлением 4000 бар; 2 – сопло; 3 – абразив;
4 – смешивающая камера; 5 – смешивающая трубка; 6 – струя воды с частицами абразива

Важнейшим преимуществом технологии водоструйной резки является отсутствие нагрева разрезаемых заготовок, что исключает напряжения и деформации обрабатываемого материала. Результатом являются резы очень высокого качества, не требующие последующей дорогостоящей обработки. Второе преимущество – тонкая, как волос, струя, создает существенно меньшие потери материала по сравнению с другими процессами резки.

Недостатки метода гидроабразивной резки металла: крайне высокая стоимость резки, требуется постоянный контроль и ремонт устройства, так как рабочие детали очень быстро изнашиваются из-за высокого давления.

Основные промышленные способы **механической резки** следующие:

1. Рубка с помощью гильотин.

2. Ленточно-пильная резка (ЛПР) с использованием ленточного конвейера.

3. Резка циркулярной пилой.

4. Резка ножницами по металлу для получения деталей из заготовок – сверление, фрезеровка, строгание, шлифование.

1.12.5. Сварка

Сварка – это технологический процесс получения неразъемного соединения материалов за счет образования атомной связи.

Процесс создания сварного шва протекает в 2 стадии. На первой стадии необходимо сблизить поверхности свариваемых материалов на расстояние действия сил межатомного взаимодействия ($\sim 4 \cdot 10^{-10}$ м). На второй стадии осуществляется преодоление энергетического барьера поверхностных слоев атомов и образование межатомных связей. Контакт между соединяемыми поверхностями достигается либо за счет расплавления материала, либо в результате пластических деформаций, возникающих в результате прикладываемого давления.

В зависимости от формы используемой энергии различают **три класса сварки** (рис. 29):

- 1) термический (сварка плавлением);
- 2) механический (сварка давлением);
- 3) термомеханический.



Рис. 29. Классы сварки по ГОСТ

К **термической сварке** относятся виды сварки, осуществляемой плавлением без приложенного давления. Основными источниками теплоты при сварке плавлением являются сварочная дуга, газовое пламя, лучевые источники энергии и «джоулево тепло». В этом случае расплавы соединяемых металлов объединяются в общую сварочную ванну, а при охлаждении происходит кристаллизация расплава в литой сварочный шов.

Точную классификацию вида термической сварки указывают по трем признакам:

- 1) источнику нагрева металла (основная классификация);
- 2) способу защиты расплавленного металла от окружающей атмосферы;
- 3) степени механизации процесса сварки.

Например, ручная дуговая сварка покрытыми электродами. В полное название включены все три признака классификации: по степени механизации – ручная; по способу защиты – покрытыми электродами; по источнику нагрева – дуговая.

К **сварке давлением (холодная сварка)** относятся операции, осуществляемые при передаче металлу механической энергии (рис. 30).

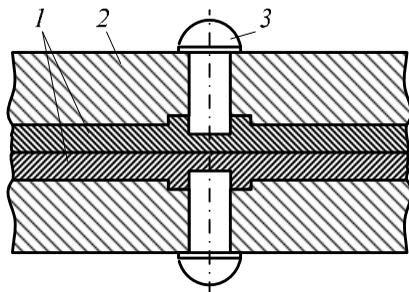


Рис. 30. Сварка давлением:
1 – свариваемые детали; 2 – прижим; 3 – пуансон

В результате металл начинает течь подобно жидкости. Металл перемещается вдоль поверхности раздела, унося с собой загрязненный слой. Свежие слои вступают в химическое взаимодействие, образуя химическую связь.

Свариваемые детали с тщательно зачищенной поверхностью в месте сварки помещают между пуансонами, имеющими выступы.

Пуансоны сжимают с некоторым усилием P , выступы вдавливаются в металл на всю их высоту, пока опорные поверхности пуансонов не упрутся в наружную поверхность свариваемых заготовок.

При **термомеханической сварке** одновременно используются тепловая энергия и давление.

Объединение соединяемых частей осуществляется за счет приложения давления к подогретым заготовкам, подогрев обеспечивает нужную пластичность материала. Соотношение между температурой и давлением для образования сварного соединения показано на рис. 31.

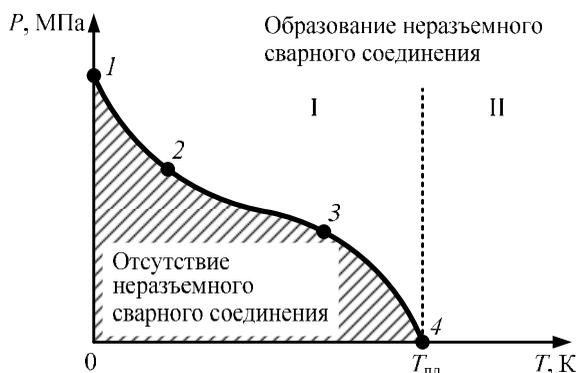


Рис. 31. Соотношения между температурой и давлением, при которых возможно образование сварного соединения в области I.

1.13. Защита металлических материалов от коррозии

Коррозия – это самопроизвольное разрушение металлических материалов под воздействием химического или физико-химического влияния окружающей среды.

Способность металлов сопротивляться воздействию среды называется коррозионной стойкостью или химическим сопротивлением материала.

Металл, подвергающийся коррозии, называют корродирующим металлом, а среда, в которой протекает коррозионный процесс – коррозионной средой.

Атмосферная коррозия является одним из самых распространенных видов разрушений металлических изделий, поскольку

сельскохозяйственная техника, стальные мосты, технологические трубопроводы, объекты транспорта хранятся и эксплуатируются на открытом воздухе. Лучше ее предотвращать, чем ликвидировать ее последствия. Химической коррозии наиболее подвержены цветные металлы – медь, свинец, магний, сплавы этих металлов и их оксиды. В широком понимании, коррозии подвергаются не только металлы, но и любые материалы: бетон, пластмасса, резина, керамика и др.

Для предохранения металлов от коррозии используют:

1) консервационные материалы (консервационные масла, консервационные смазки);

2) специальные вещества, замедляющие процесс коррозии – ингибиторы коррозии.

При выборе средства временной противокоррозионной защиты для достижения наибольшей эффективности необходимо учитывать все аспекты его использования: вид защищаемого изделия, его конфигурацию, применяемые при его изготовлении металлы (черные, цветные) условия климата, в которых предполагается эксплуатация изделия (холодный, умеренный, сухой, влажный тропический), влияние окружающей среды (сельская, лесная, горная, промышленная, морская), а также условия (категории) хранения и транспортирования.

1.13.1. Консервационные материалы

Консервационные материалы – это материалы, используемые для предотвращения атмосферной коррозии машин и деталей при их длительном хранении и транспортировке. Такие материалы подразделяют на жидкие консервационные масла и смазки.

Жидкие консервационные масла – это, как правило, нефтяные масла с антикоррозионными присадками (1 %–3 % по массе). Применяются для защиты от коррозии внутренних полостей двигателей внутреннего сгорания, компрессоров, редукторов и др. Консервационные масла готовят на основе других масел (авиационных, трансформаторных, промышленных) с добавкой композиций присадок и добавок – окисленного петролатума, каучука, мыл (чаще всего литиевых). Например, кинематическая вязкость масла К–17 при 100 °С составляет 15,5–21,0 мм²/с (сСт).

Консервационные смазки – загущенные парафином или церезином нефтяные масла. Широко распространены смазки Е–1, канатная

39у и особенно ПВК. Менее распространены смазки ЗЭС и ПП–95/5. Традиционные пластичные смазки – технический вазелин, пушечная смазка и т. п. Вазелины имеют температуру плавления (50 °С–60 °С), водостойки, устойчивы к окислению, морозостойчивы.

При правильном подборе и нанесении консервационных материалов они препятствуют прониканию к металлической поверхности коррозионно-агрессивных веществ, влаги и кислорода воздуха, тем самым предотвращают коррозию длительное время – в течение 10–15 лет.

1.13.2. Ингибиторы коррозии

Ингибиторы – это вещества, которые, находясь в коррозионной среде в достаточной концентрации, сильно замедляют либо вообще прекращают коррозионное разрушение металла.

Ингибитором коррозии может служить как одно соединение, так и смесь нескольких. Содержание ингибиторов в коррозионной среде должно быть небольшим.

Показатели эффективности действия ингибиторов коррозии:

1. Степень защиты Z .

2. Коэффициент торможения коррозии (защитный эффект ингибитора) g .

Степень защиты Z металла от коррозии, %:

$$Z = \frac{k_1 - k_2}{k_1} \times 100 \%, \quad (10)$$

где k_1 , k_2 – скорость коррозии (растворения) металла в среде без ингибитора и с ним, г/(м²·ч).

Значение Z равно 100 % тогда, когда металл полностью защищен, и скорость коррозии сводится к 0.

Защитный эффект ингибитора рассчитывается по формуле:

$$g = \frac{k_1}{k_2}. \quad (11)$$

Коэффициент торможения показывает, во сколько раз под действием ингибитора уменьшается скорость коррозии.

Между коэффициентом торможения и степенью защиты существует связь, определяющаяся формулой:

$$Z = \frac{\alpha}{\beta} - \frac{1}{g} \times 100 \% . \quad (12)$$

Ингибиторы коррозии подразделяются:

1. По механизму действия – на катодные, анодные и смешанные.
2. По химической природе – на неорганические, органические и летучие.
3. По сфере своего влияния – в кислой, щелочной и нейтральной среде.
4. По характеру защитного действия – пассивирующие ингибиторы и адсорбционные ингибиторы.

Адсорбционные ингибиторы коррозии адсорбируются на поверхности защищаемого изделия, образуя пленку, и тормозят электрохимические реакции. Иногда достаточно образование тонкой мономолекулярной пленки. Адсорбционными ингибиторами чаще всего являются ПАВ (поверхностно-активные вещества), а также органические соединения.

Пассивирующие ингибиторы коррозии чаще всего являются неорганические соединения, обладающие окислительными свойствами (нитриты, молибдаты, хроматы). При обработке поверхности этими веществами коррозионный потенциал материала сдвигается в положительную сторону. Пассиваторы являются хорошими, но опасными ингибиторами. При неверно выбранной концентрации, в присутствие ионов Cl^- или при несоответствующей кислотности среды, они могут ускорить коррозию металла, и, в частности, вызвать очень опасную точечную коррозию.

1.14. Антифрикционные материалы

Трибология – наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин.

Исследования показывают, что примерно 80 %–90 % отказов машин и механизмов происходит из-за износа узлов и деталей, а также рабочего инструмента. За полный цикл эксплуатации машин

эксплуатационные затраты (расходы, трудоемкость ремонта и затраты материалов на ремонт) в несколько раз превышают затраты на изготовление новых машин.

Одним из условий нормальной работы узла трения является такой выбор материалов, который обеспечит приемлемые потери на трение и минимальные затраты на изготовление, обслуживание и ремонт.

Рассматривают два варианта работы пары материалов в условиях трения:

1. Детали пары трения могут быть изготовлены из однотипных материалов с примерно одинаковой твердостью (подшипники качения, шестерни зубчатых передач).

2. В паре трения могут применяться разнотипные материалы с разной твердостью (подшипники скольжения, червячные передачи). В таких случаях дешевая деталь «приносится в жертву» более дорогостоящей. Например, стальной червяк должен изнашиваться меньше колеса и выдержать несколько его замен. Вал подшипника должен изнашиваться меньше опоры.

Антифрикционные материалы (АФ) – материалы, обладающие в определенных условиях низким коэффициентом трения либо материалы, способные уменьшить коэффициент трения других материалов.

АФ материалы должны иметь следующие **свойства**:

1. Совместимость – АФ материал должен иметь малый коэффициент трения, небольшую склонность к заеданию с материалом сопряженной детали и не изнашивать её. Совместимость может меняться со временем (во время и после приработки) и зависит от режима смазки.

2. Прирабатываемость – способность материала изменять геометрию поверхности, степень микронеровностей и структуру поверхностного слоя. После приработки снижается коэффициент трения и возрастают допустимые нагрузки.

3. Износостойкость – определяет сопротивление различным видам изнашивания.

4. Стойкость к заеданию. Чем выше значения нагрузок и скоростей, при которых происходит схватывание с материалом сопряженной детали, тем выше стойкость к заеданию.

5. Способность к поглощению твердых частиц (абразивных частиц и продуктов износа). Если они способны «вдавливаться» в основу, то абразивное воздействие на сопряженную деталь минимизируется.

6. Сопротивление усталости – чем большее число циклов нагружения при заданной нагрузке выдерживает материал, тем позже развивается усталостное изнашивание.

7. Термостойкость – чем меньше зависят от температуры физико-химические и механические свойства АФ материала, тем менее чувствителен он к повышению температуры во время работы. Прежде всего, это важно с точки зрения предупреждения заедания при перегреве. Кроме этого, желательно, чтобы коэффициент теплопроводности был большим (лучше отвод тепла), а коэффициент теплового расширения минимальным (стабильность зазоров).

1.14.1. Металлические антифрикционные материалы

Металлические АФ материалы подразделяются на два типа:

1. Сплавы с мягкой матрицей и твердыми включениями.
2. Сплавы с твердой матрицей и мягкими включениями.

К АФ **сплавам первого типа** относятся баббиты и сплавы на основе меди – бронзы и латуни.

Баббиты – мягкие сплавы на оловянной или свинцовой основе. Структура оловянных баббитов состоит из мягкой основы (раствора сурьмы в олове) и равномерно распределенных в ней твердых частиц химического соединения SnSb. Таким образом, сурьма упрочняет мягкую основу баббитов и создает включения высокой твердости. В зависимости от химического состава устанавливаются следующие марки баббитов: Б88, Б83, Б83С (оловянные баббиты); В16, ВН и ВС6 (свинцовые баббиты). Среди баббитов лучшими антифрикционными свойствами обладают оловянные. Они применяются для подшипников ответственного назначения, когда от антифрикционного материала требуются минимальный коэффициент трения, высокая износостойкость и вязкость. Износ оловянных баббитов в 2 раза меньше износа свинцовых. Все оловянные баббиты содержат в своем составе сурьму и медь, а баббит марки Б88 дополнительно легирован кадмием и никелем.

Бронзы используются для изготовления подшипниковых узлов, работающих при повышенных удельных давлениях и больших скоростях. К лучшим антифрикционным сплавам относятся оловянистые и оловянисто-цинково-свинцовистые бронзы Бр О10Ф1, Бр О10Ц2, Бр О5Ц5С5, Бр О6Ц6С3. Их используют при изготовлении подшипников скольжения турбин, электродвигателей, компрессоров. В последние годы бронзы используются как компоненты порошковых антифрикционных материалов или тонких пористых покрытий, пропитываемых твердыми смазочными материалами.

Латуни по антифрикционным свойствам значительно уступают бронзам и чаще всего используются в качестве заменителей последних. Латуни марок ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А и других применяются при малых скоростях скольжения и невысоких давлениях, например, для опор трения приборов.

К **АФ сплавам второго типа** относятся свинцовистая бронза БрС30 (с 30 % свинца) и алюминиевые сплавы с оловом, например, сплав АО9–2 (9 % олова и 2 % меди). Функцию мягкой составляющей в этих сплавах выполняют включения свинца или олова. В случае граничного трения на поверхность вала переносится тонкая пленка этих мягких легкоплавких металлов, защищая шейку стального вала от интенсивного изнашивания.

1.14.2. Неметаллические антифрикционные материалы

Представляют собой в основном пластмассы. Из терморезистивных пластмасс широко используется текстолит, из которого изготавливаются подшипники прокатных станков, гидравлических машин, гребных винтов. Такие подшипники хорошо смазываются водой, которая их охлаждает.

Из полимеров наибольшее распространение получили анид, капрон, фторопласты (Ф4, Ф40). Однако фторопласты плохо отводят тепло и размягчаются под нагрузкой. Поэтому они применяются только при пониженных нагрузках и скоростях или в комбинации с другими материалами в виде тонких пленок и наполнителей.

2. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Главным отличием неметаллических материалов является атомное или молекулярное строение с ковалентной химической связью атомов. Ковалентные связи атомов осуществляются через образование общих электронных пар, т. е. в отличие от металлов, в неметаллах отсутствует электронный газ, а значит, они имеют низкие тепло- и электропроводящие свойства. На свойства неметаллических материалов существенное влияние оказывает также и их структура – для большинства она аморфная. Такая структура характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов.

Можно условно выделить 3 основных класса искусственных неметаллических материалов:

1. Полимерные материалы (пластмассы, резины).
2. Керамика.
3. Неорганическое стекло.

2.1. Полимерные материалы. Пластмассы и эластомеры

Это материалы на основе высокомолекулярных соединений (полимеров).

Полимер – органическое (природное или синтетическое) высокомолекулярное соединение, полученное в результате химической реакции между молекулами низкомолекулярных веществ – мономеров. **Мономер** – низкомолекулярное вещество, используемое для получения полимера.

Полимеры – материалы, молекулы которых состоят из множества повторяющихся структурных звеньев, соединенных между собой химическими связями.

Молекула полимера по размерности может быть линейной, плоской или пространственной (рис. 32).

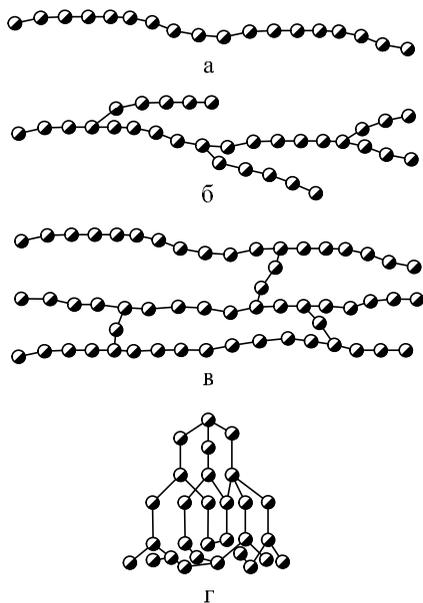


Рис. 32. Виды молекул полимеров:

а – линейные; б – разветвленные; в – лестничные; г – пространственные

Структурное звено полимера – это группа атомов, многократно повторяющаяся в полимере. Степень полимеризации – число структурных звеньев в 1 макромолекуле. Так как структурное звено может повторяться в молекуле миллионы раз, молекулярная масса полимера огромна – от нескольких тысяч до нескольких миллионов а.е.м.

Например, популярный полимер «полиэтилен» имеет структурное звено $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)$, т. е. эта группа атомов повторяется n раз. Это продукт реакции полимеризации мономера, бесцветного газа – этилена (C_2H_4). Полиэтилен – один из самых легких материалов, имеет высокую эластичность, отличные электроизоляционные свойства, химически стоек, водонепроницаем, морозостоек до $-70\text{ }^\circ\text{C}$, пластичен, недорог, технологичен (рис. 33).

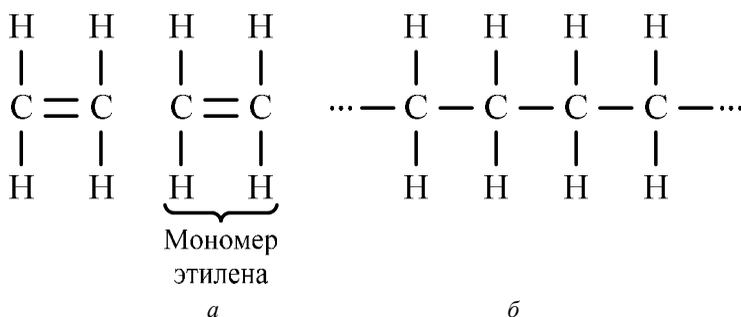


Рис. 33. Молекулы полимеров: a – этилен; b – полиэтилен

2.1.1 Пластмассы

Пластмассы – искусственные материалы, полученные на основе полимерных связующих веществ и различных добавок. Пластмасса = Полимер + наполнитель + краситель (пигмент) + отвердитель+.. др.

Основная классификация пластмасс (рис. 34):

1. Термопластичные (термопласты), получаемые на основе линейных полимеров. Термопласты при нагревании приобретают пластичность, а при охлаждении возвращаются в исходное состояние – отверждаются при охлаждении.

2. Термореактивные (реактопласты) – на основе полимеров с пространственной структурой. Способ их отверждения – химическая реакция (с нагреванием или без него).

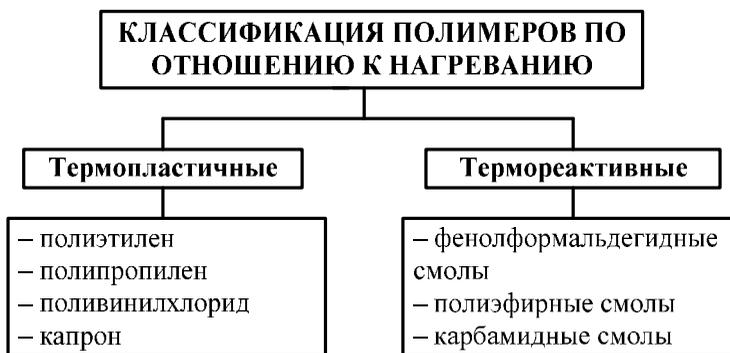


Рис. 34. Классификация пластмасс

Термопласты после формования изделия сохраняют способность к повторной переработке простым расплавлением с последующим формованием. Наиболее распространены термопласты на основе полиэтилена, поливинилхлорида, полистирола. Термопласты дают незначительную усадку при формовании (1 %...3 %), отличаются большой упругостью, малой хрупкостью и способностью к ориентации. Обычно термопласты изготовляют без наполнителя.

Реактопласты, после формования изделия, простым нагреванием не разжижаются, к каждому типу реактопласта для разжижения необходимо подобрать соответствующий химический растворитель. Отверждение происходит за счет образования поперечных химических связей, которые могут образовываться как в результате взаимодействия функциональных групп материала при нагревании, так и при помощи отвердителей, вводимых в него. При отверждении в реактопластах происходит необратимое изменение свойств. Температура отверждения может быть как высокой (80 °С–160 °С) при горячем отверждении, так и низкой – при холодном отверждении.

Реактопласты после отверждения хрупки, поэтому в их состав вводят усиливающие наполнители, превращая пластмассы в композиционные материалы.

Наполнители могут служить удешевлению пластмасс или улучшению их механических (армирующие наполнители) или других свойств, например, теплоизоляционных.

От состава пластмассы зависит, будет ли она однофазным полимерным материалом или многофазным композитом.

Классификация пластмасс по типу наполнителя:

1. **Порошковые.** Содержат пресс-порошки с наполнителями в виде древесной муки, сульфитной целлюлозы, графита, талька, измельченного стекла, мрамора, асбеста, слюды. Придают пластмассам ценные свойства – теплостойкость, кислотостойкость и т. д. Повышают твердость, увеличивают долговечность, снижают стоимость.

2. **Волокнистые.** С наполнителями в виде волокон (нитей). Натуральные наполнители – очесы хлопка и льна, стекловолокно, асбест и т. п. Волокна повышают прочность и снижают хрупкость, повышают теплостойкость и ударную вязкость пластмасс.

3. **Слоистые.** Содержат листовые наполнители – листы бумаги, хлопчатобумажные, стеклянные, асбестовые ткани, древесный шпон и т.п. Придают материалу высокую прочность. Например, асбестовый картон придает пластмассе высокую прочность, теплостойкость и кислотостойкость. Наполнители намного дешевле полимеров. Поэтому, чем больше наполнителя, тем дешевле изделие из пластмасс.

4. **Крошкообразные.** Наполнитель в виде кусочков ткани или древесного шпона.

5. **Газонаполненные.** Наполнитель – воздух или нейтральные газы. В зависимости от структуры газонаполненные пластмассы подразделяют на пенопласты и поропласты.

В состав пластмасс могут входить также **пластификаторы**. Они применяются для придания пластмассе большей пластичности при нормальной температуре. Количество пластификатора в пластмассе может достигать 30 %–50 % от массы полимера. Пластификаторы должны быть химически инертными, малолетучими и нетоксичными веществами.

Стабилизаторы предотвращают старение пластмасс, отвердители сокращают время отверждения пластмасс.

Катализаторы ускоряют процесс отверждения пластмасс, то есть сокращают время. Например, для фенолформальдегидного полимера таким ускорителем отверждения являются известь и уротропин.

Смазывающие материалы – это материалы, предотвращающие прилипание пластмасс к формам, в которых изготавливают изделия. В качестве смазки используют стеарин, олеиновую кислоту и др.

Красители (пигменты) придают пластмассам определенный цвет. Они должны быть стойкими во времени, потому в качестве

красителей используют определенные вещества – как органические (нигрозин, пигмент желтый и др.), так и минеральные (охра, сурик, белила, окись хрома, ультрамарин и др.).

2.1.2. Преимущества пластмасс

Преимущества пластмасс как конструкционных материалов:

1. Низкая плотность (обычно $1,0\text{--}1,8\text{ г/см}^3$, в некоторых случаях до $0,02\text{--}0,04\text{ г/см}^3$).

2. Высокая коррозионная стойкость. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей, большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении.

3. Высокие диэлектрические свойства.

4. Хорошая окрашиваемость в любые цвета. Некоторые пластмассы могут быть изготовлены прозрачными, не уступающими по своим оптическим свойствам стеклам.

5. Механические свойства широкого диапазона. В зависимости от природы выбранных полимеров и, особенно, наполнителей, пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими. Ряд пластиков по своей механической прочности превосходит чугун и бронзу. При одной и той же массе пластмассовая конструкция может по прочности соответствовать стальной.

6. Антифрикционные свойства. Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов (оловянных бронз, баббитов и др.). Например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без смазки.

7. Высокие теплоизоляционные свойства. Все пластмассы, как правило, плохо проводят теплоту, а теплопроводность пено- и поропластов еще почти в 10 раз меньше, чем у обычных пластмасс.

8. Высокие адгезионные свойства (адгезия – прилипание).

9. Хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии – литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений или в вакууме.

2.1.3. Недостатки пластмасс

Важнейшим недостатком большинства пластмасс является их невысокая теплостойкость (до $100\text{--}120\text{ }^\circ\text{C}$). Верхний температурный

предел для некоторых видов пластмасс, используемых в наши дни, составляет 300 °С–400 °С. Пластмассы могут работать при умеренно низких температурах (до –70 °С), а в отдельных случаях – при криогенных температурах.

Также серьезными недостатками пластмасс являются их низкая твердость, склонность к старению, ползучесть, нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам.

Однако положительные свойства пластмасс значительно превосходят их недостатки, потому в мире наблюдаются высокие темпы роста ежегодного производства этих материалов.

2.1.4. Маркировка пластмасс

В 1988 году Общество пластмассовой промышленности разработало коды идентификации смол (Resin Identification Codes) для сортировки различных видов пластмассовых бытовых отходов. Наиболее часто используемым в упаковках видам пластмасс были присвоены числа 1–6. Код 7 (прочие пластмассы) был введен для штатов США, в которых законодательство требовало обязательной маркировки упаковок.

В 2010 г. эти коды стали **стандартом** ASTM D7611/D7611M, Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification. Современная маркировка (коды) пластмасс представлена в табл. 3.

Таблица 3

Маркировка пластмасс

Код/ маркировка	Название пластика/пластмассы	Для чего используют	Вредные вещества
1	2	3	4
	ПЭТФ	Одноразовая тара	Так как выделяют фталаты, повторное использование строго запрещено
	Полиэтилен высокой плотности	Используется для производства обычных и термоусадочных пленок, мешков, винтовых колпачков	Может выделять канцерогенные вещества, формальдегид

1	2	3	4
	<p>Поливинилхлорид</p>	<p>Сегодня ПВХ занимает второе место после полиэтилена по потреблению среди синтетических полимеров. Из ПВХ производят все – от медицинских емкостей для крови до изоляционных материалов и оконных профилей</p>	<p>Выделяет канцерогенные вещества при контакте с жирами и горячими продуктами (винилхлорид и фталаты)</p>
	<p>Полиэтилен низкой плотности</p>	<p>Применяется при изготовлении коррозионно-стойких рабочих поверхностей, различных вспомогательных деталей и аксессуаров для компьютеров, упаковки</p>	<p>Выделяет формальдегид</p>
	<p>Полипропилен</p>	<p>Производят трубы, емкости для воды, септики. Это отличный электроизоляционный материал</p>	<p>Выделяет формальдегид (запрещено подвергать термической обработке)</p>

1	2	3	4
	Полистирол	Хороший тепло-изоляционный материал	Выделяют стирол при высоких температурах, крайне негативно влияют на репродуктивную функцию
	Поликарбонат	Используют везде, где требуется создание светопрозрачной конструкции, выдерживающей значительные ветровые и весовые нагрузки, где нужны долговечность цвета и упругость, а масса конструкции должна быть как можно меньше	Некоторые марки могут выделять вредное вещество БИСФЕНОЛ-А. Такую тару запрещено нагревать

2.1.5. Методы получения заготовок из пластмасс

Большинство методов получения заготовок из пластмасс аналогичны получению металлических заготовок. Самые распространенные методы – литье под давлением (в основном, для термореактивных пластмасс) и экструзия (для всех основных типов полимерных материалов: термопластов, реактопластов, эластомеров).

Экструзия – способ получения заготовок из полимерных материалов неограниченной длины путем выдавливания расплава

полимера через формирующую головку (фильеру) нужного профиля. По характеру исполнения экструзия подобна волочению металлов. Таким методом получают изделия неограниченной длины: пленки, листы, трубы, шланги, изделия сложного профиля и др.

Литье под давлением – это технологический процесс, в ходе которого исходный материал впрыскивается (или вязкий расплав продавливается) в специальную пресс-форму, после чего линейно застывает, то есть возле холодных стенок формы застывание происходит быстрее, чем в центре. Идеально подходит для получения заготовок сложной формы, требующих высокой точности размеров. В методе обычно используют гранулы термопластов, термоэластопластов или терморективных. Широкое распространение этого вида изготовления заготовок из пластмасс обусловлено его простотой и дешевизной.

2.1.6. Эластомеры

Эластомер (каучук, резина) – полимерный материал, который восстанавливает начальную форму и размер после деформации. Эластомерами являются натуральные и искусственные каучуки и резины. Все они являются полимерами, молекулярные цепи которых скручены. Их эластичность обусловлена тем, что при растяжении эластомера происходит распрямление этих цепей.

Натуральный каучук – полимер – высокомолекулярный углеводород $(C_5H_8)_n$. Содержится в млечном соке (латексе) гевеи, коксагыза (разновидности одуванчика) и других растений. В сыром виде применяют не более 1 % (резиновый клей). В промышленных масштабах натуральный каучук производится в Индонезии, Малайзии, Вьетнаме. Мало распространен, потому в промышленных масштабах используют искусственные каучуки.

2.1.7. Основные типы синтетических каучуков

К синтетическим каучукам относятся изопреновый, силоксановый, бутадиеновый, бутадиен-метилстирольный, фторкаучуки, тиоколы, бутилкаучук этилен-пропиленовый, бутадиен-нитрильный, хлоропреновый (поли-2-хлорбутадиен) каучуки.

Резина – продукт вулканизации композиций на основе каучука.

Вулканизация каучука – нагревание каучука в присутствии вулканизирующего вещества, называемого вулканизирующим агентом.

Обычно в качестве агента для получения резин используется **сера**. При содержании серы в резиновой смеси в количестве более 5 % получается твердая резина. При содержании серы до 47 частей на 100 частей каучука получают твердый и жесткий продукт – **эбонит**.

Таким образом, композиция для получения резины следующая: **резина = каучук (20 %–60 %) + агент + ингредиенты**.

Ингредиенты – различные вещества, добавляемые в состав резиновой смеси с целью придать резине какие-либо определенные качества. Подобные ингредиенты вводятся и в состав пластмасс.

Ингредиенты:

1. Ускорители процесса вулканизации – полисульфиды, оксиды свинца, магния и др. Влияют на режим вулканизации и на физико-механические свойства вулканизатов.

2. Противостарители (антиоксиданты) – замедляют процесс старения резины, который ведет к ухудшению ее эксплуатационных свойств. Существуют противостарители химического и физического действия.

3. Мягчители (пластификаторы) облегчают переработку резиновой смеси, увеличивают эластические свойства каучука, повышают морозостойкость резины. В качестве мягчителей вводят парафин, вазелин, стеариновую кислоту, битумы, дибутилфталат, растительные масла.

4. Наполнители, которые подразделяют на активные (усиливающие) и неактивные (инертные). Активные наполнители (углеродистая сажа и белая сажа) повышают механические свойства резин: прочность, сопротивление истиранию, твердость. Неактивные (мел, тальк, барит) удешевляют стоимость резины. Часто в качестве наполнителя состав резиновой смеси вводят **регенерат** – продукт переработки старых резиновых изделий и отходов резинового производства.

5. Красители (минеральные или органические).

2.2. Керамические конструкционные материалы

Керамика – материалы, получаемые спеканием тугоплавких неметаллических порошков при температурах, существенно ниже температур их плавления. «Керамика» – это материалы, полученные по особой керамической технологии.

Основные этапы технологического цикла получения керамики:

1. Тонкий размол и тщательное смешивание порошков исходных компонентов.
2. Пластификация массы и образование формовочного полуфабриката. Формовка изделия, сушка.
3. Спекание (высокотемпературный обжиг).

Для получения качественной конструкционной керамики необходимы следующие условия:

- 1) размер частиц не более 1 мкм;
- 2) удельная поверхность частиц не более $10 \text{ м}^2/\text{г}$;
- 3) высокая степень чистоты порошков;
- 4) введение добавок, формирующих жидкую фазу или твердые растворы;
- 5) совмещение процессов прессования и спекания (горячее прессование, прессование в аппаратах высокого давления, взрывное прессование).

Керамика – многофазный материал (**квазикристаллический**). Керамика состоит из кристаллической, аморфной и газовой фаз. Участки кристаллической фазы сцементированы аморфной стеклофазой. Присутствует также пористость (газовая фаза), что способствует повышенной гигроскопичности.

2.2.1. Достоинства и недостатки керамических материалов

По диапазону свойств керамические материалы – рекордсмены. Им свойственны высокая температура плавления, высокая твердость, высокий модуль упругости, керамика химически инертна, имеет большой диапазон электрических и тепловых свойств (от сверхпроводников до диэлектриков, от теплоизоляторов до высоко теплопроводящих материалов). Керамика обладает различными специфическими свойствами (эмиссионными, оптическими, ядерными, каталитическими).

Важным достоинством керамики является доступность сырья.

К недостаткам следует отнести чувствительность к термоударам, хрупкость, сложность в механической обработке.

Пути снижения хрупкости керамики:

- 1) введение в состав диоксида циркония;
- 2) армирование волокнами из хрома, никеля, ниобия, вольфрама;

3) применение специальных технологий формирования микротрещин в структуре керамики (рис. 35).

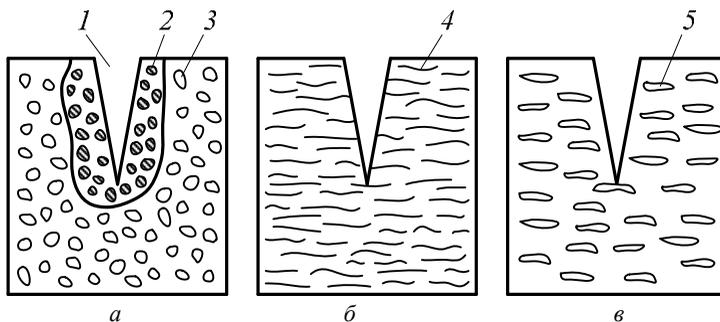


Рис. 35. Пути снижения хрупкости керамики:

а – введение в состав диоксида циркония; *б* – армирование металлическими волокнами; *в* – формирование микротрещин; 1 – трещина; 2 – зерна моноклинного диоксида циркония; 3 – зерна тетрагонального диоксида циркония; 4 – волокна; 5 – микротрещины

Исторически первая керамика – керамика на основе глины.

Глина представляет собой измельченную горную породу различного химико-минералогического состава.

Глина – продукт разрушения некоторых горных пород (гранита, гнейса, порфира). Получающийся при этом водный алюмосиликат $Al_2O_3-2SiO_2-2H_2O$ (каолинит) является главной составной частью огнеупорных глин и каолинов (глин белого цвета). Глиняная керамика и в настоящее время остается актуальным конструкционным материалом. Из нее изготавливаются посуда, вазы, скульптуры, игрушки, кирпич, изразцы, черепица, облицовочные плитки и архитектурные детали. Виды глиняной керамики определяются составом глин, режимом обжига, приемами художественного оформления и т. д.

Основные виды глиняной керамики – **майолика, терракота, шамот, фарфор, фаянс.**

Терракотой называют желтую или красную обожженную глину и изделия из нее (неглазурованные).

Шамот (фр. *chamotte*) – алюмосиликатный огнеупорный материал из белой глины.

Фарфор – материал, состоящий из каолина, глины, кварца и полевого шпата. Его характерные признаки: белый цвет, тонкостенность (тонкий черепок), отсутствие пористости, высокая прочность, термическая и химическая стойкость.

Фаянс – исторически изобретен до фарфора. От фарфора отличается гораздо большим содержанием глины (до 85 %) и характеризуется гораздо более высокой пористостью, водопоглощением (до 20 %), а также меньшей механической прочностью.

До сих пор глиняная керамика широко применяется в промышленности и быту. В электротехнике ее применяют в качестве изоляционного материала, она остается одним из важнейших конструкционных материалов в строительстве (кирпич, черепица, керамическая плитка). Изделия из глиняной керамики, благодаря их огнеупорности и кислотоупорности, широко распространены в химической промышленности и т. д.

2.2.2. Техническая керамика

Техническая керамика – это керамические материалы, содержащие минимальное количество или совсем не содержащие глины. Такая керамика имеет различный химический и фазовый состав и обладает специфическими комплексами свойств.

Классификация технической керамики по составу:

- 1) кислородная;
- 2) бескислородная.

Основа кислородной керамики – тугоплавкие оксиды металлов: алюминия Al_2O_3 (корунд), циркония ZrO_2 , кальция CaO , бериллия BeO и др.

Бескислородная керамика производится на основе тугоплавких соединений – карбидов, общая формула MeC , например, карбид кремния SiC , боридов (MeB), нитридов (MeN), силицидов ($MeSi$) и сульфидов (MeS).

2.2.3. Применение керамики в электротехнике

Электротехника и приборостроение активно используют керамику. Так, для производства высококачественных изоляторов используется оксидбериллиевая и нитридалюминиевая керамика. Керамические

детали используют при создании преобразователей и микрофонов, головок звукозаписи и гидролокаторов с характеристиками, соответствующими современным требованиям. Производства, специализирующиеся на создании электрооптических приборов и диффузных отражателей лазерных установок, используют сегнетоэлектрическую керамику. Из бариевой, стронциевой, марганцово-цинковой керамики изготавливаются ферриты, которые находят применение в постоянных магнитах электродвигателей. Их также используют в различном радио- и микроволновом оборудовании, приборах для точной настройки и магнитозаписи.

2.3. Неорганическое стекло

Многовековая история стеклоделия связана с производством силикатных стекол, основывающихся на системе $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$. Только во второй половине XX в. было показано, что эти стекла составляют лишь малую часть от многообразия неорганических стекол.

Неорганическое стекло – это особого вида затвердевший раствор, образующийся в результате переохлаждения расплава (независимо от его химического состава).

Как под классом материалов «керамика» подразумевают особую керамическую технологию, так под классом материалов «стекло» подразумевают особое стеклообразное (квазиаморфное) состояние.

2.3.1. Структура стекла

В соответствии с современными теориями, в стекле существуют микроучастки с упорядоченной структурой, то есть стекло имеет квазиаморфную структуру. В стекле наблюдается ближний порядок и отсутствует упорядоченность на больших расстояниях (дальний порядок), свойственная кристаллическому состоянию. Отсутствие дальнего порядка подтверждается изотропностью стекла. Стекло не имеет определенной точки плавления (рис. 36): при нагревании оно постепенно размягчается, переходя из твердого хрупкого состояния в высоковязкое, и затем в жидкое (стекломассу). При понижении температуры идет обратный процесс.

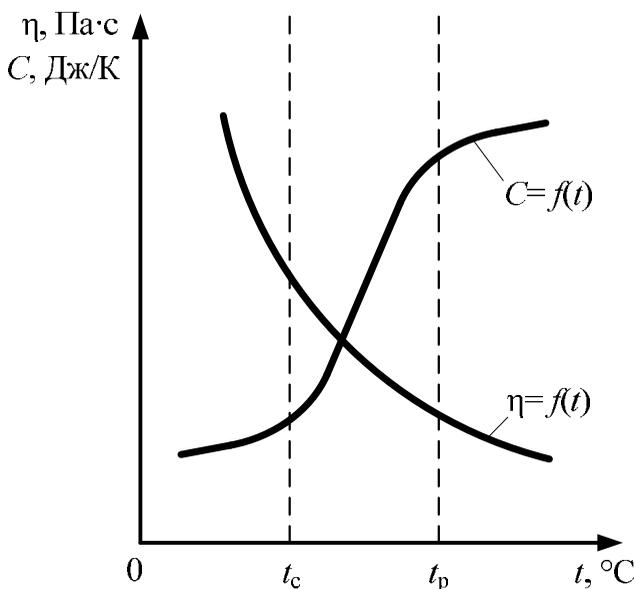


Рис. 36. Зависимость свойств стекла от температуры:
 η – вязкость, Па·с; C – теплоемкость, Дж/К; t_c – температура стеклования, °С;
 t_p – температура размягчения, °С

Например, для промышленных силикатных стекол температура стеклования $t_c = 425\text{ °С} - 600\text{ °С}$, температура размягчения лежит t_p в пределах $600\text{ °С} - 800\text{ °С}$. В интервале температур между t_c и t_p стекла находятся в высоковязком пластическом состоянии. При температуре выше t_p ($1000\text{ °С} - 1100\text{ °С}$) проводятся все технологические процессы переработки стекломассы в изделия.

Стекло под влиянием некоторых воздействий (ультрафиолетовое или рентгеновское облучение и др.), а иногда и самопроизвольно, может кристаллизоваться. Это явление называют «расстекловыванием».

Основной химический состав конструкционных стекол:

- 1) стеклообразующие вещества (стеклообразователи);
- 2) модифицирующие вещества (модификаторы).

Стеклообразующие вещества создают структурную сетку стекла (рис. 37).

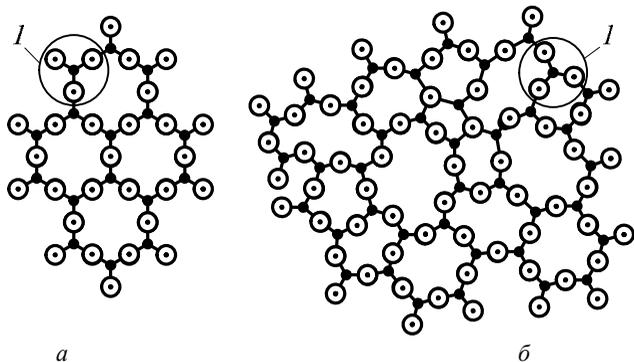


Рис. 37. Структура кристалла кварца (а) и кварцевого стекла (б)

Стеклообразователь – окись кремния. Структурный элемент 1 $[\text{SiO}_4]$ строго определенно повторяется в кристалле (рис. 37, а) и разнообразно – в стекле (рис. 37, б).

Модификаторы вводятся для придания стеклу определенных свойств. Примером модификации свойств стекла может служить ввод в силикатное стекло оксидов щелочноземельных металлов (I, II группа: Na, K), что снижает температуру размягчения. Оксиды хрома, железа, ванадия придают стеклу определенные цвета. Оксиды свинца увеличивают коэффициент преломления.

2.3.2 Классификация стекол

Стекла классифицируют по следующим признакам:

- 1) в зависимости от химической природы стеклообразователя;
- 2) по содержанию модификаторов;
- 3) по назначению.

В зависимости от **химической природы стеклообразующего вещества** (стеклообразователя) различают:

1. **Оксидные стекла:** стекла силикатные (SiO_2), алюмосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$), боросиликатные ($\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$), алюмоборосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$), алюмофосфатные ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{P}_2\text{O}_5$).

2. **Бескислородные стекла:** галогенидные (типа Be.F_2 и др.), халькогенидные (бескислородные, типа As-X , Ge-As-X , Ge-Sb-X , Ge-P-X , где $\text{X} = \text{S}$, Se , Te). Металлические, сульфатные, нитратные, карбонатные и др.

По содержанию модификаторов стекла бывают: щелочными (содержащими окислы Na_2O , K_2O), бесщелочными и без модификаторов, например, кварцевое стекло SiO_2 .

По назначению стекла подразделяют на: технические (оптические, светотехнические, электротехнические, химико-лабораторные, приборные, трубные); строительные (оконные, витринные, армированные, стеклоблоки) и бытовые (стеклотара, посудные, бытовые зеркала и т. п.).

2.3.3. Свойства неорганических стекол

Механические свойства стекол: хрупкость, отсутствие пластичности, чувствительность к ударам.

Плотность различных неорганических промышленных стекол колеблется от 2,2 до 8,0 г/см³. Значение модуля упругости стекол колеблется в пределах 44,2–87,2 ГПа.

Например, кварцевое стекло имеет следующие механические свойства. Модуль упругости 73,2 ГПа. Ударная вязкость 1,5 – 2,0 кН/м. Сопротивление сжатию у кварцевого стекла такое же, как у чугуна 0,5–2,5 ГПа.

Оптические свойства: неорганические стекла прозрачны в различных областях спектра. Так, оксидные стекла обладают высокой прозрачностью в видимой области спектра: коэффициент прозрачности для силикатного (оконного) стекла равен 0,83–0,90 (коэффициент прозрачности определяется как отношение интенсивности света, прошедшего сквозь стекло, к интенсивности света, падающего на поверхность стекла).

По своим электрическим свойствам неорганические стекла являются диэлектриками или полупроводниками. Диэлектрическая проницаемость невелика, самое низкое значение ϵ у неорганического кварцевого стекла и стеклообразного V_2O_5 . Халькогенидные и оксидные ванадиевые стекла – полупроводники, они находят широкое применение в электротехнике в качестве термисторов, фотосопротивлений.

2.3.4. Достоинства и недостатки стекла

К основным достоинствам стекла относятся прочность при сжатии, твердость, термическая и химическая стойкость, хорошие оптические свойства.

Стекла обладают высокой звукоизолирующей способностью. Так, силикатное стекло толщиной 1 см по звукоизоляции приблизительно соответствует кирпичной стене в полкирпича – 12 см.

Одно из самых важных достоинств силикатного стекла – химическая стойкость. Химической устойчивостью стекла называется его способность противостоять разрушающему действию воды, влаги, газов атмосферы, растворов солей и различных химических реагентов. Например, наиболее интенсивно силикатное стекло разрушает вода.

Основным недостатком неорганических стекол является их хрупкость.

2.3.5. Основные промышленные виды неорганических стекол

Основные промышленные стекла – силикатные: содово–известковое стекло состава ($1\text{Na}_2\text{O} : 1\text{CaO} : 6\text{SiO}_2$), калийно–известковое стекло ($1\text{K}_2\text{O} : 1\text{CaO} : 6\text{SiO}_2$), калийно–свинцовое стекло ($1\text{K}_2\text{O} : 1\text{PbO} : 6\text{SiO}_2$) – это хрусталь. Структурообразующим веществом служит двуокись кремния (SiO_2), ее в составе шихты 70 %–75 %.

Модификаторы силикатного стекла – оксиды щелочных металлов. Так окись натрия (Na_2O) или калия (K_2O) используют для плавки и выделки стекла, добавляют в виде соды (Na_2CO_3) или поташа (K_2CO_3), которые при высокой температуре легко разлагаются на окислы.

Модификатор – оксид кальция (CaO) – делает стекло химически стойким и усиливает его блеск, идет в состав шихты в виде извести.

2.3.6. Материалы на основе стекол

Промышленностью выпускаются стекла разнообразных составов и форм в виде готовых изделий, заготовок или отдельных деталей. На основе стекол также получают разнообразные материалы. Стекло является составной частью большого числа композиционных материалов.

Можно указать следующие материалы, как наиболее интересные и используемые:

1. **Силикатные триплексы** представляют собой два листа закаленного силикатного стекла (толщиной 2–3 мм), склеенные прозрачной

эластичной полимерной пленкой. При разрушении триплекса образовавшиеся неострые осколки удерживаются на полимерной пленке. Триплексы бывают плоскими и гнутыми. Триплексы используют для остекления транспортных средств.

2. **Термопан** – трехслойное стекло, состоящее из двух стекол и воздушного промежутка между ними. Эта воздушная прослойка обеспечивает теплоизоляцию.

3. **Ситаллы** или «кристаллические стекла». Получают на основе неорганических стекол путем их полной или частичной управляемой кристаллизации. За рубежом их называют стеклокерамикой или пиррокерамами. По структуре и технологии получения ситаллы занимают промежуточное положение между обычным стеклом и керамикой. От неорганических стекол ситаллы отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов – более однородной и мелкозернистой микрокристаллической структурой.

4. Стекло в форме **стекловолокна**. Является тепло- и звукоизоляционным материалом, имеющим рыхловолокнистую структуру с большим количеством воздушных прослоек, волокна располагаются беспорядочно. Такая структура сообщает этим материалам малую объемную массу (от 20 до 130 кг/м³) и низкую тепло и звукопроводность.

Разновидностями стекловолокнистых материалов являются стекловата, материалы АСИМ, АТИМС, АТМ-3, состоящие из стекловолокон, расположенных между двумя слоями стеклоткани или стеклосетки, простеганной стеклонитками.

3. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композиционный материал – многокомпонентный материал, состоящий из матрицы (пластичной основы), и наполнителей, равномерно распределенных по матрице.

Матрица (пластичная основа) – компонент, непрерывный по всему объему материала и обеспечивающий его монолитность.

Наполнители – компоненты, равномерно распределенные в матрице.

Композит = матрица + наполнитель 1 + наполнитель 2 + ...

Физико-механические свойства композиционных материалов в зависимости от концентрации компонентов, их геометрических

параметров и ориентации, технологии изготовления, могут изменяться в широких пределах. В результате этого открывается возможность конструирования материалов практически с любыми заданными свойствами.

Примеры композитов найдутся в каждом доме: это предметы мебели, сделанные из распространенного композиционного материала – древесно-стружечных плит (ДСП), в которых матрица из синтетических смол (неметаллическая) равномерно наполнена древесными опилками.

Всем известным композитом является железобетон. Железный наполнитель (в виде металлической сетки, стержней или др.) равномерно распределяется по объему бетона. Взаимодействие матрицы из бетона и металлической арматуры дает огромный положительный эффект. Бетон при твердении прочно сцепляется с металлической арматурой и надежно защищает ее от коррозии; арматура придает прочность, трещиностойчивость, жесткость материалу, монолитность бетона и арматуры обеспечивается относительной близостью величин их коэффициентов линейного расширения (для бетона от $7,5 \cdot 10^{-6}$ до $12 \cdot 10^{-6}$, для стальной арматуры $12 \cdot 10^{-6}$).

В настоящее время процент содержания композитов во всех конструкциях постоянно растет, заменяя дорогостоящие природные материалы. Так, в конструкциях авиации составляет порядка 15 %, но в новом поколении самолетов этот процент значительно выше. Примером использования композитов в авиационной промышленности на данный момент считается Boeing 787 DREAMLINER (рис. 38).



Рис. 38. Структура использованных материалов в Boeing 787 DREAMLINER

Больше половины деталей данного самолета выполнены из композиционных материалов, в результате он имеет более высокий КПД по сравнению с предыдущим образцом и более низкий расход топлива.

3.1. Основная классификация композитов

Композиты классифицируют:

- 1) по типу матрицы;
- 2) по виду и структуре наполнителя.

По типу матрицы композиты делятся на (рис. 39): композиты с металлической матрицей (**металлические композиты**) и с неметаллической матрицей – **неметаллические композиты**: с полимерной матрицей (полимерные композиты), резиновой (резиновые) и керамической (керамические композиты).



Рис. 39. Классификация композитов по типу матрицы

По виду и структуре наполнителя композиты делятся на (рис. 40):

- 1) **дисперсно-упрочненные** (или **упрочненные частицами**), в эту группу относятся и композиты, упрочненные нульмерными наполнителями, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок;
- 2) **упрочненные волокнами** (с одномерными наполнителями, один из размеров наполнителя значительно превышает два других);

3) **упрочненные слоями**, то есть композиты с двумерными наполнителями, два размера наполнителя значительно превышают третий.

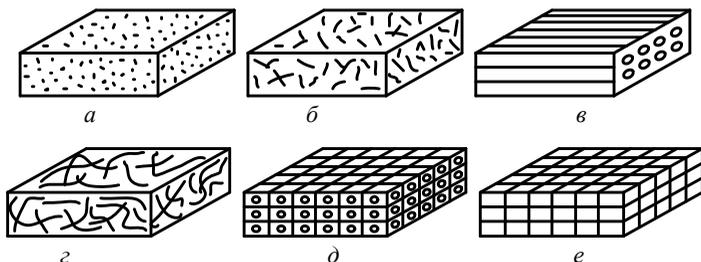


Рис. 40. Классификация композитов по виду наполнителя:
a, б – дисперсно-упрочненные; *в, z* – упрочненные волокнами; *д, e* – слоистые

По структуре армирующего наполнителя композиты подразделяют на изотропные и анизотропные (ориентированные).

Изотропные композиционные материалы имеют одинаковые свойства во всех направлениях. Например, композиционные материалы с порошкообразными наполнителями или упрочненные частицами.

У **анизотропных** материалов свойства зависят от направления укладки армирующего материала. По схеме укладки наполнителя различают композиты с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу; с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя в матрице в параллельных плоскостях (рис. 41); и с трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его расположении.

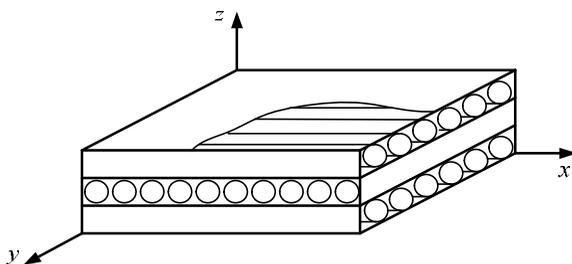


Рис. 41. Схема структуры композиционного материала, армированного чередующимися слоями волокон в двух взаимно перпендикулярных направлениях

В последнее время находят широкое применение гибридные композиционные материалы. Гибридные композиционные материалы содержат в своем составе три и более компонента.

Также появились нанокompозиты: это композиты, упрочненные наноразмерными объектами. Размеры частиц, входящих в состав нанокompозитов, не должен превышать 10–100 нм.

3.2. Металлические композиты

Металлические композиты имеют металлическую матрицу, обычно это легкие металлы и сплавы на основе алюминия и магния; сплавы на основе титана, меди; жаропрочные и жаростойкие сплавы на основе железа, никеля и кобальта; тугоплавкие сплавы на основе вольфрама, молибдена и ниобия.

Для армирования композиционных материалов с металлической матрицей используют высокопрочные волокна углерода, бора, карбида кремния и вольфрама, оксидов алюминия и циркония, проволоку из стальных, вольфрамовых и молибденовых сплавов, а также нитевидные кристаллы.

Различные сочетания матричного материала и наполнителя позволяют получать гибридные композиты с широким диапазоном характеристик, чего невозможно достичь на чистых металлах и сплавах.

Например, для упрочнения алюминия, магния и их сплавов применяют борные и углеродные волокна (табл. 4), а также волокна из тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов и оксидов), имеющих высокие прочность и модуль упругости.

Таблица 4

Механические характеристики алюминия и композитов на его основе

Материал	Предел прочности σ_B , МПа	Предел упругости σ_y , МПа
Алюминий	~70-200	600
Бор–алюминий (ВКА–1А)	1300	600
Алюминий–углерод (ВКУ–1)	900	300
Алюминий–сталь (КАС–1А)	1700	350

Иногда в качестве волокон используют проволоку из высокопрочных сталей. Для армирования титана и его сплавов применяют молибденовую проволоку, волокна сапфира, карбида кремния и борида титана. Повышение жаропрочности никелевых сплавов достигается армированием их вольфрамовой или молибденовой проволокой. Металлические волокна используют и в тех случаях, когда требуются высокие теплопроводность и электропроводимость. Перспективными упрочнителями для высокопрочных и высокомодульных волокнистых композиционных материалов являются нитевидные кристаллы из оксида и нитрида алюминия, карбида и нитрида кремния, карбида бора и др., имеющие $\sigma_B = 15000 \div 28000$ МПа и $E = 400 \div 600$ ГПа.

3.3 Композиционные материалы с неметаллической матрицей

В качестве матриц используют полимеры, углеродные материалы и керамику. Из полимерных матриц наибольшее распространение получили эпоксидная, фенолоформальдегидная и полиамидная.

Углеродные матрицы (коксованные или пироуглеродные) получают из синтетических полимеров, подвергнутых пиролизу.

Упрочняющими наполнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др.), а также металлические проволоки, обладающие высокой прочностью и жесткостью.

3.3.1. Полимерные композиционные материалы

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) являются одним из самых многочисленных и разнообразных видов материалов. Например, использование ПКМ при производстве космической и авиационной техники позволяет сэкономить от 5 % до 30 % веса летательного аппарата.

Органоволокниты (органопластики) представляют собой композиционные материалы, состоящие из органической полимерной матрицы, в качестве упрочнителей используются синтетические волокна. Органоволокниты применяют в качестве изоляционного и конструкционного материала в электро- и радиопромышленности, авиационной технике, автостроении; из них изготавливают

трубы, емкости для реактивов, покрытия корпусов судов и др. Название органолокнитов формирует тип волокна, используемого в качестве наполнителя. Наиболее известны следующие виды органолокнитов:

1. **Стекловолокниты (стеклопластики)**. Это композиционные полимерные материалы, матрица которых состоит из полимеров, а в качестве армирующего наполнителя используют волокна из неорганического стекла. Особое достоинство стеклопластиков – они прозрачны для радиоволн. Использование стеклопластиков началось в конце Второй мировой войны для изготовления антенных обтекателей – куполообразных конструкций, в которых размещается антенна локатора. Содержание волокон во многих стеклопластиках достигает 80 % по массе.

2. **Карбоволокниты** (углепласты или углепластики). Карбоволокниты представляют собой композиции, состоящие, как правило, из полимерной матрицы и наполнителей в виде углеродных волокон (карбоволокон).

Высокая энергия связи С–С углеродных атомов в волокне позволяет им сохранять прочность при очень высоких температурах (в нейтральной и восстановительной средах до 2200 °С), а также при низких температурах. От окисления поверхности волокна предохраняют защитными покрытиями (пиролитическими).

Различают несколько вариантов карбоволокнитов по типу матрицы: полимерные карбоволокниты – матрицами служат синтетические полимеры; коксованные карбоволокниты – матрицами служат синтетические полимеры, подвергнутые пиролизу и пироуглеродные карбоволокниты – матрица из пиролитического углерода.

3. **Боропластики** или борволокниты – это композиционные материалы, в которых терморезистивная полимерная матрица упрочнена наполнителем из борного волокна.

3.3.2. Композиты из полимеров с порошковыми наполнителями

Таких композитов известно более 10 000 марок. Для упрочнения полимерной матрицы применяются разнообразные наполнители в виде порошка. Так, дешевые карбонат кальция и каолин (белая глина) применяют для наполнения полиэтилена и полипропилена.

Бакелит – широко используемый порошковый композит – матрица из фенолформальдегидной (бакелитовой) смолы с наполнителем из древесной муки. Впервые получен доктором Бейкелендом (США) в начале XX в. Первое серийное изделие произведено по данной технологии в 1916 г. Это ручка переключателя скоростей автомобиля «Роллс-Ройс».

3.3.3. Текстолиты

Это слоистые пластики, в которых матрица армирована тканью (ткани могут быть из различных волокон). Технология получения текстолитов была разработана в 1920-х на основе фенолформальдегидной смолы. Полотна ткани пропитываются смолой, затем прессуются при повышенной температуре. Основные принципы получения текстолитов сохранились, но сейчас из них формируют не только пластины, но и фигурные изделия.

Значительно расширился круг исходных материалов. Связующими (матрицами) в современных текстолитах являются терморезистивные и термопластичные полимеры, но иногда применяются и неорганические матрицы на основе силикатов и фосфатов.

В качестве наполнителя в современных текстолитах используются ткани из самых разнообразных волокон – хлопковых, синтетических, стеклянных, углеродных, асбестовых, базальтовых и т. д.

Разнообразны свойства и применение текстолитов. Одно из первых применений текстолитов – покрытия для кухонных столов.

Стеклотекстолит – это слоистый композиционный материал, в котором в качестве наполнителя применяется ткань, плетенная из стеклянных волокон.

Гетинакс – это композиционный электроизоляционный материал, полученный методом горячего прессования слоев бумаги, пропитанных фенольной или эпоксидной смолой.

3.3.4. Композиционные материалы на основе керамики

Керамическую матрицу армируют различными наполнителями.

Технология получения: керамические композиционные материалы получают методами горячего прессования или методом шликерного

литья (волокна заливаются суспензией матричного материала, которая после сушки также подвергается спеканию).

Ассортимент волокон, пригодных для армирования керамики, ограничен. Чаще всего используют металлические проволоки.

Керамика, армированная дисперсными металлическими частицами, называется кермет. Керметы имеют повышенную устойчивость относительно тепловых ударов, повышенную теплопроводность. Из высокотемпературных керметов делают детали для газовых турбин, арматуру электропечей, детали для ракетной и реактивной техники. Твердые износостойкие керметы используют для изготовления режущих инструментов и деталей. Кроме того, керметы применяют в специальных областях техники – это тепловыделяющие элементы атомных реакторов на основе оксида урана, фрикционные материалы для тормозных устройств и т. д.

3.4. Нанокompозиты

Нанокompозит – это многокомпонентный твердый материал, в котором один из упрочняющих компонентов в одном, двух или трех измерениях имеет размеры, не превышающие 100 нанометров.

Главное условие для создания нанокompозита с необходимыми свойствами заключается в полной совместимости основного материала и нанонаполнителя, а также правильное распределение нанонаполнителя по матрице.

Особое достоинство нанокompозитов – существенное повышение прочностных характеристик материала.

Нанокompозиты классифицируют, как и все композиты, по типу матрицы – на металлические и неметаллические. В качестве наполнителя используются наночастицы, нановолокна, нанотрубки, графен.

Графен (двумерный углерод) – это аллотропная форма углерода, представляющая собой плоскость (толщиной в один атом) из «сетки» атомов углерода, уложенных в ячейки гексагональной (шестиугольной) формы (рис. 42).

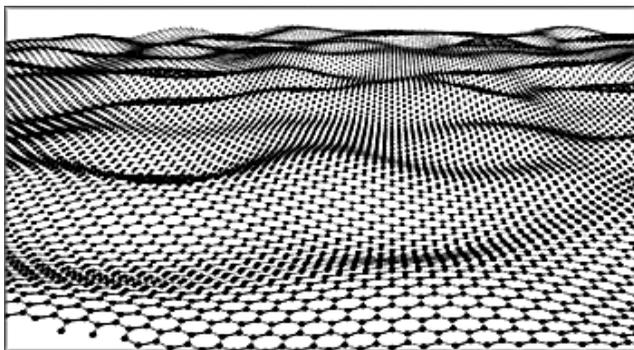


Рис. 42. Структура графенового монослоя

В 2010 году группе ученых за открытие графена была присуждена Нобелевская премия. Графен – проводник, обладает отличной электропроводностью, хорошей теплопроводностью, высокой прочностью и практически полностью прозрачен.

Углеродные нанотрубки – это аллотропная модификация углерода, представляющая собой полую цилиндрическую структуру диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров и длиной от одного микрометра до нескольких сантиметров. Нанотрубки могут быть одностенными и многостенными (рис. 43).

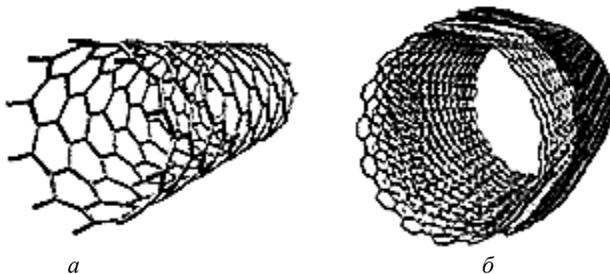


Рис. 43. Одностенная (а) и многостенная (б) нанотрубки

Тип проводимости нанотрубок зависит от группы симметрии, к которой принадлежит конкретная нанотрубка, она может быть или полуметаллом, или полупроводником. Они имеют очень хорошие механические свойства: например, нанотрубки могут держать огромный вес – до тонны на квадратный миллиметр. Но получить очень

длинные углеродные нанотрубки пока не удалось, поэтому ими упрочняют другие материалы, либо из коротких нанотрубок скручивают волокна.

3.4.1. Применение и перспективы нанокompозитов

Нанокompозиты – материалы будущего. Применимы практически во всех сферах производства, в технике, в быту, в медицине и в экологии, в аэрокосмической и автомобильной отраслях.

В **электротехнике** нанокompозиты используются как материалы для накопителей энергии (наноаккумуляторов и наноконденсаторов). Например, можно производить суперконденсаторы на нанопорах, аноды из кремниевых наносфер и углеродных наночастиц для литиевых элементов питания. Аноды, изготовленные из кремниево-углеродного нанокompозита, намного более плотно прилегают к литиевому электролиту, уменьшая вследствие этого время зарядки или разрядки устройства. Уже в 2014 г. компания StoreDot показала прототип аккумулятора со способностью сверхбыстрой зарядки. Аккумулятор, разработанный для смартфона Galaxy S5, зарядился почти до 100 % менее чем за две минуты. Инженеры разработали специальную внутреннюю структуру батареи с использованием наноточек, которая может очень быстро заряжаться, но при этом пришлось пожертвовать её емкостью. Демонстрируемый экземпляр смог продержаться всего пять часов. Из нанокompозитов, состоящих из целлюлозной основы и нанотрубок, можно производить токопроводящую бумагу. Если такую бумагу поместить в электролит, появится аналог гибкой батареи.

Нанокompозиты применимы для **модификации строительных материалов**. Использование в бетонных композициях даже 0,05 %–0,001 % металл/углеродного нанокompозита позволяет повысить эксплуатационные свойства, улучшить теплоизоляционные свойства, повысить прочность и трещиностойкость, увеличить срок службы бетонных конструкций.

Нанокompозиты могут применяться для **модификации эпоксидных композиций**. Введение металл/углеродных нанокompозитов в эпоксидные материалы приводит к повышению термостабильности составов с 125 °С до 200 °С. Возможна также и модификация клеевых составов. Модификация клеевых композиций для трудносклеиваемых

материалов увеличивает прочность адгезионных характеристик при отрыве и сдвиге в 1,5–2 раза.

Нанокompозиты могут входить в **состав упаковочного материала**. Применение нанокompозита Aegis в составе трехслойной барьерной пленки обеспечивает срок хранения продуктов до 26 недель. Такая упаковка обладает улучшенными барьерными свойствами, отличной прозрачностью, прочностью на прокол, и при этом она дешевле за счет уменьшения количества слоев. Все это позволяет обойтись без проблемного в переработке и дорогого EVOH (сополимер этилена с виниловым спиртом).

Особое место в разработке нанокompозитных материалов занимает применение графена («однослойный графит»). Например, добавление графена к эпоксидным композитам приводит к увеличению жесткости и прочности материала даже по сравнению с нанокompозитами, содержащими углеродные нанотрубки.

Использование нанокompозитов **в автомобильной промышленности** позволит изготавливать различные элементы интерьера, электронного оборудования, систем безопасности, шин, модулей двигателей автомобилей. Это снизит общий вес конструкции, сократит выбросы углекислого газа, увеличив эффективность самого двигателя, снизит износ деталей и частей корпуса, повысит прочность автомобильного кузова и надежность бортовой электроники.

РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСОБЫХ СВОЙСТВАХ МАТЕРИАЛОВ В ПОЛЯХ

В процессе изготовления и в условиях эксплуатации на материалы, из которых выполнено любое техническое устройство, воздействуют электрическое и магнитное поля (в отдельности или совместно).

По особым свойствам, проявляемым в электрическом и магнитном полях, можно выделить следующие группы материалов:

- 1) проводники;
- 2) диэлектрики;
- 3) полупроводники;
- 4) магнитные материалы.

Основной характеристикой материалов в электрических полях является удельная электропроводность – γ (Сименс/м). Это коэффициент пропорциональности между плотностью тока j (А/м²) и напряженностью электрического поля E (В/м):

$$j = \gamma \times E. \quad (13)$$

На практике чаще используется обратная величина – удельное электрическое сопротивление – ρ (Ом·м):

$$\rho = \frac{1}{\gamma}. \quad (14)$$

Соответственно величине удельного сопротивления материалы делят на:

- 1) диэлектрики: $\rho > 10^8$ (до 10^{16}) Ом·м;
- 2) проводники: $\rho < 10^{-5}$ Ом·м;
- 3) полупроводники: $10^{-5} \leq \rho \leq 10^8$ Ом·м.

Электрические свойства различных твердых материалов сильно различаются. Для понимания природы этих различий проводимости была разработана квантово-механическая зонная теория твердого тела (зонная теория проводимости).

2. ПОНЯТИЕ О ЗОННОЙ ТЕОРИИ ПРОВОДИМОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Свободные электроны могут иметь любую энергию. Согласно квантово-механическим постулатам Бора, электрон в изолированном атоме может находиться только на некотором разрешенном энергетическом уровне, то есть иметь строго определенную энергию. Один и тот же энергетический уровень могут занимать только два электрона (с противоположными спинами). Изолированный атом вещества имеет определенное число разрешенных уровней энергии электронов (рис. 44).

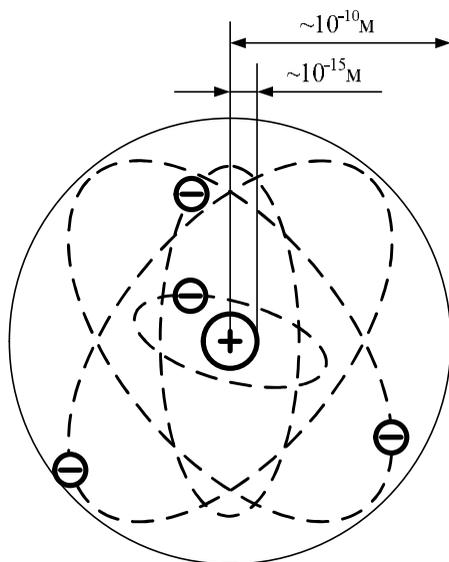


Рис. 44. Современное представление об атоме

В твердом теле энергетические уровни электронов располагаются так плотно, что формируют сплошную зону, называемую зоной валентности. Электроны могут иметь и более высокие энергии из другой разрешенной зоны – проводимости, обычно свободной. То есть зона проводимости – зона свободных разрешенных энергетических уровней. Эти разрешенные зоны разделены зоной запрещенных энергий (рис. 45).

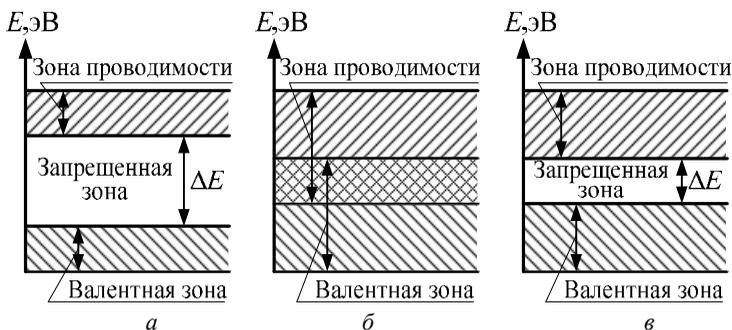


Рис. 45. Классификация материалов в представлении зонной теории:
а – диэлектрик; *б* – металл; *в* – полупроводник

Из зонной теории следует, что диэлектрики – это материалы, у которых запрещенная зона (и необходимая для ее преодоления энергия) настолько велика, что в обычных условиях электроны не могут переходить в зону проводимости и электронная проводимость не наблюдается (рис. 45, *а*). Ширина запрещенной зоны у технических диэлектриков составляет $\Delta E = 3 \dots 7$ эВ.

Проводники – это материалы, у которых зона валентности, заполненная электронами, вплотную прилегает к зоне свободных энергетических уровней (зоне проводимости) или даже перекрывается ею. Запрещенная зона отсутствует (рис. 45, *б*). Поэтому электроны могут переходить с уровней валентной зоны на уровни зоны проводимости под влиянием даже слабой напряженности приложенного к проводнику электрического поля. Т. е. под действием электрического поля в проводнике возникает электрический ток.

Полупроводники – это материалы с узкой запрещенной зоной (рис. 45, *в*), которая может быть преодолена за счет небольших внешних энергетических воздействий, например, температуры, света или других источников энергии.

Для используемых полупроводников ширина запрещенной зоны лежит в пределах $\Delta E = 0,3 \dots 2$ эВ.

3. ДИЭЛЕКТРИКИ

Диэлектрики – это материалы, в которых отсутствуют свободные заряды, значит, под действием электрического поля перемещение

зарядов не возникает. В диэлектриках заряды могут только сдвигаться, но не перемещаются на большие расстояния. Такие заряды называют «связанными» (например, заряды внутри атома – «+» заряд ядра и «-» заряд электронов).

Движение свободных зарядов в проводнике есть электрический ток, а сдвиг связанных зарядов в диэлектрике ведет к поляризации (то есть к возникновению в диэлектрике электростатического поля).

Диэлектриками называют материалы, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и если в них возможно существование электростатического поля.

3.1. Классификация диэлектриков по внутреннему строению

По внутреннему строению диэлектрики делят на три группы:

1) **Неполярные диэлектрики** – это молекулярные диэлектрики, в молекулах которых центры тяжести отрицательных и положительных зарядов совпадают (азот N_2 , водород H_2 , кислород O_2 , углекислый газ CO_2 и т. д.) (рис. 46, а).

2) **Полярные диэлектрики** – молекулярные диэлектрики, в молекулах которых центры противоположных по знаку зарядов не совпадают (H_2O , NH_3 , SO_2 , CO , CH_2Cl) (рис. 46, б).

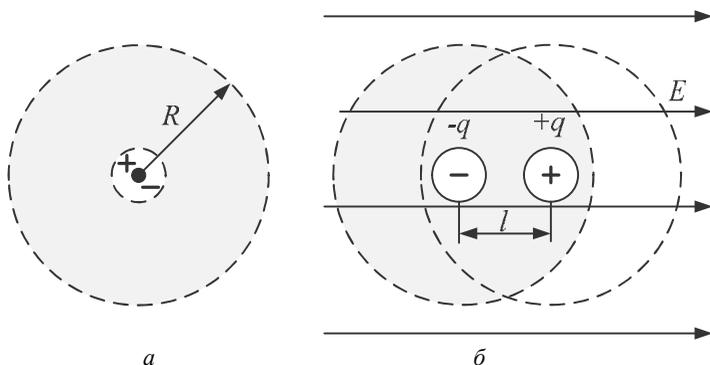


Рис. 46. Молекулы диэлектриков:
а – неполярная; б – полярная

Молекула, в которой центры противоположных по знаку зарядов не совпадают, называется **молекулярный диполь** (рис. 46, б).

В общем случае, диполь – это два жестко связанных, равных по величине, противоположных по знаку заряда, смещенных друг относительно друга на некоторое расстояние (рис. 47).

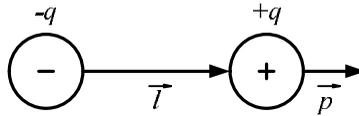


Рис. 47. Электрический диполь

Диполи обладают дипольным электрическим моментом p (даже в отсутствие внешнего электрического поля), Кл·м:

$$p = q \times l, \quad (15)$$

где q – величина положительного и равного ему отрицательного зарядов, Кл;

l – расстояние между центрами зарядов, м.

Электрический дипольный момент является векторной величиной. За направление вектора \vec{p} принимают направление от отрицательного заряда к положительному.

При отсутствии внешнего электрического поля суммарный дипольный момент полярного диэлектрика равен нулю, так как диполи расположены хаотично.

3) **Ионные кристаллы** – это пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков (рис. 48).

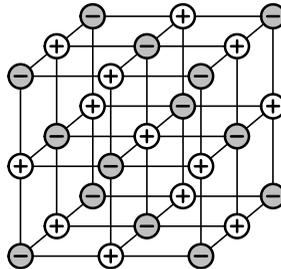


Рис. 48. Ионный кристалл

3.2. Поляризация диэлектриков

Понятие «поляризация» имеет несколько определений:

1. Поляризация – ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул диэлектрика под действием внешнего электрического поля или без него.

2. Поляризация – это состояние диэлектрика, при котором его элементарный объем приобретает дипольный электрический момент.

3. Поляризация – это возникновение в диэлектрике собственного электростатического поля.

Количественными характеристиками поляризации являются диэлектрическая проницаемость ϵ , поляризованность (или вектор поляризации) P .

Поляризованность (вектор поляризации) P – это дипольный момент единицы объема (векторная физическая величина), Кл/м²:

$$P = \frac{dp}{dV}, \quad (16)$$

$$P = \frac{1}{V} \sum_i p_i, \quad (17)$$

где p_i – дипольный момент молекулы, Кл·м;
 V – объем диэлектрика, м³.

Суммирование проводится по всем молекулам.

Поляризация не изменяет суммарного заряда в любом макрообъеме внутри диэлектрика, но сопровождается появлением на поверхности диэлектрика связанных электрических зарядов. Эти заряды создают в материале собственное макроскопическое электрическое поле напряженностью E_{Π} .

Если диэлектрик поляризуется во внешнем электрическом поле, то напряженность собственного поля диэлектрика E_{Π} направлена против приложенного внешнего поля E_0 .

Результирующая напряженность поля внутри диэлектрика определяется векторной суммой внешнего и внутреннего полей, В:

$$\overset{\text{вн}}{\vec{E}} = \overset{\text{вн}}{E_0} + \overset{\text{вн}}{E_{\text{п}}} . \quad (18)$$

В скалярном виде (поля противоположны по знаку) это разность:

$$E = E_0 - E_{\text{п}} . \quad (19)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r (ϵ relative) или просто ϵ показывает, во сколько раз напряженность электрического поля внутри диэлектрика E ослабляется по сравнению с напряженностью поля в вакууме E_0 :

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} . \quad (20)$$

В изотропных диэлектриках ϵ является скалярной безразмерной величиной.

Поляризованность связана с напряженностью внешнего электрического поля соотношением, Кл/м²:

$$P = \epsilon E , \quad (21)$$

где ϵ – диэлектрическая восприимчивость;

E – напряженность электрического поля, В.

Диэлектрическая восприимчивость ϵ связана с диэлектрической проницаемостью ϵ соотношением:

$$\epsilon = 1 + 4\pi\epsilon_0 . \quad (22)$$

Напряженность электрического поля есть сила F , действующая со стороны поля E на единичный заряд:

$$E = \frac{F}{Q} , \quad (23)$$

где Q – величина заряда, Кл.

Тогда можно сказать, что диэлектрическая проницаемость среды ϵ показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух электрических зарядов в этой среде меньше, чем в вакууме.

Диэлектрик с нанесенными на него электродами можно рассматривать, как конденсатор с определенной емкостью C , Φ :

$$C = \frac{Q}{U}, \quad (24)$$

где U – напряжение между электродами, В.

Т. к. напряженность электрического поля обратно пропорциональна заряду на пластинах конденсатора (23), то:

$$e = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C}{C_0}, \quad (25)$$

где Q_0 – заряд на пластинах конденсатора в условиях вакуума между пластинами, Кл;

C_0 – емкость конденсатора в условиях вакуума между пластинами, Ф.

Следовательно, благодаря поляризации, замена вакуума между обкладками конденсатора на диэлектрик с диэлектрической проницаемостью ϵ увеличивает емкость конденсатора в ϵ раз.

Можно записать:

$$e = \frac{Q}{Q_0} = \frac{(Q_n + Q_0)}{C_0} = 1 + \frac{Q_n}{Q_0} = 1 + \chi. \quad (26)$$

где Q_n – дополнительный заряд, возникающий на пластинах в результате поляризации диэлектрика между пластинами, Кл.

Из (26) можно сделать следующие выводы:

1) относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества всегда больше единицы и равна единице только для вакуума.

2) диэлектрическая проницаемость ϵ есть отношение суммарного заряда конденсатора с диэлектриком между его обкладками к заряду конденсатора в вакууме без диэлектрика.

Иногда вместо относительной диэлектрической проницаемости ϵ используют абсолютную диэлектрическую проницаемость ϵ_a . Она является величиной размерной и определяется соотношением, Ф/м:

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon, \quad (27)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м. $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

В табл. 5 представлены величины относительных диэлектрических проницаемостей некоторых материалов.

Таблица 5

Диэлектрические проницаемости некоторых материалов

Материал	Значение относительной диэлектрической проницаемости ϵ
Газы	1,000072–1,00138
Гетинакс	6–8
Фторопласт	1,9–2,1
Полиэтилен	2,3–2,4
Электрокартон	1,8–2,5
Масло трансформаторное	2,2
Совол	5
Оргстекло	4
Поливинилхлорид	3–5
Вода дистиллированная	80
Титанат кальция	150
Титанат бария	2000
Титанат бария с добавками	9000

3.3. Механизмы поляризации диэлектриков

Поляризация – это состояние диэлектрика, при котором его элементарный объем приобретает дипольный электрический момент, то есть в диэлектрике возникает собственное электростатическое поле.

Поляризация может происходить как во внешнем электрическом поле (индуцированная), так и без внешнего поля – либо абсолютно без видимых причин, либо под неэлектрическими воздействиями (механическое, тепловое и т. п.) (рис. 49).

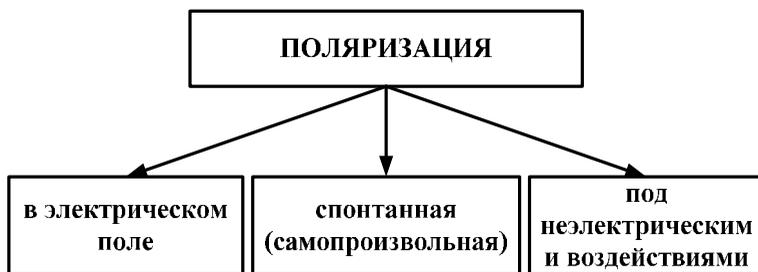


Рис. 49. Виды поляризации

3.4. Поляризация в электрическом поле

Основные виды поляризации в электрическом поле (индуцированной):

- 1) электронная;
- 2) ионная;
- 3) дипольная (ориентационная);
- 4) миграционная (объемная).

Электронная и ионная виды поляризации – это мгновенные виды, дипольная и миграционная – замедленные виды поляризации.

3.4.1. Электронная поляризация

Электронная поляризация – это упругое смещение и деформация электронных оболочек атомов (рис. 50).

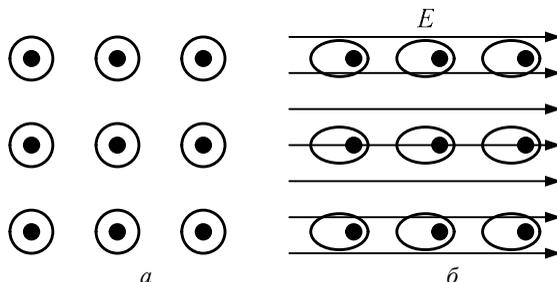


Рис. 50. Модель электронной поляризации:
а – внешнее электрическое поле отсутствует; *б* – атомы во внешнем электрическом поле

Электронная поляризация универсальна, т. е. характерна для всех видов диэлектриков без исключения и характеризуется следующими особенностями:

1. Время установления электронной поляризации составляет $\sim 10^{-15}$ с.
2. Нет связи с температурой материала (не вызывает потерь энергии).
3. Наиболее ощутима в монокристаллах.
4. Усиливается с ростом размеров атома.

3.4.2. Ионная поляризация

Ионная поляризация не универсальна, а присуща только диэлектрикам с ионным типом химической связи. Обусловлена смещением упруго связанных ионов (рис. 51).

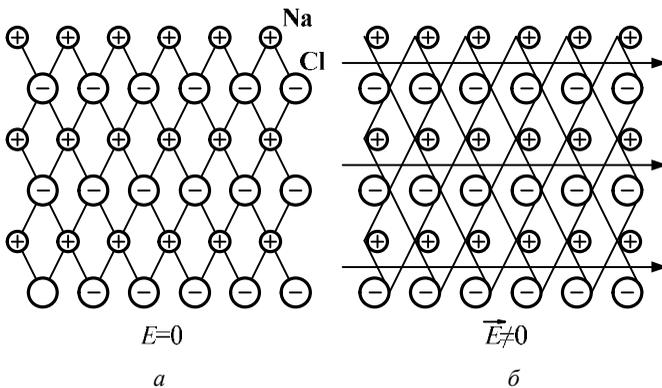


Рис. 51. Модель ионной поляризации:
a – внешнее электрическое поле отсутствует; *б* – смещение ионов во внешнем электрическом поле

Время установления ионной поляризации $10^{-13} - 10^{-12}$ с.

Электронная и ионная – это **мгновенные** виды поляризации. Их называют также **деформационными** или **упругими** видами, так как они состоят в смещении зарядов внутри молекулы либо ионов относительно друг друга, при этом возникает упругая сила, которая после снятия поля мгновенно возвращает заряженные частицы в равновесные положения. В результате этих видов поляризации не возникает энергетических потерь.

3.4.3. Дипольная (ориентационная) поляризация

Свойственна диэлектрикам, состоящим из полярных молекул, – диполей. В основном это жидкости (рис. 52).

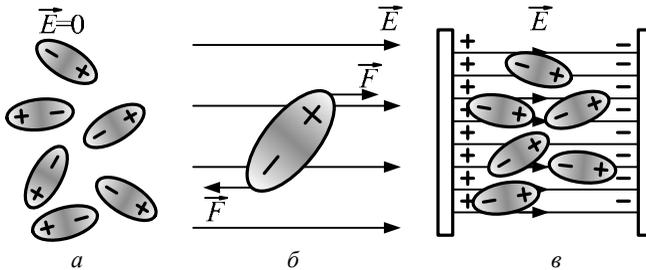


Рис. 52. Модель дипольной поляризации:

- a* – ориентация диполей при отсутствии внешнего электрического поля E ;
- б* – поворот диполя под действием силы F в электрическом поле E ;
- в* – ориентация диполей по силовым линиям электрического поля E

Время установления дипольной поляризации может составлять от 10^{-10} до 10^{-5} с. Это **замедленный (релаксационный)** вид поляризации. Ориентационная поляризация происходит за счет поворота диполей в направлении поля в вязкой среде. При этом преодолевается сопротивление среды, следовательно, дипольная поляризация вызывает ощутимые потери энергии электрического поля, которые рассеиваются в виде тепла.

После снятия поля происходит **релаксация** – восстановление исходного состояния диэлектрика путем тепловой дезориентации молекул. При этом поляризованность P экспоненциально спадает по времени, Кл/м²:

$$P(t) = P(0)\exp(-t/\tau_0), \quad (28)$$

где $P(0)$ – поляризованность в момент отключения поля, Кл/м²;
 τ_0 – время релаксации, с.

Время релаксации – это промежуток времени, в течение которого поляризованность (упорядоченность ориентированных полем диполей) после снятия поля уменьшается вследствие теплового движения частиц в 2,72 раза относительно первоначального значения (2,72 это число e – основание натуральных логарифмов).

3.4.4. Миграционная (объемная) поляризация

Свойственна только твердым диэлектрикам, содержащим макроскопические неоднородности структуры и примеси (проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т. п.).

При внесении твердого диэлектрика с дефектами (включениями) в электрическое поле свободные электроны и ионы, содержащиеся в проводящих и полупроводящих включениях, начинают перемещаться в пределах каждого включения. В результате каждое включение приобретает дипольный момент и ведет себя подобно большому диполю (рис. 53).

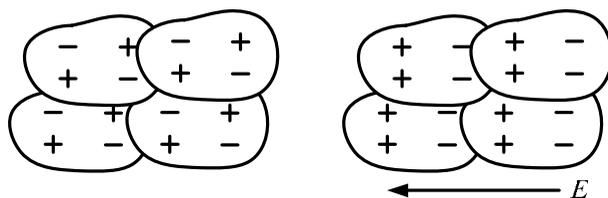


Рис. 53. Модель миграционной поляризации

Миграционная поляризация – это замедленный вид поляризации. Время ее установления может достигать до 10^3 с.

3.5. Поляризация в отсутствие внешнего электрического поля

3.5.1. Спонтанная поляризация

Некоторые диэлектрики ниже определенной температуры могут самопроизвольно переходить в поляризованное состояние.

Самопроизвольный (спонтанный) процесс перехода диэлектрика из неполярного в полярное состояние при определенной температуре называют **сегнетоэлектрическим** фазовым переходом. А материалы, обладающие в определенном интервале температур самопроизвольной (спонтанной) поляризацией, называются **сегнетоэлектриками** (ферроэлектриками).

Температура перехода диэлектрика в сегнетоэлектрическое состояние называется сегнетоэлектрической точкой Кюри – T_k .

Сегнетоэлектрики при температуре ниже T_k характеризуются доменной структурой – наличием особых микрообластей – электрических доменов, имеющих собственную поляризованность в силу внутренних причин.

Электрический домен – это микрообласть внутри диэлектрика, в которой вектора дипольных моментов молекул выстраиваются в одном направлении (рис. 54).

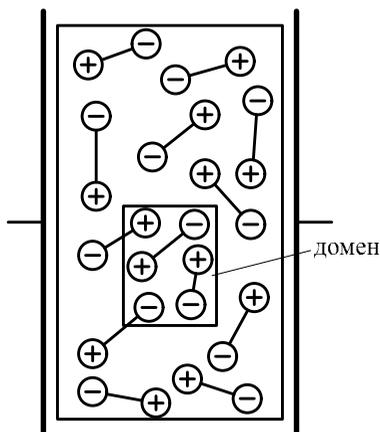


Рис. 54. Образование домена внутри диэлектрика

Наложение внешнего электрического поля ведет к преимущественной ориентации электрических моментов доменов в направлении поля, что дает эффект очень сильной поляризации (рис. 55).

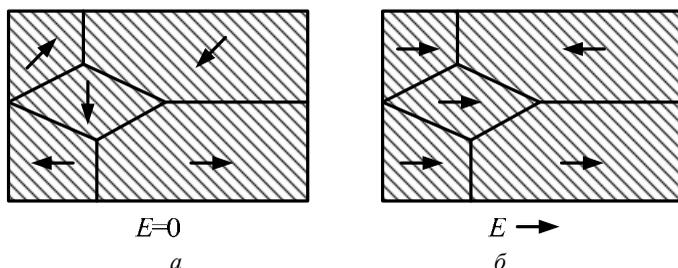


Рис. 55. Ориентация электрических дипольных моментов доменов: *a* – в отсутствие внешнего электрического поля; *б* – при наложении внешнего электрического поля

Уже известны сотни различных материалов, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами. Они различны по структурным типам и составам, что свидетельствует о различии молекулярных механизмов возникновения спонтанной поляризации.

По типу химической связи и физическим свойствам кристаллические сегнетоэлектрики принято подразделять на две большие группы: **ионные** (титанат бария BaTiO_3 , ниобат лития LiNbO_3 , иодат калия KIO_3 , и др.) и **дипольные** (сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, нитрит натрия NaNO_2 и др.).

3.5.2. Поляризация за счет внешних неэлектрических воздействий

Некоторые диэлектрики могут поляризоваться под влиянием различных внешних воздействий.

Так, ряд диэлектриков может поляризоваться под внешними механическими воздействиями. Их назвали пьезоэлектриками. **Пьезоэлектрики** – материалы, которые поляризуются под действием механических напряжений (прямой эффект) или, наоборот, изменяют свои размеры под действием приложенного электрического поля (обратный эффект).

Возможна поляризация под температурными воздействиями и также обратный эффект. **Пирозлектрик** – материал, поляризующийся при изменении температуры.

Остаточная поляризация – сохранение поляризованного состояния диэлектрика после отключения внешнего электрического поля. **Электреты** – диэлектрики, способные длительное время сохранять остаточную поляризацию.

Существуют и другие воздействия, вызывающие поляризацию некоторых видов диэлектриков, например, свет и т. д.

3.6. Классификация диэлектриков по механизму поляризации

3.6.1. Линейные (пассивные) диэлектрики

Линейные диэлектрики поляризуются только во внешнем электрическом поле.

Свойства линейных диэлектриков не зависят от внешних воздействий и для них справедливы соотношения:

1. Диэлектрическая проницаемость постоянна: $\epsilon = \text{const}$.

2. Поляризованность линейно зависит от величины напряженности электрического поля ($P = \chi E$).

Графики зависимости поляризованности и диэлектрической проницаемости линейных диэлектриков от напряженности электрического поля приведены на рис. 56.

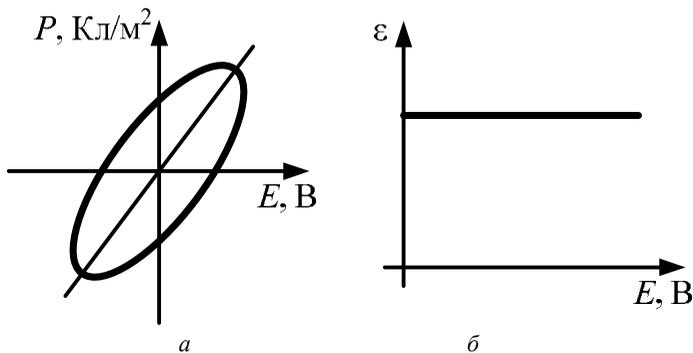


Рис. 56. Зависимость поляризованности P (а) и диэлектрической проницаемости ϵ (б) линейных диэлектриков от напряженности электрического поля E

Прямо пропорциональная зависимость $P(E)$ в постоянном поле на графике – прямая линия, эллипс зависимость $P(E)$ в переменном электрическом поле, $\epsilon = \text{const}$ и не зависит от E .

3.6.2. Нелинейные (активные) диэлектрики

Нелинейные диэлектрики способны поляризоваться не только во внешнем электрическом поле, но и в его отсутствие.

Активные диэлектрики – диэлектрики, электрические свойства которых существенно зависят от внешних условий (электрического поля, температуры, давления, напряженности поля и т. д.).

Для нелинейных диэлектриков диэлектрическая проницаемость не постоянная величина $\epsilon \neq \text{const}$, зависимость $\epsilon(E)$ имеет сложный характер. Также нет линейной зависимости между векторами P и E (рис. 57).

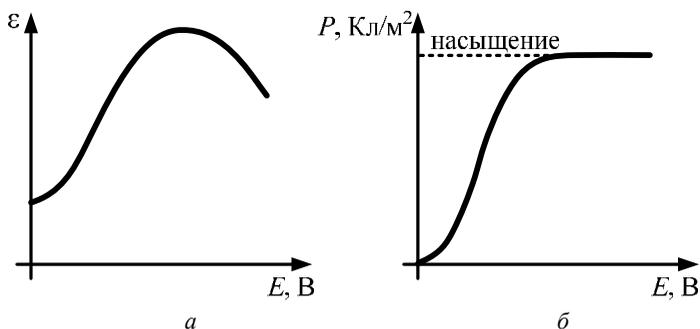


Рис. 57. График зависимости диэлектрической проницаемости (а) и поляризованности (б) сегнетоэлектрика от напряженности постоянного электрического поля

В переменном электрическом поле (при циклической переориентации внешнего электрического поля) зависимость поляризованности от напряженности для сегнетоэлектрика приобретает вид гистерезиса (рис. 58).

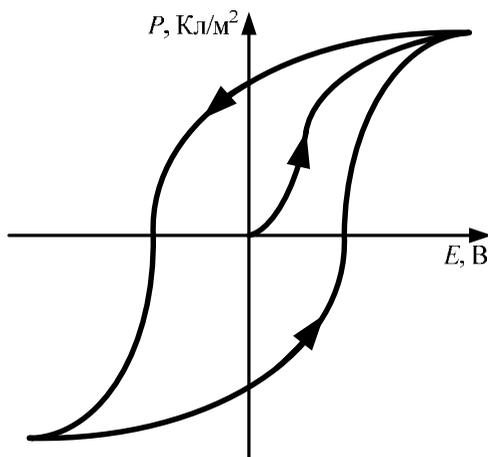


Рис. 58. График зависимости поляризованности сегнетоэлектрика от напряженности внешнего электрического поля при его циклической переориентации

Причина гистерезиса следующая. Активные диэлектрики характеризуются наличием **электрических доменов**, которые, в силу различных внутренних причин, имеют электрический дипольный

момент в отсутствии внешнего электрического поля. При наложении внешнего электрического поля электрические моменты доменов начинают переориентироваться, процесс длится до тех пор, пока все домены не выстроятся параллельно направлению внешнего электрического поля. Наступает насыщение.

При уменьшении поля, в силу наличия трения между доменами, процесс реполяризации не проходит по первоначальной кривой, а идет с некоторым отставанием, при полном снятии поля сохраняется остаточное значение поляризации.

Для полного снятия поляризации необходимо приложить внешнее поле E_c обратного направления, называемое коэрцитивным электрическим полем.

3.6.3. Применение активных диэлектриков

Нелинейные диэлектрики – это сегнетоэлектрики, пироэлектрики, пьезоэлектрики, электреты, материалы квантовой электроники, жидкие кристаллы, электро-, магнито- и акустооптические материалы, диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами и др.

Нелинейные диэлектрики используют как разнообразные активные элементы в современной электронике. Так, пьезоэлектрики применяются в малогабаритных микрофонах, телефонах, детонаторах, датчиках давлений, деформаций, ускорений, вибраций, в пьезорезонансных фильтрах, линиях задержки, пьезотрансформаторах. Это – ниобат бария-стронция, триглицинсульфат – ТГС, танталат лития, ниобат, поляризованные поливинилденфторид и поливинилиденхлорид.

Пироэлектрики используются при создании тепловых датчиков и приемников лучистой энергии (инфракрасное и СВЧ-излучение). Это монокристаллический кварц, кристаллы сульфата лития, сегнетовой соли, ниобата и танталата лития.

Из электретов наибольшее применение находят электреты из пленок полиэтилентерефталата (лавсана), фторопласта–4, поликарбоната и др.

Твердые диэлектрики используют в оптических квантовых генераторах (лазерах) – это рубин, гранат, флюорит, фторит марганца, стекло.

3.7. Электропроводность диэлектриков

Полный ток в диэлектрике называется **током утечки** и складывается из трех компонент. Ток утечки $I_{\text{ут}}$ в техническом диэлектрике есть сумма **сквозного тока** $I_{\text{ск}}$, **тока смещения** $I_{\text{см}}$ и **тока абсорбции** $I_{\text{абс}}$, А:

$$I_{\text{ут}} = I_{\text{ск}} + I_{\text{см}} + I_{\text{абс}} . \quad (29)$$

Сквозной ток $I_{\text{ск}}$ в диэлектрике возникает благодаря наличию в диэлектрике токопроводящих примесей (свободных зарядов). Собственных свободных зарядов диэлектрик не имеет. Но диэлектрические материалы, применяемые в электротехнике, не являются идеальными, в них всегда содержится некоторое количество примесей. Благодаря наличию токопроводящих примесей в диэлектрике есть небольшое число свободных зарядов, которые под воздействием электрического поля создают слабые по величине сквозные токи проводимости.

Токи смещения $I_{\text{см}}$ – это токи, обусловленные мгновенными видами поляризации (электронной и ионной).

Упругие виды поляризации (электронная и ионная), протекая во времени, создают в диэлектриках токи смещения. Смещается электронная оболочка либо ионы относительно равновесных положений, – а любое движение зарядов создает электрический ток.

Эти токи кратковременны (сопоставимы со временами мгновенных видов поляризации, то есть до $\sim 10^{-15}$ с), их невозможно зафиксировать приборами.

Абсорбционные токи $I_{\text{абс}}$ – токи, возникающие при замедленных видах поляризации, то есть при повороте диполей, в случае дипольной поляризации, либо в процессе смещения зарядов при миграционной (объемной) поляризации.

Временем окончания поляризационных процессов принято считать одну минуту, поэтому истинная величина тока утечки диэлектрика фиксируется через этот промежуток времени от начала измерений.

Зависимость всех трех составляющих тока утечки от времени в начальный момент включения внешнего постоянного электрического поля представлена на рис. 59.

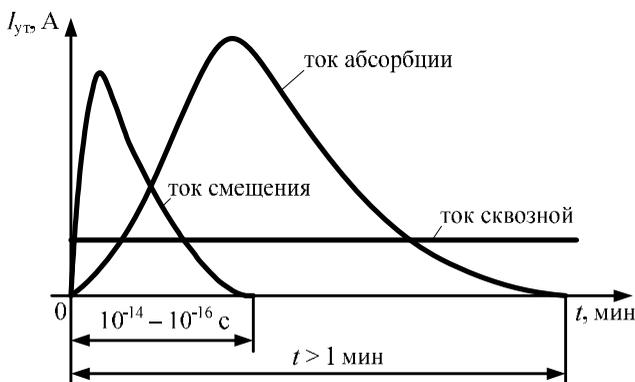


Рис. 59. Зависимость полного тока утечки $I_{ут}$ от времени t в момент включения постоянного электрического поля

Если учесть, что время протекания поляризационных процессов крайне мало, то график принимает вид, представленный рис. 60.

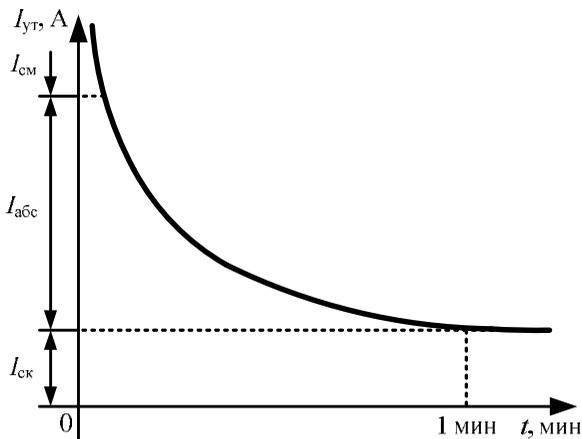


Рис. 60. Зависимость тока утечки $I_{ут}$ от времени t в постоянном электрическом поле

Так как поверхность твердого диэлектрика может быть загрязнена токопроводящими примесями и их концентрация на поверхности значительно выше, чем в объеме диэлектрика, то в этом случае принято учитывать 2 величины удельного сопротивления.

Принято учитывать (рис. 61):

- 1) удельное объемное сопротивление твердого диэлектрика ρ_V ;
- 2) удельное поверхностное сопротивление твердого диэлектрика ρ_S .

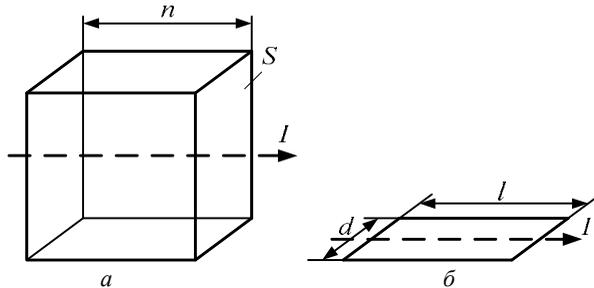


Рис. 61. Определение удельного объемного (а) и удельного поверхностного (б) сопротивлений твердого диэлектрика

В системе СИ удельное объемное сопротивление ρ_V равно объемному сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из материала, если ток I проходит сквозь куб, от одной его стороны к противоположной (рис. 61, а), Ом·м:

$$r_V = R_V \frac{\text{мм}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{А}}, \quad (30)$$

где R_V – объемное сопротивление материала, Ом;

S – площадь поверхности прохождения объемного тока, м²;

n – длина ребра куба, мысленно вырезанного из материала, м.

В системе СИ удельное поверхностное сопротивление ρ_S равно сопротивлению квадрата, мысленно вырезанного из материала, если ток I проходит по поверхности квадрата от одной его стороны к противоположной (рис. 61, б), Ом:

$$r_S = R_S \frac{\text{мм} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}, \quad (31)$$

где R_S – поверхностное сопротивление материала, Ом;

d, l – размеры квадрата, мысленно вырезанного из материала, м.

3.8. Диэлектрические потери

Диэлектрические потери – это мощность, рассеиваемая диэлектриком в виде тепла при воздействии внешнего электрического поля.

Диэлектрические потери – это часть энергии электрического поля, необратимо преобразующаяся в диэлектрике в тепловую. При воздействии на диэлектрик постоянного электрического поля достаточно характеризовать потери величиной удельных потерь: мощность, рассеиваемая на единицу объема. При воздействии на диэлектрик переменного электрического поля, кроме потерь на нагрев от сквозной электропроводности, возникают и другие механизмы превращения электрической энергии в тепловую. Поэтому используют дополнительные характеристики потерь – угол диэлектрических потерь и тангенс этого угла.

Угол диэлектрических потерь δ – это угол, дополняющий до 90° угол фазового сдвига φ между током и напряжением в емкостной цепи.

Рассмотрим поведение идеального диэлектрика, т. е. диэлектрика без потерь, помещенного между пластин конденсатора, в переменном электрическом поле. Векторные диаграммы и схемы замещения для идеального диэлектрика и диэлектрика с потерями показаны на рис. 62 и. 63.

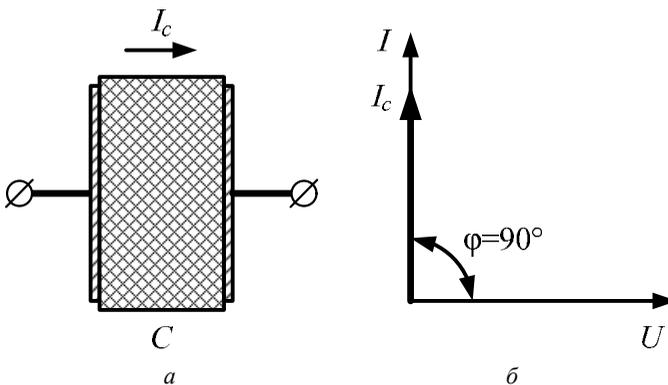


Рис. 62. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) идеального диэлектрика в переменном электрическом поле

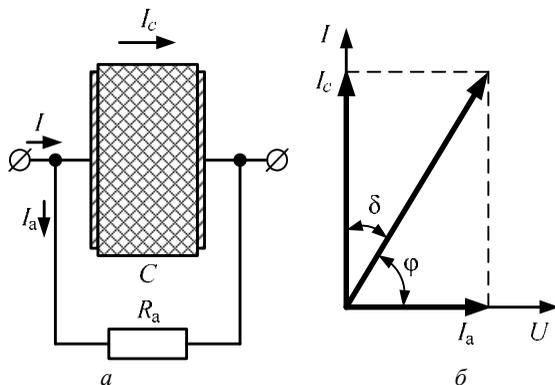


Рис. 63. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) реального диэлектрика в переменном электрическом поле

В идеальном диэлектрике (см. рис. 62) под действием приложенного к нему переменного напряжения будет протекать только емкостной ток I_C . В этом случае вектор тока I_C опережает вектор напряжения на 90° . Для реального диэлектрика при воздействии переменного напряжения используют эквивалентную схему (см. рис. 63), заменив конденсатор с реальным диэлектриком на идеальный конденсатор с параллельно (или последовательно) включенным активным сопротивлением. В реальных диэлектриках угол между током, протекающим через емкость, и напряжением меньше 90° за счет потерь, которые вызывают протекание активного тока I_a , совпадающего по фазе с напряжением. Потери мощности P вызывает активная составляющая тока.

Активная мощность P_a , рассеиваемая в диэлектрике, Вт:

$$P_a = UI_a, \quad (32)$$

Активный и емкостной токи можно определить из выражений, А:

$$I_a = I_C \times \operatorname{tg} \delta, \quad (33)$$

$$I_C = U \omega \varkappa \times C, \quad (34)$$

где U – напряжение на диэлектрике, В;
 ω – угловая частота напряжения, с^{-1} ;
 C – емкость, Ф.

Тогда получаем:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (35)$$

Диэлектрические потери P_a зависят не только от $\operatorname{tg} \delta$. Они растут с ростом частоты приложенного электрического поля, напряжения, а также температуры и влажности.

При конкретной частоте поля и напряжении чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в теплоту, тем больше угол δ и $\operatorname{tg} \delta$.

Следовательно, диэлектрические потери приобретают серьезное значение для материалов, используемых в высоковольтных высокочастотных устройствах.

Значения тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ некоторых диэлектрических материалов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ некоторых диэлектриков

Наименование диэлектрика	Значение $\operatorname{tg} \delta$
Трансформаторное масло ($t = 90^\circ \text{C}$)	$5 \cdot 10^{-3}$
Конденсаторная бумага, пропитанная компаундом ($t = 36^\circ \text{C}$)	$9 \cdot 10^{-3}$
Газообразные диэлектрики	10^{-9}
Полиэтилен	10^{-4}
Сегнетокерамика на основе титаната бария	10^{-3}

Для лучших электроизоляционных материалов, применяемых в технике высоких частот и напряжений, значения тангенса угла потерь составляют $\operatorname{tg} d \sim 10^{-5} \dots 10^{-4}$.

Классификация диэлектрических потерь по физической природе:

1. Потери от сквозной проводимости (на электропроводность). Потери на электропроводность возникают за счет примесной электропроводности.

2. Релаксационные потери. Характерны для диэлектриков, обладающих замедленными видами поляризации, и проявляются в области высоких частот, когда сказывается отставание поляризации от изменения поля.

3. Ионизационные потери. Свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии.

4. Резонансные потери. Наблюдаются в некоторых газах при строго определенной частоте и выражаются в интенсивном поглощении энергии электромагнитного поля. Резонансные потери возможны, если частота вынужденных колебаний, вызываемая электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц материала.

5. Потери на гистерезис имеют место в сегнетоэлектриках и связаны с переориентацией электрических доменов.

3.9. Пробой диэлектриков

Явление образования токопроводящего канала в диэлектрике под действием электрического поля называют **пробоем**.

Минимальное приложенное к диэлектрику напряжение, приводящее к его пробую, называется пробивным напряжением $U_{пр}$.

Значение пробивного напряжения зависит от толщины слоя диэлектрика h и формы электрического поля, обусловленной конфигурацией электродов и самого диэлектрика.

Т. е. значение $U_{пр}$ характеризует не свойства диэлектрика, а свойства конкретного образца в конкретном электрическом поле. Поэтому введена другая характеристика пробоя – электрическая прочность (пробивная напряженность).

Электрическая прочность $E_{пр}$ – это минимальная напряженность однородного электрического поля, при которой наступает пробой диэлектрика, кВ/мм:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (36)$$

где h – толщина слоя диэлектрика, мм;

$U_{пр}$ – напряжение пробоя диэлектрика, кВ.

Отношение пробивного напряжения к номинальному рабочему напряжению называют коэффициентом запаса по электрической прочности.

Время, проходящее от включения напряжения до полного разрушения диэлектрика в электрическом поле, называют **временем жизни** τ_d (долговечностью или сроком службы).

Значения электрической прочности некоторых диэлектриков приведены в табл. 7.

Таблица 7

Электрические прочности некоторых диэлектриков

Наименование диэлектрика	Значение $E_{пр}$, МВ/м
Асботекстолит	1,0–1,5
Лавсан	80–120
Полистирол	25–40
Полиуретан	20–25
Полиэтилен	30–55
Текстолит	2,2–25
Электрофарфор	20–30
Универсальная лента ПВХ	36,7
Трубка термоусаживаемая	15
Резина кремнийорганическая	15–40

Экспериментально установлено, что с ростом напряженности электрического поля E время жизни диэлектрика t_d уменьшается, ч:

$$t_d = AE^{-n}, \quad (37)$$

где A – коэффициент, отражающий значение времени жизни диэлектрика при номинальной напряженности электрического поля E_0 ($A = \text{const}$);

n – коэффициент скорости старения диэлектрика ($n = 3-4$).

С ростом температуры время жизни диэлектрика в сильных электрических полях снижается:

$$t_d = t_0 \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (38)$$

где t_0 – время жизни диэлектрика при номинальных условиях, ч;

B – коэффициент, зависящий от свойств материала ($B = \text{const}$);

T – температура, °C.

Пробой диэлектрика предшествует его старению.

Старение материала – это ухудшение его начальных свойств под действием физических, химических или биологических факторов.

Электрическое старение диэлектрика – это ухудшение его свойств от первоначальных под действием электрического напряжения.

По природе процессов, происходящих при старении диэлектрика в электрическом поле, различают **три основных вида пробоя**:

- 1) электрический;
- 2) тепловой;
- 3) электрохимический.

Каждый из механизмов пробоя может иметь место в одном и том же диэлектрике в зависимости от характера электрического поля, в котором он находится – постоянного, переменного, импульсного, низкой или высокой частоты; от времени воздействия напряжения; от наличия в диэлектрике дефектов, от толщины диэлектрика; от условий охлаждения и т. д.

Электрический пробой (под действием высоких напряженностей электрического поля E) наиболее характерен для газов, но может происходить и в неполярных жидких и твердых диэлектриках.

Электрический пробой обусловлен явлениями ударной ионизации и фотоионизации диэлектрика в сильных электрических полях.

Как известно, электрическая прочность $E_{пр}$ зависит от плотности диэлектрика и степени однородности электрического поля, в однородном поле пробой газа наступает при более высоком значении $E_{пр}$, чем в неоднородном поле. По времени развития электрический пробой наиболее быстрый из 3 видов.

Тепловой пробой характерен в основном для твердых диэлектриков и обусловлен большими диэлектрическими потерями, то есть выделением большого количества тепла. При этом в диэлектрике происходят необратимые процессы термического разрушения (обугливание, растрескивание, оплавление и т. д.), в результате чего и происходит рост тока сквозной проводимости.

Электрохимический пробой обусловлен развитием в диэлектрике химических процессов, ведущих к образованию подвижных ионов. Эта форма пробоя наиболее характерна для жидких диэлектриков, содержащих небольшие количества примесей электролита.

В твердых диэлектриках электрохимический пробой имеет место при наличии поверхностных загрязнений, адсорбированной влаги.

Электрохимический пробой требует для своего развития наиболее длительного времени (из трех видов). Этот вид пробоя растянут по времени, так как связан с электропроводностью в диэлектрике, приводящей к медленному выделению в нем других веществ. Например, в результате электролиза может происходить металлизация твердого диэлектрика. Зависимость времени развития пробоя от напряжения электрического поля приведена на рис. 64.

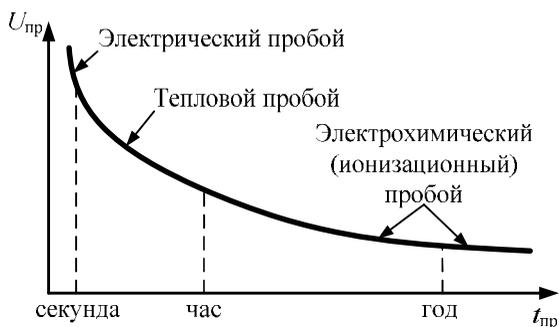


Рис. 64. Зависимость времени развития пробоя $t_{пр}$ от напряжения электрического поля для разных видов пробоя $U_{пр}$

Чистые виды пробоя развиваются редко. На практике имеет место развитие комплексного процесса, ведущего к пробую.

В неоднородной среде, на границе двух диэлектриков с различной электрической прочностью (газ, жидкость – твердое тело) может возникать поверхностный пробой. Это не особый вид пробоя, а комплексное явление.

Поверхностный пробой – это пробой газа или жидкости вблизи поверхности твердого диэлектрика. При поверхностном пробое электрическая прочность твердого диэлектрика не нарушается, но существенно ограничиваются его рабочие напряжения.

После снятия напряжения пробоя:

- 1) пробитый участок газообразного диэлектрика, благодаря высокой подвижности молекул, восстанавливает свою электрическую прочность;
- 2) жидкие диэлектрики также восстанавливаются, но в большинстве случаев не полностью;
- 3) пробой твердых диэлектриков ведет к их полному разрушению.

Перечисленные основные свойства диэлектриков, проявляемые ими в электрических полях, а также соответствующие им электротехнические параметры обобщены в табл. 8.

Таблица 8

Основные электротехнические параметры диэлектриков

Характеристика	Параметр	Обозначение и единицы измерения
Поляризация	Относительная диэлектрическая проницаемость	ϵ
	Поляризованность (вектор поляризации)	P , Кл/м ²
Электропроводность	Удельное электрическое сопротивление	ρ , Ом·м
	Ток утечки	$I_{ут}$, А
Диэлектрические потери	Тангенс угла диэлектрических потерь	$\operatorname{tg}\delta$
Пробой	Электрическая прочность (пробивная напряженность)	$E_{пр}$, МВ/м

3.10. Тепловые свойства диэлектриков

К тепловым свойствам материала относятся нагревостойкость, холодостойкость, теплопроводность, тепловое расширение и др.

Нагревостойкость – способность материала выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, без недопустимого ухудшения его свойств.

Для твердых диэлектриков, используемых в качестве изоляции, ввели особую характеристику – класс нагревостойкости.

Класс нагревостойкости – это максимально допустимая рабочая температура диэлектрика.

К классам нагревостойкости Y, A, E в основном относятся органические диэлектрики.

Диэлектрики классов нагревостойкости $B, F, H, C (200), 220, 250$ в основном относятся к неорганическим.

Виды электроизоляционных материалов, применяемые для изоляции электрических машин, трансформаторов и аппаратов, по классам нагревостойкости согласно ГОСТ 8865–93 (МЭК 85–84), приведены в табл. 9.

Таблица 9

Классы нагревостойкости изоляционных материалов

Класс нагревостойкости	Температура, характеризующая данный класс, °С	Краткая характеристика основных групп электроизоляционных материалов
<i>Y</i>	90	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального шелка, не пропитанные
<i>A</i>	105	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или натурального, искусственного и синтетического шелка, пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал
<i>E</i>	120	Синтетические органические материалы (пленки, волокна, смолы, компаунды, др.)
<i>B</i>	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами
<i>F</i>	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами

Класс нагревостойкости	Температура, характеризующая данный класс, °С	Краткая характеристика основных групп электроизоляционных материалов
<i>H</i>	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры
<i>C</i>	200	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц или их композиции, применяемые без связующих или с неорганическими или элементоорганическими составами

3.11. Электропроводность газов. Пробой газов

Газы являются диэлектриками. В нормальных условиях удельное электрическое сопротивление газов очень велико, до $\rho \sim 10^{18}$ Ом·м.

В идеальном газе свободных носителей заряда нет. В реальных газах имеется очень небольшое число свободных электронов и ионов как результат процесса начальной ионизации молекул под влиянием внешних воздействий, например, нагревания, различных излучений и др. Так, число электронов, образующихся в течение 1 с в 1 см² воздуха под действием радиоактивности Земли или космических лучей, составляет всего 10–20. Одновременно с ионизацией в газах протекает процесс рекомбинации (из электронов и ионов снова образуются нейтральные молекулы).

При наложении электрического поля ионы и электроны в газе получают дополнительную энергию ($W=qU$) и начинают в зависимости от знака заряда перемещаться в направлении поля или против. Возникает слабый электрический ток.

В слабых полях с ростом напряженности внешнего электрического поля сила тока растет, соблюдается закон Ома. При определенной E все образующиеся естественным образом ионы и электроны достигают электродов, сила тока становится постоянной. При дальнейшем росте E ионы и электроны ускоряются

настолько, что могут при соударениях ионизировать другие молекулы газа, происходит экспоненциальное нарастание силы тока – ударная ионизация (рис. 65).

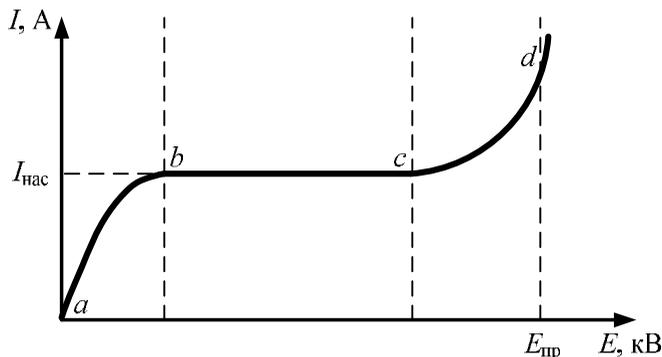


Рис. 65. Вольт-амперная характеристика газообразного диэлектрика:
ab – область слабых полей (закон Ома); *bc* – область средних полей (насыщение);
cd – область сильных полей (ударная ионизация)

Более важная роль в развитии пробоя газа принадлежит электронам, т. к. они, благодаря крайне малой массе, имеют намного большую подвижность, чем ионы. Электрон при соударении с молекулой передает ей часть своей энергии, после этого возможны **два варианта** нарастания силы тока с последующим пробоем газа:

Вариант 1. Электрон ионизирует молекулу (ударная ионизация), от нее отрывается электрон, и уже два электрона разгоняются в поле, они могут ионизировать две следующие молекулы и т. д. В результате возникает электронная лавина.

Электронная лавина – это облако электронов, распространяющихся в газе в электрическом поле, не влияя на это поле.

Число электронов в лавине n экспоненциально возрастает:

$$n = n_0 \exp\left(\frac{a_{и}}{h}\right), \quad (39)$$

где n_0 – начальная концентрация электронов;

$a_{и}$ – коэффициент ударной ионизации;

h – длина прорастающей лавины, м.

Электронная лавина не имеет достаточного количества электронов для образования пробоя, не создает проводящего пути между электродами. Для полного развития пробоя процессу ударной ионизации должны сопутствовать дополнительные (вторичные) процессы, обеспечивающие рост числа заряженных частиц между электродами. Основную роль во вторичных процессах играет бомбардировка ионами поверхности катода, приводящая к выбиванию вторичных электронов, в результате осуществляется пробой.

Лавинный пробой развивается в течение относительно длительного времени $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с и не характерен для импульсных напряжений.

Вариант 2. Электрон, ускоренный электрическим полем, может при столкновении с молекулой не выбить электрон с образованием иона, а привести молекулу в возбужденное состояние. Возбужденная молекула в следующий момент отдает свою избыточную энергию – испускает фотон. Затем фотоны, двигаясь со скоростью света ($3 \cdot 10^8$ м/с), опережают электронные лавины и, «столкнувшись» со следующими нейтральными молекулами, могут перевести их в возбужденное состояние с последующим испусканием фотона и т. д. Происходит последовательный процесс поглощения – испускания фотонов. Возникает стример.

Стример – столб возбужденных молекул газа. Стример квазинейтрален, электрическое поле есть только на его границах.

Фотоны иногда могут ионизировать молекулы, разбивая их на ионы и электроны и таким образом давая начало новым электронным («дочерним») лавинам. Это **лавинно-стримерный** пробой. Лавинно-стримерный пробой газа развивается быстрее лавинного, за время $\sim 10^{-7} \dots 10^{-6}$ с.

Таким образом, возможны 2 механизма развития пробоя в газах:

- 1) лавинный;
- 2) лавинно-стримерный.

Для газов существует экспериментально установленная зависимость: пробивное напряжение $U_{пр}$ в однородном электрическом поле изменяется в зависимости от ph – произведения давления газа p на расстояние между электродами h . Эта зависимость известна как закон Пашена.

Закон Пашена для газов: для данного газа минимальное напряжение пробоя $U_{пр}$ в однородном электрическом поле есть величина постоянная при постоянном произведении ph , где p – давление газа, h – расстояние между электродами.

В области малых значений ph реализуется лавинный пробой. Области больших значений ph соответствует лавинно-стримерный пробой.

В газах наблюдается только электрический пробой.

3.12. Примеры газообразных электроизоляционных материалов

Преимуществами газов перед остальными видами электроизоляционных материалов (ЭИМ) являются высокое удельное сопротивление, малый тангенс угла диэлектрических потерь, малая (близкая к 1) диэлектрическая проницаемость.

Важным свойством газов является их способность восстанавливать электрическую прочность после пробоя.

Наибольшее применение в качестве электроизоляционного материала из газов в энергетике имеет воздух. Воздух представляет собой смесь, которая состоит из азота N_2 (78,03 %), кислорода O_2 (20,93 %), углекислого газа CO_2 (0,03 %), инертных газов He, Xe, Ar, Ne, Kr (0,1 %). Часто воздух является основным изолирующим материалом, например, в воздушных конденсаторах, на участках воздушных линий электропередачи воздух образует единственную изоляцию между голыми проводами.

Кроме воздуха в качестве электрической изоляции служат двух- и трехатомные газы – азот, водород, углекислый газ. Электрические прочности этих газов при нормальных условиях мало отличаются друг от друга и могут с достаточной точностью приниматься равными прочности воздуха.

Гелий – инертный газ, самый легкий из всех инертных газов. Гелий не горит, не поддерживает горение. При комнатной температуре обыкновенное стекло, железо, палладий и платина непроницаемы для гелия, однако он проникает через кварцевое стекло, а при высокой температуре – через фосфор. Обладает уникальными свойствами: имеет самую низкую электрическую прочность ($E_{пр}$ примерно в 17 раз меньше, чем у воздуха), самую низкую из газов температуру сжижения; диэлектрическая проницаемость ϵ жидкого гелия почти не отличается от диэлектрической проницаемости газов; коэффициенты термического расширения газообразного и жидкого гелия одного порядка. В микроэлектронике гелий применяют в качестве индикаторного газа при контроле герметичности микросхем.

Вакуум является особой разновидностью диэлектрика. Он отличается высокими электроизоляционными свойствами и стабильностью характеристик. Используется в выключателях напряжением 10–35 кВ, а также в коммутационных аппаратах до 1кВ.

Электроотрицательные газы – это газы, молекулы которых обладают сродством к электрону, т. е. молекуле энергетически выгодно захватить электрон и превратиться в отрицательный ион. Этот процесс приводит к явлению прилипания электронов и, следовательно, уменьшению коэффициента ударной ионизации. Поэтому электроотрицательные газы имеют повышенную электрическую прочность.

Из электроотрицательных газов наибольшее применение нашел гексафторид серы – элегаз SF₆ (от «электрический газ»). Он обладает очень высокой электрической прочностью, химической инертностью, нетоксичностью, негорюч, имеет высокую термостойкость (до 800 °С), взрывобезопасность, низкую температуру сжижения и т. п. В отсутствие примесей элегаз безобиден для человека, но продукты разложения элегаза в итоге воздействия рядов токсичны и химически активны. В устройствах элегаз обычно используется под давлением в несколько атмосфер для большей компактности энергоустановок, т. к. электрическая прочность увеличивается с ростом давления. На основе элегазовой изоляции созданы и эксплуатируется ряд электрических устройств: кабели, конденсаторы, выключатели, компактные закрытые распределительные устройства. Например, использование элегаза позволяет в десятки раз уменьшить размеры распределительных устройств. Часто использование элегаза экономически выгодно, даже несмотря на высокую стоимость – более 10 долларов за 1 килограмм. Наиболее широкое применение элегаз нашел за рубежом, в особенности в Японии.

3.13. Электропроводность жидкостей. Пробой жидкостей

Электропроводность жидких диэлектриков связана со строением молекул жидкости и может быть:

- 1) ионная;
- 2) молионная;
- 3) электронная.

Ионная проводимость осуществляется в неполярных жидкостях, определяется наличием примесей, диссоциировавших на ионы. В полярных жидкостях ионная электропроводность зависит не только от примесей, иногда она вызывается диссоциацией на ионы молекул самой жидкости.

В некоторых жидких диэлектриках электропроводность обусловлена перемещением относительно крупных заряженных коллоидных частиц – молионов.

Молионная электропроводность характерна для масел с включениями влаги (воды) и для лаков с мелкодисперсными наполнителями.

Если диэлектрическая проницаемость коллоидной частицы $\epsilon_{\text{кол.час.}}$ больше диэлектрической проницаемости основного вещества $\epsilon_{\text{осн.вещ.}}$ ($\epsilon_{\text{кол.час.}} > \epsilon_{\text{осн.вещ.}}$), то знак заряда молиона положительный. Если $\epsilon_{\text{кол.час.}} < \epsilon_{\text{осн.вещ.}}$, то знак заряда молиона отрицательный.

В очищенных от примесей диэлектрических жидкостях в сильных электрических полях при эмиссии электронов с катода может наблюдаться **электронная проводимость**.

Невозможность полного удаления способных к диссоциации примесей из жидкого диэлектрика затрудняет получение электроизоляционных жидкостей с малой удельной проводимостью. Полярные жидкости по сравнению с неполярными всегда имеют повышенную удельную проводимость, причем возрастание диэлектрической проницаемости приводит к росту проводимости. Сильнополярные жидкости отличаются настолько высокой удельной проводимостью, что рассматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью.

Удельная проводимость любой жидкости растет с ростом температуры. С ее увеличением в результате уменьшения вязкости возрастает подвижность ионов и может увеличиваться степень тепловой диссоциации:

$$g = A \exp\left(-\frac{a}{T}\right), \quad (40)$$

где γ – проводимость, См;

T – температура, °С;

A и a – константы, характеризующие жидкость.

3.13.1. Пробой жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики отличаются более высокими значениями электрической прочности, чем газы в нормальных условиях. Электрическая прочность жидких диэлектриков сильно зависит от их чистоты.

Наличие примесей, от которых в жидкостях избавиться крайне сложно, усугубляет явление пробоя жидких диэлектриков и затрудняет выяснение его механизмов.

В максимально очищенных жидкостях процесс пробоя имеет чисто электронный характер и обусловлен процессами ударной ионизации. В очищенных неполярных жидкостях механизм пробоя подобен пробою в газах. Так, формально жидкие очищенные углеводороды можно рассматривать как газы, сжатые до давления ~ 2000 атмосфер. Начальные электроны, образующие лавину, выбиваются из катода. Т. к. плотность жидкостей в $\sim 10^3$ раз больше плотности газов в нормальных условиях, то в жидкостях электроны, производящие ударную ионизацию, обладают намного меньшей длиной свободного пробега, следовательно, пробивная напряженность у чистых жидких диэлектриков на 1–2 порядка выше, чем у газов.

При пробое **технических жидкостей** (т. е. с примесями) определяющую роль играют вторичные процессы, связанные с движением и перераспределением примесных включений. Формы проявления вторичных процессов многообразны. Например, если в жидком диэлектрике присутствуют твердые проводящие микровключения, то под действием электрического поля они поляризуются, притягиваются друг к другу и образуют «мостики», замыкающие электроды. По этим мостикам проходит электрический разряд.

3.13.2. Примеры жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики в основном принадлежат к пассивным диэлектрикам и используются как электроизоляционные материалы (ЭИМ). Жидкие ЭИМ выполняют следующие функции: 1) осуществляют разделение частей электроустановки с разными потенциалами; 2) жидкими ЭИМ пропитывают твердые диэлектрики для повышения их электрической прочности и одновременно увеличивается эффективность охлаждения электрооборудования.

Условно жидкие ЭИМ можно классифицировать на несколько групп (рис. 66).

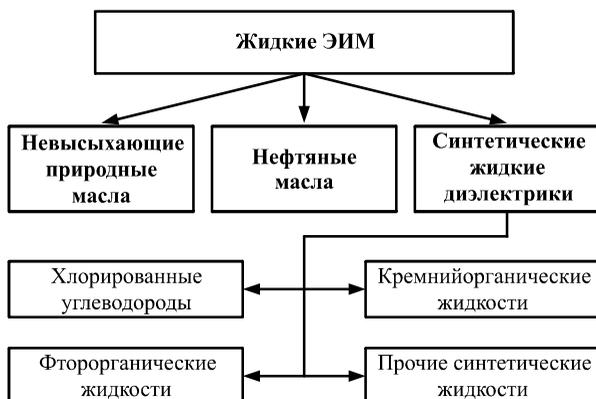


Рис. 66. Классификация жидких ЭИМ

Нефтяные («минеральные») электроизоляционные масла получают путем ступенчатой перегонки нефти и выделением на каждой ступени определенной (по температуре кипения) фракции с последующей тщательной очисткой от химически нестойких примесей.

Растительные масла – вязкие жидкости, получаемые из семян различных растений.

Синтетические жидкие диэлектрики – это трудногорючие и негорючие жидкости. Применяются, когда необходимо обеспечить длительную и надежную работу при повышенных тепловых нагрузках и напряженности электрического поля в пожаро- или взрывоопасной среде.

Хлорированные углеводороды получают из углеводородов путем замены в их молекулах некоторых (или всех) атомов водорода атомами хлора. Коммерческие названия – «совол», «совтол», «калория-2» и др. В зарубежной литературе они называются хлорбифенилами. У этого класса материалов два существенных недостатка – высокая токсичность и сильное влияние на озоновый слой.

Кремнийорганические жидкости (силоксаны) – также получают из углеводородов путем замены в их молекулах некоторых атомов водорода атомами кремния. Это огромный класс жидкостей с различными электро- и теплофизическими характеристиками. К недостаткам силоксанов относится пожароопасность (горючесть) и относительно высокая стоимость – они в несколько раз дороже трансформаторного масла.

Фторорганические жидкости – углеводороды, в которых атом водорода замещен на атом фтора. В зарубежной литературе они называются перфторуглероды. Важным достоинством фторорганических жидкостей является полная негорючесть, недостатком – высокая цена.

3.14. Примеры твердеющих и твердых электроизоляционных материалов

Главная классификация всех диэлектриков – по механизму поляризации, поскольку именно эта классификация определяет применение материала в электротехнике. По механизму поляризации диэлектрики делят на линейные, или пассивные (это электроизоляционные материалы), и нелинейные, или активные диэлектрики.

К активным диэлектрикам относят сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты, материалы квантовой электроники, суперионные проводники и др.

Строгая классификация активных диэлектриков невозможна, поскольку один и тот же материал может проявлять признаки различных активных диэлектриков. Например, сегнетоэлектрики часто имеют и свойства пьезоэлектриков.

Активные диэлектрики уже сегодня нашли широкое использование – это детонаторы, источники звука огромной мощности, миниатюрные трансформаторы, кварцевые резонаторы для высокостабильных генераторов частоты, пьезокерамические фильтры и зажигалки, ультразвуковые линии задержки и многое-многое другое.

Пассивные диэлектрики в основном используют в качестве электроизоляционных материалов.

Электрическая изоляция окружает токоведущие части электрических устройств. Ее назначение – не допускать прохождения электрического тока по каким-либо нежелательным путям, помимо тех, которые предусмотрены электрической схемой.

По своему составу, физическому состоянию, макро- и микростроению, физическим свойствам, исходному сырью, способам его переработки, областям и случаям применения, наконец, по разным экономическим признакам, как, например, цене, мощности выпуска и потребления, в зависимости от производящих стран и прочего, изоляционные электротехнические материалы представляют многообразие, не имеющее примеров в других отраслях промышленности.

3.14.1. Твердые электроизоляционные материалы

Можно классифицировать твердые ЭИМ по различным признакам, например – по способу получения (рис. 67).

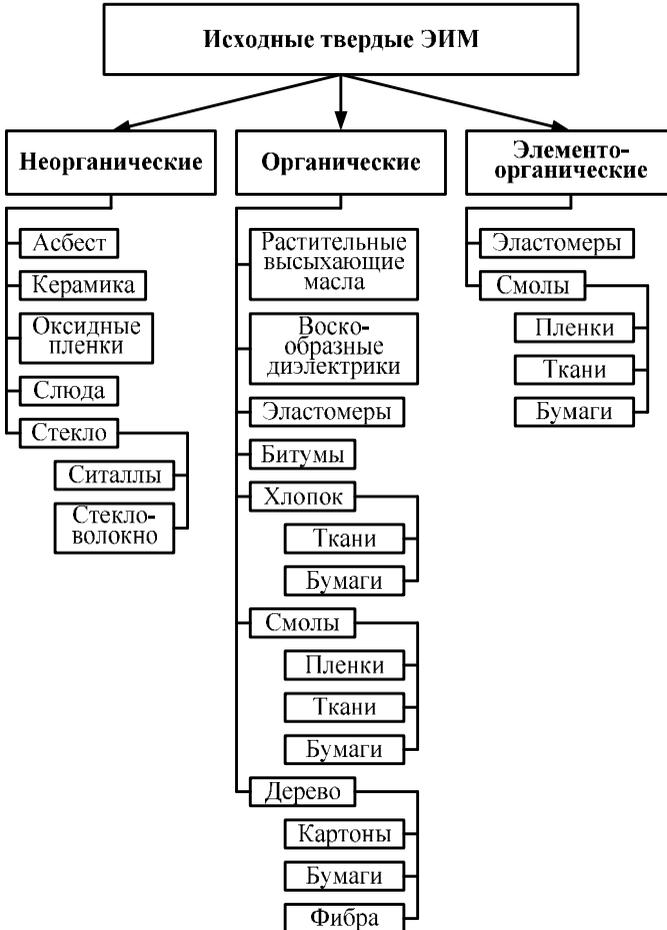


Рис. 67. Классификация твердых ЭИМ

Синтетические диэлектрические материалы могут быть созданы с заранее заданным комплексом электрических и физико-химических свойств, поэтому именно они нашли широкое применение

в электротехнике: керамика, неорганическое стекло, пластмассы, резины, композиты (в основном, слоистые – гетинакс, текстолиты и стеклотекстолиты).

Из **натуральных** материалов широкое применение нашли ЭИМ, производимые из древесной массы: бумага, картон, фибра. Преимуществом является их производство из возобновляемого сырья, а общий недостаток – гигроскопичность.

Бумагу получают варкой щепы и опилок в щелочном растворе с добавками. Чем выше плотность бумаги, тем выше ее механическая и электрическая прочность. Плотность конденсаторных бумаг может более чем в 1,5 раза превышать плотность воды. Электрическая прочность бумаги толщиной 10 мкм, пропитанной трансформаторным маслом, составляет до 10 МВ/см.

Электротехнический **картон**, как правило, используют после пропитки трансформаторным маслом, так как в результате попадания влаги резко уменьшается его электрическая прочность (в 4 и более раз), а также механическая прочность.

Фибра – материал, изготавливаемый пропиткой нескольких слоев бумаги-основы концентрированным хлористым цинком или хлористым кальцием (реже раствором серной кислоты и роданида кальция) и последующим прессованием. Выпускается в виде черных и неокрашенных листов.

Из природных ЭИМ широко распространен минерал **слода**. Этот минерал способен расщепляться на тонкие листочки и имеет высокую теплостойкость (выдерживает температуру 1250 °С–1300 °С), влагонепроницаемость, механическую прочность и гибкость. Его активно используют для изоляции участков высоких напряжений и в конденсаторах.

В качестве природных электроизоляторов применяют также некоторые горные породы, такие как мрамор, шифер и талькохлорит.

Из **синтетических** диэлектриков наиболее используемые – полимерные материалы (эластомеры и пластмассы), различные керамики, неорганические стекла.

Из **композиционных** материалов в качестве ЭИМ наибольшее распространение получили слоистые – гетинакс и текстолит.

3.14.2. Твердеющие электроизоляционные материалы

Твердеющие ЭИМ – это материалы, жидкие в момент применения, а затем по истечении короткого времени – твердые. В эту

группу входят электроизоляционные лаки, высыхающие растительные масла, эмали, компаунды.

Электроизоляционные **лаки** – это коллоидные растворы лаковой основы в летучих растворителях. Лаковая основа – смолы, битумы, высыхающие масла. Растворители – ароматические углеводороды, спирты, сложные и простые эфиры, скипидар и др.

После высыхания лаки образуют пленку, обладающую электроизоляционными свойствами. Так же с образованием пленки ведут себя высыхающие растительные масла.

По назначению и выполняемым функциям лаки делят на пропиточные, покрывные и клеящие.

Электроизоляционные **эмали** – это лаки, в составе которых имеются пигменты (высокодисперсные неорганические вещества, обычно – оксиды металлов, повышающие механические и тепловые свойства пленки).

Компаунды – это твердеющие электроизоляционные материалы, не содержащие растворителей.

По применению компаунды делятся на 2 основные группы: пропиточные, назначение аналогично назначению пропиточных лаков, и заливочные. Заливочные компаунды служат для заполнения больших полостей между различными деталями в электрических аппаратах и для получения сравнительно толстого покрытия на деталях.

Есть компаунды, представляющие собой композиционные материалы, например, эпоксидные компаунды (эпоксидная смола + наполнители, пластификаторы и другие ингредиенты). Другой вид компаундов – битумы. Это аморфные материалы, представляющие собой сложные смеси углеводородов. Различают битумы нефтяные, представляющие собой тяжелые продукты перегонки нефти, и природные (ископаемые), называемые также асфальтами. Битумы имеют черный (или темно-коричневый) цвет, при достаточно низких температурах хрупки. Битумы растворяются в углеводородах, немаслостойкие. В спирте и воде битумы нерастворимы, они имеют малую гигроскопичность и в толстом слое практически водонепроницаемы. Битумы термопластичны, плотность их близка к 1 г/см^3 .

В производстве современных электрических машин и аппаратов основное применение нашли терморезистивные пропиточные составы, которые при нагреве твердеют в результате сшивания молекул. После отверждения при высокой температуре ($160 \text{ }^\circ\text{C}$ – $200 \text{ }^\circ\text{C}$) они

приобретают стабильные электрические и механические свойства, мало меняющиеся при последующем нагревании. Они не имеют недостатков битумных компаундов (вытекание при повышенных температурах, необходимость производить пропитку при высоких температурах, старящих изоляцию).

4. ПРОВОДНИКИ

Проводник – материал, имеющий свободные заряды. Удельное сопротивление проводника $\rho < 10^{-5}$ Ом·м.

В представлении зонной теории твердого тела у проводника отсутствует запрещенная зона.

4.1. Общие сведения о проводниках. Природа проводимости металлов

Проводниками электрического тока могут служить твердые тела, жидкости, а в особых редких условиях и газы.

Твердыми проводниками являются металлы, металлические сплавы и некоторые модификации углерода.

К **жидким проводникам** относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Как правило, температура плавления металлов высока, за исключением ртути, у которой она составляет 39 °С. Поэтому при нормальной температуре в качестве жидкого металлического проводника может быть применена только ртуть. Температуру плавления, близкую к нормальной (29,8 °С), имеет еще галлий. Другие металлы являются жидкими проводниками лишь при повышенных или высоких температурах. Электролитами являются растворы (в основном водные) кислот, щелочей и солей, а также расплавы ионных соединений. Прохождение тока через такие проводники связано с переносом вместе с электрическими зарядами частей молекул (ионов), в результате чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза.

Все **газы и пары**, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Однако если напряженность поля выше некоторого критического

значения, обеспечивающего начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником, обладающим электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов и положительных ионов в единице объема представляет собой особую равновесную проводящую среду, называемую плазмой.

Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются металлы и их сплавы. Носителями электрического тока в металлах, как в твердом, так и в жидком (расплавленном) состоянии являются свободные электроны.

Для объяснения проводимости металлов существует классическая теория металлов Друде. Структура металла – кристаллическая, что означает, что частицы занимают в пространстве только определенные места – «узлы» кристаллической решетки. Согласно классической модели, в металле решетка формируется не атомами, а «ионными остовами». Положительно заряженный ионный остов – это остаток атома металла после того, как часть электронов его валентных (внешних) оболочек, наиболее слабо связанных с ядром, передается в общий объем металла, то есть обобществляется (коллективизируется). В объеме металла обобществленные электроны образуют общий для всего металла «электронный газ».

Ионный остов погружен в «электронный газ» свободных электронов (рис. 68).

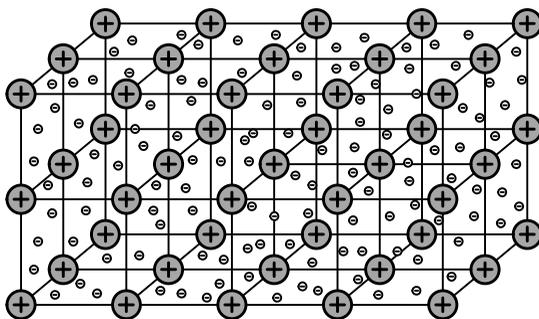


Рис. 68. Модель структуры металла

В коллективизированное состояние от каждого атома металла переходит от одного до двух валентных электронов. (Например, в 1 м^3 меди находится 10^{29} свободных электронов).

Коллективизированные электроны совершают хаотичное тепловое движение со средней скоростью порядка 10^5 м/с.

В отсутствие внешнего поля материал остается электрически нейтральным.

4.2. Основные электротехнические характеристики проводников

Проводники характеризуют следующими характеристиками:

1) **Удельная проводимость** γ ($j=\gamma E$) для металлов может быть выражена через характеристики электрона, См:

$$g = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2m V_T}, \quad (41)$$

где e – заряд электрона, Кл;

n_0 – число свободных электронов в единице объема металла, м^{-3} ;

λ – средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки, м;

m – масса электрона, кг;

V_T – средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле, м/с.

На основании экспериментальных данных Г. Видеманом и Р. Францем было установлено, что для различных металлов при данной температуре отношение коэффициента теплопроводности λ_T к удельной электропроводности γ практически не изменяется. А пропорциональность отношения λ_T/γ термодинамической температуре была установлена Л. Лоренцем в 1882 году. В его честь коэффициент L_0 носит название числа Лоренца, а сам закон именуют законом Видемана–Франца–Лоренца.

Закон Видемана – Франца – Лоренца: для металлов отношение коэффициента теплопроводности λ_T к удельной электропроводности γ пропорционально температуре:

$$\frac{\lambda_T}{g} = L_0 T, \quad (42)$$

где $L_0=2,45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2(\text{Вт} \cdot \text{Ом} \cdot \text{К}^{-2})$ – число Лоренца.

2) **Удельное сопротивление** ρ , Ом·мм²/м (Ом·м):

$$r = \frac{1}{g}. \quad (43)$$

Сопротивление проводника можно определить по формуле, Ом:

$$R = r \frac{l}{S}, \quad (44)$$

где l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения проводника, мм².

Тогда удельное сопротивление проводника можно определить как:

$$r = R \frac{S}{l}, \quad (45)$$

3) **Температурный коэффициент удельного сопротивления** TK_ρ или α_ρ (К⁻¹) – величина, равная относительному изменению удельного сопротивления материала при изменении температуры на единицу:

$$\text{TK}_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{r} \frac{dr}{dT}. \quad (46)$$

При повышении температуры сопротивление металлов растет, следовательно, температурный коэффициент удельного сопротивления металлов положительный (рис. 69).

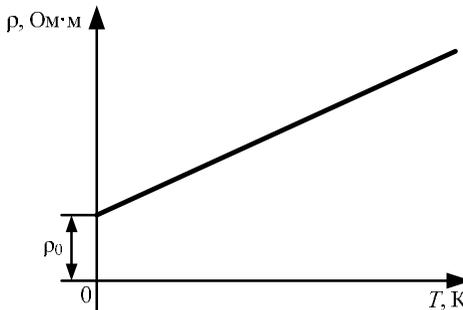


Рис. 69. Температурная зависимость удельного сопротивления металлов ρ в наиболее используемом на практике диапазоне температур T

При повышении температуры сопротивление металла растет, так как уменьшается средняя длина свободного пробега электрона λ , следовательно, уменьшается удельная проводимость металлов, а она обратно пропорциональна удельному сопротивлению. При наложении электрического поля электрон получает направление движения (к положительному электроду) и дополнительную энергию eU (а значит, и дополнительную скорость – несколько миллиметров в секунду). В результате в металле течет электрический ток. В это же время ионный остов каждого атома не жестко закреплен в узле кристаллической решетки, а совершает колебательное движение около положения равновесия. С ростом температуры амплитуда колебаний ионных остовов растет, и у электрона больше вероятности столкнуться с этими остовами на пути к электроду, потерять направление движения, следовательно, уменьшается длина свободного пробега. Это ведет к снижению проводимости, то есть растет сопротивление.

На практике на ограниченном отрезке температур допустима линейная аппроксимация удельного сопротивления металла:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \bar{\alpha}_r (T_2 - T_1)], \quad (47)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления проводникового материала при температурах T_1 и T_2 соответственно (при этом $T_2 > T_1$), Ом·мм²/м;

$\bar{\alpha}_r$ – средний температурный коэффициент удельного сопротивления данного материала в диапазоне температур от T_1 до T_2 , К⁻¹;

T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры ограниченного отрезка соответственно, °С.

В табл. 10 приведены температурные коэффициенты удельных сопротивлений некоторых металлов.

Таблица 10

Температурные коэффициенты удельных сопротивлений некоторых металлов

Наименование проводника	Значение коэффициента $\alpha_p \cdot 10^{-3}, \text{K}^{-1}$
Алюминий	4,2
Вольфрам	5

Наименование проводника	Значение коэффициента ар. 10-3, К-1
Железо	6
Константан (сплав Ni-Cu + Mn)	0,05
Латунь	0,1-0,4
Манганин приборный (сплав Cu-Mn-Ni)	0,01
Медь	4,3
Никелин (сплав Cu-Ni)	0,1
Нихром (сплав Ni-Cr-Fe-Mn)	0,1
Олово	4,4
Платина	3,9
Ртуть	1,0
Свинец	3,7
Серебро	4,1
Фехраль (Cr (12 %-15 %)+Al (3,5 %-5,5 %)+ +Si (1 %) + Mn (0,7 %) + Fe)	0,1
Цинк	4,2
Чугун	1,0

4) Контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термоЭДС).

При соприкосновении двух различных металлических проводников между ними возникает контактная разность потенциалов. Причина заключается в различии концентраций и давлений электронного газа в разных металлах.

Из электронной теории металлов следует, что контактная разность потенциалов U_{AB} , В:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (48)$$

где U_A и U_B – потенциалы соприкасающихся металлов A и B соответственно, В;

n_{0A} и n_{0B} – концентрации электронов в металлах A и B соответственно, м^{-3} ;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

e – заряд электрона, Кл.

Если температура металлов одинакова, то сумма потенциалов в замкнутой цепи равна 0. Если температуры металлов T_1 и T_2 различны, то возникает термоЭДС спая:

$$U = \psi(T_1 - T_2), \quad (49)$$

где ψ – постоянный для данной пары металлов коэффициент термоЭДС.

5) Работа выхода электрона из металла

Движущиеся в металле электроны могут обладать кинетической энергией, достаточной для преодоления сил притяжения со стороны положительного заряда в металле и сил отталкивания со стороны ранее вылетевших электронов.

Такие электроны могут вырваться с поверхности – «электронная эмиссия». Энергия, необходимая для отрыва электронов от поверхности металла, есть работа выхода. Для чистых металлов $A_{\text{вых}}$ составляет несколько электронвольт.

Вылетевшие электроны образуют вблизи поверхности проводника электронное «облако». Между электронным газом в металле и электронным «облаком» устанавливается динамическое равновесие.

Явление испускания электронов нагретыми металлами называется **термоэлектронной эмиссией**.

4.3. Классификация проводниковых материалов

Проводниковые материалы условно делят на следующие группы:

- 1) Проводники (металлы) **высокой удельной проводимости**.
- 2) Проводники (сплавы) **с высоким удельным сопротивлением**.
- 3) **Контактные материалы**.
- 4) **Сверхпроводники и криопроводники** (области низких температур, $\sim 77\text{K}$ – температура жидкого азота).

В табл. 11 приведены значения удельной проводимости некоторых металлов.

Таблица 11

Удельная проводимость некоторых металлов

Наименование материала	Значение удельной проводимости $\gamma \cdot 10^6$, См/м
Серебро	62,5
Медь	59,5

Наименование материала	Значение удельной проводимости $\gamma \cdot 10^6$, См/м
Золото	45,5
Алюминий	38,0
Магний	22,7
Иридий	21,1
Молибден	18,5
Вольфрам	18,2
Цинк	16,9
Никель	11,5
Железо чистое	10,0
Платина	9,35

4.4. Проводники высокой удельной проводимости

В эту группу относятся металлы с удельным сопротивлением $\rho \leq 0,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, основное использование которых – в качестве материалов токопроводящих жил.

Основными представителями проводников этого класса являются медь, сплавы меди, алюминий, сплавы алюминия, серебро, золото, а также электротехническая сталь.

Главное требования к материалам этого типа – минимальное значение удельного электрического сопротивления и способность легко обрабатываться, что необходимо для изготовления проводов малых и средних сечений; способность образовывать контакты с малым переходным сопротивлением при пайке, сварке и других методах соединения проводов; коррозионная стойкость и т. п.

Серебро – один из наиболее дефицитных материалов, достаточно широко применяемый в электротехнике и электронике для высокочастотных кабелей, защиты медных проводников от окисления, для электродов некоторых типов керамических и слюдяных конденсаторов в электрических контактах, где оно используется в сплавах с медью, никелем или кадмием, в припоях ПСр–10, ПСр–25 и др. Серебро марки Ср999–999.9 содержит примесей не более 0,1 %. Удельное электрическое сопротивление $\sim 0,015$ мкОм·м. Механические характеристики серебра невысоки: твердость немного выше, чем у золота; предел прочности при разрыве не более 200 МПа;

относительное удлинение при разрыве ~50 %. По сравнению с золотом и платиной имеет пониженную химическую стойкость. Часто применение серебра ограничивается его способностью диффундировать в материалы подложки.

Медь – в настоящее время более 70 % всей производимой меди идет на электротехнические изделия. Медь имеет минимальное удельное сопротивление (только серебро имеет ρ на ~ 5 % меньше, чем чистая медь); высокую механическую прочность; удовлетворительную стойкость к воздействию окружающей среды; хорошую технологичность (благодаря сочетанию прочности и высокой пластичности медь перерабатывается в фольгу, ленты, шины, профили, проволоку и другие изделия); относительную легкость пайки и сварки, что особенно важно при монтажных работах. Основным недостатком меди – ее дефицит, малая распространенность в природе. При изготовлении электротехнических изделий используют высокочистую медь, т. к. примеси снижают ее электропроводность. В производстве обмоточных и монтажных проводов и кабелей используется мягкая отожженная медь марки ММ. При изготовлении контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин используют твердую медь марки МТ, которая имеет меньшую проводимость и относительное удлинение перед разрывом, но большую механическую прочность, чем отожженная медь марки ММ.

Широко используются и медные сплавы. На сплавы идет более 30 % меди. Сплавы имеют более высокие механические свойства, чем чистая медь, но по сравнению с медью обладают повышенным электрическим сопротивлением.

Латуни (сплавы **меди** от 60 % до 90 % и **цинка** от 40 % до 10 %) – прочнее меди и менее подвержены окислению. При присадке к латуни кремния и свинца повышаются ее антифрикционные качества, при присадке олова, алюминия, марганца и никеля возрастает антикоррозийная стойкость. Латунь обладает достаточно высоким относительным удлинением перед разрывом при повышенном по сравнению с чистой медью пределе прочности при растяжении. Это дает латуни технологические преимущества перед медью. Она применяется для изготовления токоведущих частей, от которых требуются повышенные твердость и стойкость к действию электрических разрядов.

Бронзы. Раньше бронзами называли сплавы меди (80 %–94 %) и олова (20 %–6 %), сейчас бронзы – **сплавы меди со всеми элементами, кроме цинка.** В настоящее время производят безоловянные бронзы, именуемые по главному вслед за медью компоненту. Для электротехники наибольший интерес представляют бронзы, которые сочетают высокую удельную электропроводность с прочностью и твердостью (бериллиевая бронза, кадмиевая и хромовая бронзы).

Алюминий. В свободном виде алюминий не встречается. По содержанию в земной коре (8,8 %) алюминий занимает третье место после кислорода и кремния, с которыми в виде алюмосиликатов алюминий составляет больше 82 % массы земной коры, занимает по распространению первое место по распространенности среди металлов. Для электротехнических целей используется алюминий, содержащий не более 0,5 % примесей.

Достоинства алюминия: малая плотность (в 3,3 раза легче меди); высокая удельная электропроводность; пластичность; хорошая технологичность; коррозионная стойкость. При пониженной температуре (менее 70 К) его удельная электропроводность становится даже выше, чем у меди. Дополнительное достоинство алюминия в том, что он самый распространенный в природе металл. С учетом дефицитности меди роль алюминия как проводникового материала высокой проводимости постоянно возрастает.

Чистый алюминий маркируется в зависимости от химического состава: особой чистоты А999 (99,999 А1 %); высокой чистоты А995 (99,995 А1 %), А99 (99,99 А1 %), А97 (99,97 А1 %), А95 (99,95 А1 %); технической чистоты А85 (99,85 А1 %), А8 (99,80 А1 %), А7 (99,70 А1 %), А6 (99,60 А1 %), А5 и А5Е или АЕ (99,50 А1 %), и А (99,00 А1 %). Из алюминия АЕ, в частности, изготавливается алюминиевая электротехническая проволока марок: АТ – твердая, АПТ – полутвердая, АМ – мягкая.

Алюминий хорошо окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Эта пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов, а также делает невозможной пайку алюминия обычными методами.

При заданном сопротивлении и длине, провод, изготовленный из меди, в 1,63 раза в сечении меньше, чем провод из алюминия. Но алюминиевый провод при этом будет легче медного почти в 2 раза.

Сплавы алюминия. Магналий – сплав алюминия с магнием. Отличается низкой плотностью. Применяется для изготовления стрелок различных электро- и радиотехнических приборов.

Силумин – сплав алюминия и кремния, меди и марганца. Обладает хорошей текучестью, малой усадкой, большой плотностью и повышенной прочностью по сравнению с алюминием и широко применяется для корпусов воздушных конденсаторов.

Дюраль – сплав алюминия с медью, магнием и марганцем. Медь и магний улучшают механические свойства сплава, а марганец увеличивает твердость и коррозионную стойкость. Для защиты от коррозии дюраль покрывают лаками, красками или слоем алюминия.

Альдрей – сплав алюминия с магнием и кремнием с примесью железа. Применяется при изготовлении проводов воздушных линий связи. Сохраняет легкость чистого алюминия и близок к нему по удельному электрическому сопротивлению (0,0317 мкОм·м). Имеет высокие механические свойства (разрушающее напряжение при растяжении 350МПа).

Железо и сталь – наиболее дешевый и доступный металл. Сталь – это сплав железа с углеродом (не более 2,14 %). Электротехническая сталь – сталь, легированная кремнием (Si). Сталь имеет хорошие механические свойства, но удельное сопротивление относительно велико ($\sim 10^{-7}$ Ом·м). Благодаря низкой стоимости, широко используют, например, в качестве третьего рельса в метро.

Сталеалюминиевый провод – сердечник, свитый из стальных жил, сверху обвит алюминиевой проволокой. Механическая прочность определяется стальным сердечником, а проводящие свойства – алюминием.

Биметалл – сталь, снаружи прочно покрытая медью. Механические и электрические свойства промежуточные между сталью и медью.

4.5. Проводники высокого удельного сопротивления

В эту группу относятся металлы и сплавы с удельным сопротивлением $\rho > 3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м.

Высокое удельное сопротивление проводников, безусловно, относительно. К этой группе проводниковых материалов из чистых металлов относится ртуть. Ртуть является единственным металлом, который сохраняет жидкое состояние при комнатной температуре, она стойка к окислению, которое наблюдается только при температуре,

близкой к температуре ее кипения (356,9 °С). Ртуть обладает следующими характеристиками: плотность 13,55 г/см³; температура застывания –39 °С; температурный коэффициент объемного расширения 182·10⁻⁶ °С⁻¹. Удельное сопротивление $\rho = 0,94 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$; температурный коэффициент сопротивления $\alpha = +0,00099 \text{ К}^{-1}$. Ртуть применяется в качестве жидких контактов в специальных реле и выключателях, а также в ртутных выпрямителях.

К этой группе относятся сплавы:

- 1) на основе меди – **манганин, константан, никелин**;
- 2) сплавы на основе железа – **нихромы, фехраль, хромаль** и др.

В некоторых практических задачах от проводников требуется высокое удельное сопротивление и малый температурный коэффициент сопротивления. Сплавы на основе меди (манганин, константан, никелин) – применяются для изготовления образцовых резисторов, шунтов и т. д. От сплавов подгруппы требуется высокая стабильность во времени, малый температурный коэффициент удельного сопротивления и малый коэффициент термоЭДС в паре данного сплава с медью. Во многих случаях требуется технологичность сплавов – возможность изготовления из них гибкой проволоки, иногда тонкой (диаметром порядка сотых долей миллиметра).

Сплавы на основе железа (нихромы, фехраль, хромаль) – являются жаростойкими, поэтому их используют для изготовления электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. д. Так как сплавы этой подгруппы используют для приборов, производимых в больших количествах (электроплиток, электрических чайников, паяльников), для них важными свойствами являются дешевизна и отсутствие в составе дефицитных компонентов.

Манганин – широко применяется для изготовления образцовых резисторов. Примерный состав: Cu – 85 %, Mn – 12 %, Ni – 3 %. Название происходит от наличия в нем марганца (латинское *man-ganum*). Имеет желтоватый цвет, который объясняется большим содержанием меди. Достоинство – слабая зависимость сопротивления от температуры, что необходимо для обеспечения постоянства сопротивления в электроизмерительных устройствах. Кроме того, манганин имеет малое значение термоЭДС в контакте с медью, благодаря чему снижается погрешность при точных измерениях.

Константан (от лат. *constans, constantis* – постоянный, неизменный) – это сплавы, имеющие состав: медь (Cu) ~59 % + никель

(Ni) 39–41 % + марганец (Mn) 1–2 %. Свойства: высокое удельное электрическое сопротивление (около 0,5 мкОм·м), минимальное значение температурного коэффициента электрического сопротивления, высокая термоЭДС в паре с медью железом, хромелем. Температурный коэффициент линейного расширения $14,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Плотность 8800–8900 кг/м³, температура плавления около 1260 °С. Хорошо поддается обработке. Идет на изготовление термопар, активного элемента тензодатчиков, реостатов и электронагревательных элементов с рабочей температурой до 400 °С –500 °С, измерительных приборов высокого класса точности.

Нихром – это сплавы, имеющие состав: никель Ni (55 %–78 %) + хром Cr (15 %–23 %) + марганец Mn (1,5 %) + железо Fe. Удельное сопротивление равно $1,0\text{--}1,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, плотность – 8200–8500 кг/м³, температура плавления – 1100 °С –1400 °С. Нихром обладает высокими рабочей температурой (до 1100 °С) и механической прочностью (предел прочности при растяжении 0,65–0,70 ГПа). Нихром используется в электронагревателях печей для всех отраслей промышленности, бытовых приборов и аппаратов теплового действия.

Фехраль – это сплавы состава: хром Cr (12 %–27 %) + алюминий Al (3,5 %–5,8 %) + кремний Si (~1 %) + марганец Mn (0,7 %) + железо Fe. Удельное сопротивление $\rho = 1,2\text{--}1,3$ мкОм·м. Плотность 7100–7300 кг/м³, температура плавления ~1450 °С. Фехраль обладает высокими рабочими температурами (до 1400 °С). Применяется для мощных электронагревательных устройств и промышленных печей, пуско-тормозных резисторов электровозов и моторвагонного подвижного состава. Недостаток: хрупкость достигается после первого (после изготовления) прогрева до 350 °С – 400 °С, пруток диаметром 4 мм ломается без усилия.

В табл. 12 приведены значения удельного сопротивления некоторых металлов.

Таблица 12

Удельное сопротивление некоторых металлов

Наименование материала	Значение удельного сопротивления $\rho \cdot 10^{-6}$, Ом·м
Алюминий	0,028
Вольфрам	0,055
Железо	0,098

Наименование материала	Значение удельного сопротивления $\rho \cdot 10^{-6}$, Ом·м
Золото	0,023
Константан	0,44–0,52
Латунь	0,025–0,06
Манганин	0,42–0,48
Медь	0,0175
Молибден	0,057
Никелин	0,39–0,45
Никель	0,100
Олово	0,115
Ртуть	0,958
Свинец	0,221
Серебро	0,016
Тантал	0,155
Фехраль	1,1–1,3
Хром	0,027
Цинк	0,059

4.6. Контактные материалы

Электрические контакты – это места соединений нескольких токоведущих элементов в электрической цепи с целью создания ее непрерывности. Контакты условно подразделяются на неподвижные и подвижные (разрывные и скользящие).

Кроме высокой проводимости (низких значений удельного сопротивления), материалы для контактов должны обладать отличными механическими свойствами, стойкостью к электрической эрозии и химической коррозии.

4.6.1. Материалы для неподвижных контактов

Неподвижные контакты могут быть неразъемные (цельнометаллические) – представляют собой постоянное соединение (сварка, пайка, клёпка); и разъемные – отличаются возможностью нечастого коммутирования (штепсельные, винтовые зажимы).

Материалами для цельнометаллических контактов служат медь, алюминий, цинк и сталь. В случае соединения пайкой выбирают припой в зависимости от материала проводов. Для разъемных зажимных контактов применяют покрытия: лужение, цинкование, кадмирование, серебрение.

4.6.2. Материалы для подвижных контактов

Подвижные разрывные контакты используются для частых коммутаций электрических цепей (в реле, рубильниках, выключателях, переключателях и т. д.). Материалы для разрывных контактов разделены на материалы для маломощных контактов (слаботочные) и материалы для мощных контактов (сильноточные).

Материалы для слаботочных разрывных контактов – тугоплавкие и благородные металлы и сплавы на их основе, например, платина–рутений (Pt–Ru), серебро–кадмий (Ag–Cd), серебро–магний–никель (Ag–Mg–Ni) и другие, также используют медь, сплавы и биметаллы на ее основе.

Материалы для сильноточных разрывных контактов – в основном, это композиционные материалы, представляющие собой смесь двух фаз, одна из которых обеспечивает высокую электро- и теплопроводность, другая – в виде тугоплавких включений – придает контактам стойкость к механическому износу, электрической эрозии и свариванию. К таким материалам относятся, например, композиции на основе графита (медь–графит, серебро–графит), на основе меди и серебра (серебро–оксид кадмия, серебро–оксид меди) и др. Применяют также тройные композиции: серебро–никель–графит, серебро–вольфрам–никель. Получают сильноточные разрывные контакты из композиционных материалов методом порошковой металлургии.

Подвижные скользящие контакты – это неразмыкаемые контакты, предназначенные для осуществления непрерывной коммутации электрического тока между подвижной и неподвижной частями электрических машин. Примером скользящих контактов являются пластины коллектора или контактные кольца и щетки в электрических машинах. Скользящие контакты выполняются щеточными, пальцевыми, торцевыми, розеточными, роликовыми и пружинящими. Материалы для скользящих контактов делят на металлические

и электротехнические угольные. Металлические материалы – это специальные сорта бронз: кадмиевые, бериллиевые и хромистые (БрКд1, БрБ2 и др.), латуни (например, ЛС59–1, ЛМц58–2). Электротехнические угольные контакты получают на основе углеродсодержащих материалов.

4.7. Углеродсодержащие проводниковые материалы

Наиболее используемые неметаллические проводники – материалы на основе углерода. Природный графит, нефтяной и пековый кокс, сажа, антрацит, древесный уголь – это аллотропные формы углерода, то есть различные простые вещества, состоящие только из углерода. Сажа – аморфный углерод. Графит имеет кристаллические решетки 2 типов гексагональная (α -графит) и ромбоэдрическая (β -графит). Из аллотропных форм углерода только алмаз диэлектрик. Каменный уголь – ископаемое, в котором содержится 75 %–92 % углерода, 2,5 %–5,7 % водорода, 1,5 %–15 % кислорода, 2 %–48 % др. летучих веществ, влаги 1 %–12 %. Антрацит может рассматриваться как переходная стадия между каменным углем и графитом.

Все углеродистые материалы (за исключением графита и сажи) для получения из них электроугольных изделий подвергают прокаливанию при температуре 1200 °С–1300 °С с целью удалить из них примеси – легколетучие вещества.

На основе электроугольных материалов производят скользящие контакты – щетки электрических машин марки Г (графитные), УГ (угольно-графитные), ЭГ (электрографитированные), МГ (медно-графитные).

Графитные щетки (марки Г–3 и Г–20) изготавливают из натурального графита без применения или с применением связующих. При применении связующих веществ (смолы) отпрессованные графитные щетки спекаются при температуре 1000 °С–1100 °С. Графитные щетки обладают мягкостью и при работе вызывают незначительный шум.

Угольно-графитные щетки имеют повышенную твердость и механическую прочность. Они обладают абразивностью, т. е. могут сами очищать окисные пленки на коллекторах и кольцах, подверженных загрязнению (тяговые электродвигатели и др.). Металлографитные щетки (марки М–1, М–3, М–6, М20, МГ6, МГС–5 и др.)

изготавливают из порошков графита и меди. В некоторые вводят еще порошки свинца (МГС5), олова и серебра. В щетках с большой допустимой плотностью тока содержание меди доходит до 80 %–90 %, что снижает величину удельного электрического сопротивления щеток. Электрографитированные щетки (марки ЭГ–2а, ЭГ4 и др.) изготавливают из порошков графита и других углеродистых материалов (кокс, сажа) с введением связующих. Они имеют высокую механическую прочность и низкие удельное электрическое сопротивление и абразивность. Хорошо переносят толчкообразное изменение нагрузки и могут работать при больших скоростях – 40–60 м/с.

Кроме контактов, из углеродных материалов производят электроды для электрических печей, контактные детали, высокоомные угольные сопротивления и некоторые другие изделия.

Для изготовления нагревателей используют чистый графит и карбиды. Например, на основе карбида кремния изготавливают нагреватели «силит» и «глобар» (спекают смесь $\text{SiC} + \text{SiO}_2$) с рабочей температурой ~ 1450 °С и сроком службы до 2000 часов.

4.7.1. Новые углеродные материалы. Фуллерены

Фуллерены открыты в 1985 г. В 1996 г. году группе американских ученых (Крото, Смолли и Кёрлу) за это открытие была присуждена Нобелевская премия по химии. **Фуллерен** – аллотропная форма углерода, молекула представляет собой выпуклый замкнутый многогранник (усеченный икосаэдр), составленный из четного числа трехкоординированных атомов углерода (рис. 70).

Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.

Рис. 70. Молекула фуллерена

Молекула имеет массу 720 а.е.м. Молекулярный кристалл фуллерена – полупроводник с шириной запрещенной зоны ~1,5 эВ. Но кристаллы C_{60} , легированные атомами щелочных металлов, обладают металлической проводимостью и переходят в сверхпроводящее состояние при 30 К и выше.

Уже началось использование фуллеренов в качестве нового материала для традиционных приложений в электронике: диод, транзистор, фоторезистор, фотоэлемент и т. п. Их преимуществом, по сравнению с традиционным кремнием, является малое время фото-

отклика (наносекунды). Фуллерены можно использовать в качестве основы для производства аккумуляторных батарей (принцип действия основан на реакции присоединения водорода). Малые добавки фуллереновой сажи улучшают антифрикционные и противоизносные свойства ПТФЭ (политетрафторэтилен). Это далеко не все о применении фуллеренов.

4.7.2. Графен

Графеном называют двумерный углерод – это аллотропная форма углерода, представляющая собой плоскость толщиной в один атом, из «сетки» атомов углерода, уложенных в ячейки гексагональной (шестиугольной) формы. Структура графенового слоя представлена на рис. 71.

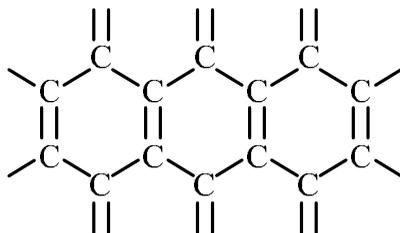


Рис. 71. Структура графена

Графен признан самым тонким, легким и прочным (в 200 раз прочнее стали) из известных материалов, а также лучшим проводником тепла и электричества на сегодняшний день. Графен практически полностью прозрачен.

Графен уже используется в электротехнике, в частности, в производстве графен-полимерного аккумулятора. Удельная емкость литий-ионного аккумулятора, применяемого в настоящее время, составляет 200 Вт/ч на 1 кг веса. Графеновый аккумулятор такого же веса имеет удельную емкость 1000 Вт/ч. Графеновая аккумуляторная батарея установленная, например, в Tesla Model S, способна увеличить пробег электромобиля с 334 км до 1013 км на одной подзарядке. Кроме всего прочего, такие батареи можно зарядить менее чем за 10 минут.

Потенциальные применения графена включают в себя более легкие и прочные строительные материалы, отделочные материалы, эффективные солнечные панели, солнечные аэрогели и ультра-

эффективные батареи и т. д.

Два слоя графена по прочности равны алмазу. Материал, получившийся из двух слоев графена, назвали диаменом. Он отличается неповторимой гибкостью и легкостью, в обычном состоянии напоминает фольгу. В будущем это открытие может дать толчок, например, к созданию бронезилетов – незаметных тонких и легких и многого другого.

4.7.3. Углеродные нанотрубки

Это аллотропная модификация углерода, представляющая собой одну или несколько свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов). Это полая цилиндрическая структура диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров и длиной несколько микрометров, иногда и до нескольких сантиметров, заканчивающаяся обычно полусферической головкой (рис. 72).

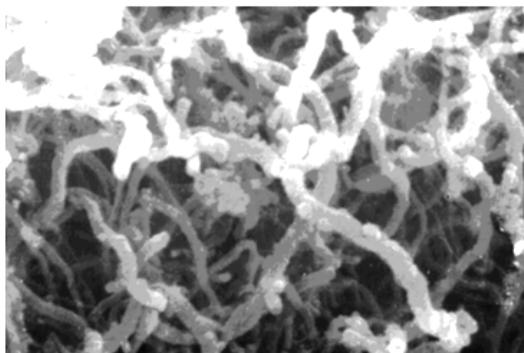


Рис. 72. Электронно-микроскопический снимок многослойных углеродных нанотрубок, увеличение 20000 раз

Тип проводимости одностенных нанотрубок зависит от группы симметрии, к которой принадлежит конкретная нанотрубка. Нанотрубка может быть или полуметаллом, или полупроводником.

Нанотрубки нашли применение в микроэлектронике: в производстве транзисторов, нанопроводов, прозрачных проводящих поверхностей, топливных элементов. Дополнительное достоинство углеродных нанотрубок – их механические свойства: нанотрубки, теоретически могут держать огромный вес до тонны на квадратный миллиметр. Однако получить достаточно длинные углеродные трубки с толщиной стенок

в один атом не удавалось до сих пор, из-за чего приходится использовать нити, сплетенные из относительно коротких нанотрубок, что уменьшает итоговую прочность. Применение постоянно расширяется.

4.8. Сверхпроводники и криопроводники

На крио- и сверхпроводники материалы делят в области сверхнизких температур (рис. 73).

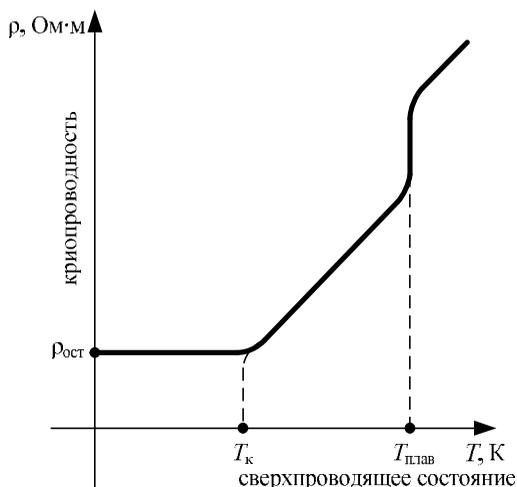


Рис. 73. График изменения удельного сопротивления различных материалов в области криотемператур

Сверхпроводимость – физическое явление, наблюдаемое у веществ при охлаждении их ниже определенной критической температуры T_k , и проявляющееся в:

- 1) обращении в нуль электрического сопротивления;
- 2) выталкивании магнитного поля из объема материала (эффект Мейснера).

Явление сверхпроводимости открыто в 1911 г. Х. Каммерлинг–Оннесом. Изучая температурный ход электросопротивления ртути Hg, он обнаружил, что при температуре ниже 4,22 К ртуть практически теряет сопротивление. Если создать ток в замкнутом контуре из сверхпроводников, то этот ток продолжает циркулировать и без источника ЭДС. До середины 80-х годов XX века сверхпроводимости

мость была обнаружена у металлов, сплавов, некоторых полупроводников. Но температуры переходов в сверхпроводящее состояние были близки к абсолютному нулю, что сдерживало использование этого явления на практике. Температуры перехода в сверхпроводящее состояние некоторых металлов приведены в табл. 13.

Таблица 13

Температуры перехода в сверхпроводящее состояние некоторых металлов

Наименование металла	Значение температуры T_k , К
Алюминий	1,19
Ванадий	5,3
Вольфрам	0,012
Индий	3,40
Кадмий	0,55
Ниобий	9,2
Олово	3,72
Свинец	7,2
Тантал	4,39
Таллий	2,39
Цинк	0,9

В 1986–88 гг. были получены **высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП)**. Важнейшей чертой ВТСП можно назвать то, что сверхпроводимость была обнаружена не у металлов, а в оксидной керамике, обычно имеющей диэлектрические или полупроводниковые свойства.

Первый материал ВТСП – $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ($T_k = 35$ К) получен в 1986 г. сотрудниками научного подразделения корпорации ИВМ. За это открытие в 1987 г. им была присуждена Нобелевская премия. В 1987 г. получен сверхпроводник $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (или 123), с температурой перехода в сверхпроводящее состояние $T_k = 93$ К, то есть выше точки кипения жидкого азота. В 1988 получен $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ($T_k = 125$ К).

В криоэлектронике ВТСП применяются уже с 1987 г. (магнитные экраны, различные тонкопленочные приемники

СВЧ-излучения, работающие при 77 К). Сверхпроводящие магниты: с помощью обычного электромагнита можно создавать поля до 2 Тл, причем медные провода выдерживают плотность тока до 400 А/см^2 , а сверхпроводники выдерживают плотность тока до 4000 А/см^2 при температуре жидкого азота (77 К) в поле 1 Тл. В отсутствие магнитного поля плотность тока может достигать 17000 А/см^2 .

ВТСП материалы имеют достаточно широкие перспективы использования в энергетике. Разработаны основы процесса создания одножильных и многожильных проводников на основе висмутовой системы (Bi-2212 и Bi-2223), а также массивных изделий на основе ВТСП керамики Y–Ba–Cu–O.

Сверхпроводящие магниты могут повысить КПД генераторов большой мощности до 99,5 %, ежегодная экономия топлива составит 1 %. Возможно создание сверхпроводниковых линий электропередачи, но экономически рентабельными сверхпроводниковые линии электропередачи могут стать только при передаче по ним большого количества энергии.

Возможно применение также для аккумулирования электроэнергии. Сверхпроводящие накопители энергии с охлаждением жидким азотом обошлись бы на 3 % дешевле, чем обычные, а общие капитальные затраты уменьшаются еще на 5 %.

Возможно создание поездов на магнитной подушке. Стоимость сооружения пути длиной 500 км обойдется в 1,5–4,5 млрд долл. Стоимость самих поездов составит не более 10 % от общей суммы затрат, а система охлаждения всего 1 %.

На ВТСП может быть создан суперкомпьютер с быстродействием в 1000 раз больше, чем у компьютеров, проектируемых в настоящее время. Время переключения на переходах Джозефсона (устройство в виде двух сверхпроводников, разделенных тонким слоем диэлектрика) составит не более 10^{-14} с для материала с $T_c=100 \text{ К}$.

Электронные устройства СКВИД (сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор) – используются для измерения падения напряжения до 10^{-18} В , токов 10^{-18} А (несколько электронов в секунду) и магнитных полей меньше 10^{-14} Тл . Аналогов подобной чувствительности нет. Новые сверхпроводники позволяют регулировать частоты до 10^{12} Гц (близко к квантовому пределу). Чувствительность обычных приборов не превышает 10^{10} Гц . Применение СКВИДов – магнитоэнцефалография, элементы памяти. СКВИДы используются физиками для исследования кварков,

магнитных монополей, гравитонов, геологами для поисков нефти, воды, минералов, разрабатываются детекторы для обнаружения подводных лодок.

Криопроводники – это материалы, удельное сопротивление которых достигает малых (но конечных) значений при криогенных температурах, т. е. частный случай нормальной электропроводности металлов. Сверхпроводящее состояние в этих материалах не наблюдается. Наиболее широко в качестве криопроводников применяются чистая медь и алюминий. При температуре жидкого гелия у алюминия А999 удельное электрическое сопротивление порядка 10^{-12} Ом·м. Минимальным сопротивлением при температуре жидкого азота обладает бериллий. Применяются криопроводники в основном для изготовления жил кабелей, работающих при температурах жидкого водорода ($-252,6$ °С), неона ($-245,7$ °С) и азота ($-195,6$ °С).

5. ПОЛУПРОВОДНИКИ

Полупроводники – это материалы с управляемой проводимостью.

Полупроводник – это материал, основным свойством которого является сильная зависимость его электропроводности от воздействия внешних факторов.

5.1. Механизм проводимости полупроводников

Полупроводникам присуща ковалентная химическая связь посредством образования общих электронных пар, образованных валентными электронами соседних атомов (рис. 74).

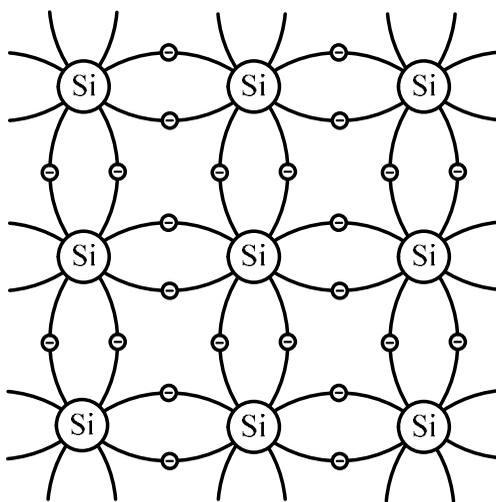


Рис. 74. Ковалентная химическая связь в кремнии, осуществляемая посредством общих электронных пар между соседними атомами

При низких температурах и в отсутствие освещенности у идеальных полупроводников все валентные электроны участвуют в образовании химической связи (в образовании электронных пар соседних атомов) и свободных носителей заряда (электронов) нет. То есть, полупроводник в таких условиях представляет собой диэлектрик. В представлении зонной теории его зона валентности заполнена, а зона проводимости – пустая.

Для того чтобы в полупроводнике появились свободные носители заряда, надо разорвать ковалентную связь, то есть сообщить электрону дополнительную энергию, равную энергии разрыва ковалентной связи. Или, в представлении зонной теории, электрон должен перейти из зоны валентности в зону проводимости, т. е. электрону надо сообщить дополнительную энергию, равную энергии запрещенной зоны.

Полупроводник, в котором электропроводность возникает за счет разрыва собственных ковалентных связей, называют **собственным**. А проводимость полупроводников, обусловленная разрывом собственных ковалентных связей, называется собственной проводимостью (рис. 75).

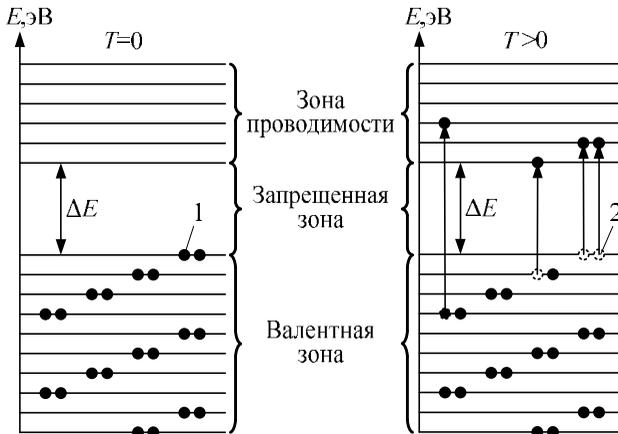


Рис. 75. Схема возникновения собственной проводимости полупроводника при T , отличной от 0 К:
1 – электрон; 2 – дырка

Вакантному месту в зоне валентности (отсутствующему электрону в паре, образующей ковалентную связь), приписывается положительный заряд, и оно рассматривается как фиктивная положительно заряженная частица – дырка.

Дырка – фиктивная положительно заряженная частица. Ее заряд по модулю равен заряду электрона.

Освободившиеся электроны, покинув зону валентности, могут двигаться в зоне проводимости. Дырки тоже могут двигаться, но в представлении зонной теории – только в зоне валентности переходить с уровня на уровень, то есть они имеют значительно меньшую подвижность, чем электроны в зоне проводимости. Движение дырок создает механизм дырочной проводимости полупроводника.

Таким образом, носителями электрического заряда в полупроводниках являются **электроны и дырки**.

Одновременно с образованием пар «электрон–дырка», часть электронов в полупроводнике из зоны проводимости спонтанно переходит обратно в валентную зону, излучая кванты энергии. Этот процесс называется рекомбинацией. При постоянной температуре в полупроводнике устанавливается динамическое равновесие, определяющее концентрацию свободных электронов и дырок (при данной температуре).

Полупроводники могут обладать также проводимостью, обусловленной наличием в них примесей – **примесной проводимостью**.

Примеси в полупроводнике – это чужеродные атомы, или собственные атомы, избыточные по стехиометрическому составу, или дефекты кристаллической решетки в виде пустых узлов (вакансий), атомов или ионов в междоузлиях; или дислокации – нарушения периодичности структуры кристалла полупроводника и т. д.

Примеси также искусственно вводят в полупроводники с целью придания им нужных свойств.

Процесс контролируемого введения примеси называется **легированием**.

Именно легированные полупроводники широко применяются в электротехнике.

В зависимости от типа примеси, различают примесные полупроводники с избытком электронов или избыточным содержанием дырок. Тип проводимости легированного полупроводника зависит от валентности примеси.

Когда полупроводник легируют примесью с **более высокой валентностью**, чем его собственная, то кроме электронов, задействованных в образовании общих электронных пар с атомами полупроводника, возникает излишек электронов. Такие примеси, создающие в полупроводнике излишек электронов, называются **донорами**. А полупроводник, в котором концентрация электронов больше, чем дырок, называют полупроводник ***n*-типа** (negative).

Например, в кристалл с четырехвалентными атомами германия Ge введены пятивалентные атомы мышьяка As (рис. 76).

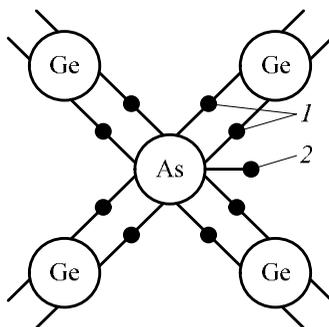


Рис. 76. Введение донорной примеси As в полупроводник Ge:
1 – общая электронная пара; 2 – неспаренный электрон

Один электрон атома As остается не задействованным в образовании электронной пары, он относительно свободен.

Если в примесном полупроводнике концентрация дырок больше, чем электронов, – это полупроводник ***p*-типа** (positive). Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, называют **акцепторами**. Дырочная проводимость (*p*-тип) возникает в полупроводнике, когда его легируют примесью с **валентностью ниже**, чем его собственная. Например, в четырехвалентный кристалл германия Ge вводятся трехвалентные атомы индия In (рис. 77).

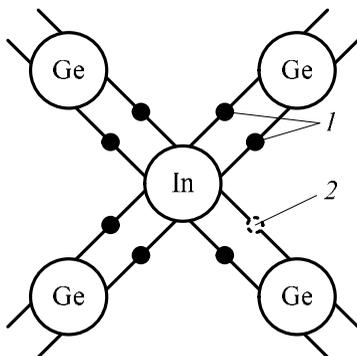


Рис. 77. Введение акцепторной примеси In в полупроводник Ge:
1 – общая электронная пара; 2 – дырка (отсутствие электрона в паре)

Собственная проводимость идеального полупроводника не относится ни к типу *n*, ни к типу *p*. На практике ее не существует, т. к. нет идеально чистых материалов. Ближе всего к этому понятию подходят очищенные монокристаллические полупроводники.

На рис. 78 представлена энергетическая диаграмма примесного полупроводника в представлении зонной теории.

В энергетическом спектре электронов примесного полупроводника в представлении зонной теории (рис. 78, *a*) в запрещенной зоне появляется дополнительный уровень – ловушка. В зависимости от типа примеси, ловушка может быть либо донорной – уровень донорной примеси располагается вблизи зоны проводимости (рис. 78, *б*), либо акцепторной – уровень акцепторной примеси располагается вблизи зоны валентности (рис. 78, *в*).

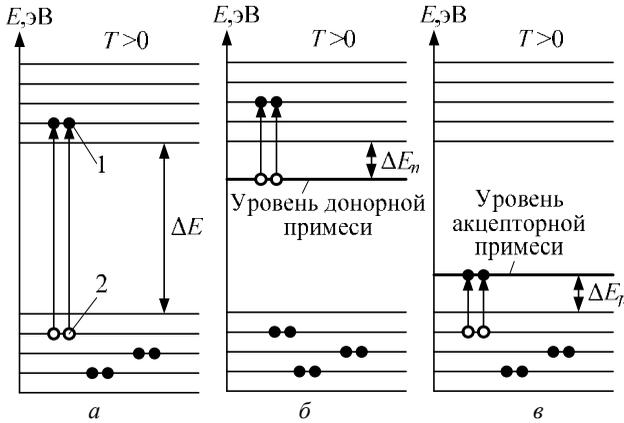


Рис. 78. Энергетическая диаграмма примесного полупроводника в представлении зонной теории:
 а – собственный полупроводник; б – легированный полупроводник n -типа;
 в – полупроводник p -типа

Энергия, необходимая для отрыва электрона от атома примеси с образованием иона и освобождением электрона (в зонном представлении – расстояние от уровня ловушки до зоны проводимости) называется **энергией ионизации** (активации) примеси (ΔE_n).

Таким образом, классификацию полупроводников по типу проводимости можно обобщить в виде схемы (рис. 79).

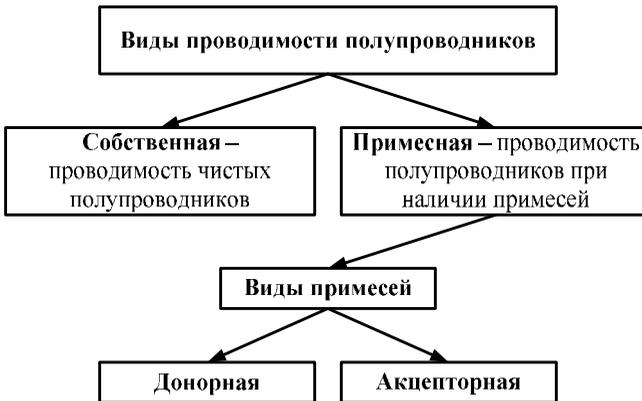


Рис. 79. Классификация полупроводников по типу проводимости

В области высоких температур преобладает собственная проводимость полупроводника, в области низких температур – примесная проводимость.

Электроны двигаются в зоне проводимости, дырки имеют меньшие энергии и движутся в зоне валентности (табл. 14).

Таблица 14

Подвижность электронов и дырок в некоторых полупроводниках

Наименование полупроводника	Подвижность электронов μ_n , м ² /(В·с)	Подвижность дырок μ_p , м ² /(В·с)
Ge	0,380	0,180
Si	0,135	0,050
GaAs	0,820	0,040
InAs	3,000	0,020
InSb	7,000	0,400

2. Концентрация свободных носителей n_e и n_p .

Концентрацией называется число зарядов в единичном объеме (например, в 1 см³).

Чем больше доля легирующей донорной примеси в составе полупроводника, тем больше в нем концентрация электронов, а чем больше доля легирующей акцепторной примеси, тем больше концентрация дырок в полупроводнике.

Для собственного полупроводника концентрация носителей n определяется шириной запрещенной зоны и значением температуры по уравнению Больцмана, м⁻³:

$$n = A \times \exp\left(\frac{-W_0}{2kT}\right), \quad (52)$$

где W_0 – ширина запрещенной зоны, эВ;

k – постоянная Больцмана, Дж/К;

T – термодинамическая температура, К;

A – константа, зависящая от материала и температуры.

При $0 < kT < W_0$ возможен переброс электрона через запрещенную зону.

Для примесных полупроводников добавляется составляющая концентрации носителей, вызванная ионизацией примесей:

$$n = A \times \exp\left(\frac{-W_n}{2kT}\right), \quad (53)$$

где W_n – энергия активации примеси, эВ.

Невырожденный полупроводник – полупроводник, в котором концентрация свободных носителей настолько мала, что силами взаимодействия между ними можно пренебречь.

На практике используются невырожденные полупроводники.

Вырожденным полупроводником называется такой полупроводник, в котором концентрация носителей заряда превышает определенное значение. Это значение для электронов при комнатной температуре $\sim 10^{25} \text{ м}^{-3}$. Такая проводимость полупроводника становится подобной проводимости проводника.

Полупроводник может перейти в вырожденное состояние, например, при достаточном повышении температуры.

3. Удельная проводимость и удельное сопротивление.

В удельную проводимость полупроводника вносят вклад носители двух типов – электроны и дырки, См/м:

$$g = e(n_i m_n + p_i m_p), \quad (54)$$

где e – заряд электрона, Кл;

n_i, p_i – концентрация электронов и дырок соответственно, м^{-3} .

Первое слагаемое – электронная проводимость, второе слагаемое – дырочная проводимость.

4. Температурные коэффициенты удельного сопротивления α_p и удельной проводимости α_n .

Сопротивление полупроводников с ростом температуры падает, а проводимость растет, следовательно, температурный коэффициент удельного сопротивления полупроводников отрицательный (в отличие от металла).

Зависимость удельного сопротивления полупроводника от температуры представлена на рис. 81.

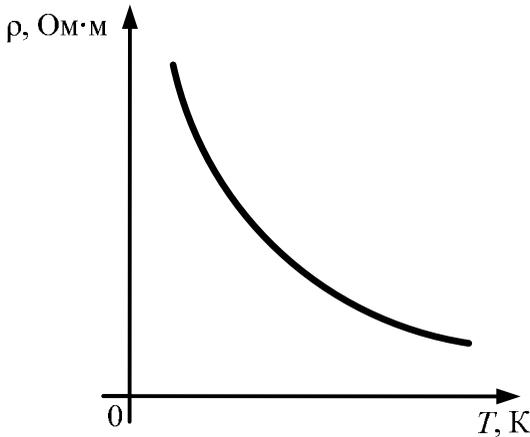


Рис. 81. Зависимость удельного сопротивления полупроводника ρ от температуры T

5. Ширина запрещенной зоны W_0 .

Ширина запрещенной зоны не является постоянной. Опытным путем было обнаружено линейное уменьшение ширины запрещенной зоны с увеличением температуры, эВ:

$$W_0 = 2k \frac{\ln g_1 - \ln g_2}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}, \quad (55)$$

где g_1 , g_2 – удельная проводимость при температурах T_1 и T_2 соответственно, См/м.

Для вычисления ширины запрещенной зоны W_0 достаточно определить два значения удельной проводимости g_1 , g_2 при термодинамических температурах T_1 , T_2 из области, где гарантировано преобладание собственной проводимости полупроводника (высокотемпературной области).

6. Энергия ионизации (активации) примеси W_n .

Энергия ионизации W_n вычисляется по той же формуле, что и ширина запрещенной зоны W_0 . Отличие в том, что при этом определяются два значения удельной электрической проводимости из

интервала низких температур, где заведомо преобладает примесная электропроводность.

7. Коэффициенты диффузии электронов и дырок, диффузионная длина.

Диффузия носителей заряда – их движение, возникающее вследствие различной концентрации носителей по объему полупроводника (из-за наличия градиента концентрации). Со временем происходит выравнивание концентрации носителей по полупроводнику. При диффузии в полупроводнике возникает диффузионный ток, плотность которого определяется по формуле (аналогично для электронов и дырок):

$$j_{n\text{диф}} = eD_n \frac{dn}{dx}, \quad (56)$$

$$j_{p\text{диф}} = -eD_p \frac{dp}{dx}, \quad (57)$$

где $j_{n\text{диф}}$, $j_{p\text{диф}}$ – плотность тока диффузии электронов и дырок соответственно, А/м²;

D_n , D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок соответственно;

dn/dx , dp/dx – градиенты концентраций электронов и дырок.

В процессе диффузии, за время до рекомбинации, свободный носитель проходит в полупроводнике некоторый путь. Длина этого пути называется диффузионной длиной.

5.3. Влияние внешних факторов на собственную электропроводность полупроводников

На собственную электропроводность полупроводников оказывают влияние следующие факторы:

1. Температура.

Подвижность носителей заряда μ слабо зависит от температуры. На характер зависимости электропроводности полупроводника от температуры основное влияние оказывает концентрация носителей заряда.

Если за счет внешней энергии повысить температуру полупроводника, то некоторые слабо связанные электроны атомов примесей могут перейти в зону проводимости. Им для перехода в зону проводимости нужна энергия намного меньше, чем энергия активации электронов самого полупроводника.

С ростом температуры концентрация носителей заряда увеличивается и, следовательно, проводимость полупроводника возрастает.

2. Освещенность (электромагнитное излучение).

Поглощение света приводит к разрыву некоторых ковалентных связей и появлению в полупроводнике дополнительных неравновесных носителей заряда, а, значит, растет концентрация носителей и возрастает электропроводность полупроводника.

3. Механические деформации.

При деформации меняются межатомные расстояния в твердом полупроводнике, следовательно, меняются подвижность и концентрация носителей, а, значит, меняется электрическая проводимость. Изменение удельного сопротивления под действием односторонней деформации (растяжение или сжатие) называется тензорезистивным эффектом. Для его оценки на практике пользуются понятием тензочувствительности. Коэффициент тензочувствительности d_p – это отношение относительного изменения удельного сопротивления полупроводника к относительной деформации в данном направлении:

$$d_p = \frac{\frac{Dr}{r}}{\frac{Dl}{l}}, \quad (58)$$

где $\frac{Dr}{r}$ – относительное изменение удельного сопротивления при деформации в данном направлении;

$\frac{Dl}{l}$ – относительное удлинение при деформации в данном направлении.

4. Электрическое поле.

Если приложить внешнее электрическое поле напряженностью E , то на хаотическое тепловое движение носителей заряда в полупроводнике накладывается направленное движение, т. е. в полупроводнике возникает электрический ток. График зависимости проводимости полупроводника от напряженности внешнего электрического поля представлен на рис. 82.

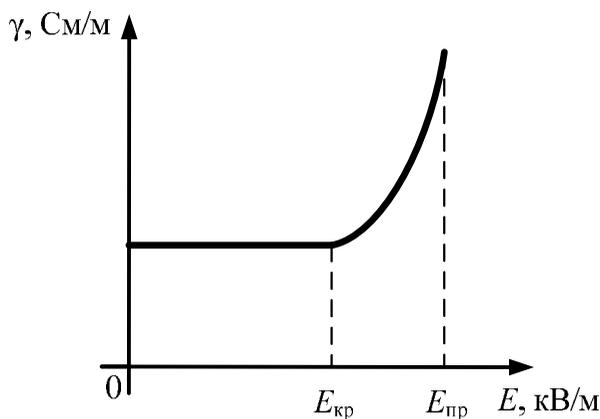


Рис. 82. График зависимости проводимости полупроводника γ от напряженности внешнего электрического поля E

Вначале проводимость γ постоянна, с возрастанием напряженности поля плотность тока будет линейно возрастать, но лишь до тех пор, пока напряженность поля не превысит критического значения $E_{кр}$. При дальнейшем увеличении напряженности проводимость полупроводника начинает возрастать. При $E_{пр}$ происходит пробой полупроводника.

5.4. Электронно-дырочный переход

Основным элементом структуры большинства полупроводниковых приборов является электрический переход между двумя областями полупроводника с различными типами электропроводности p - n (рис. 83).

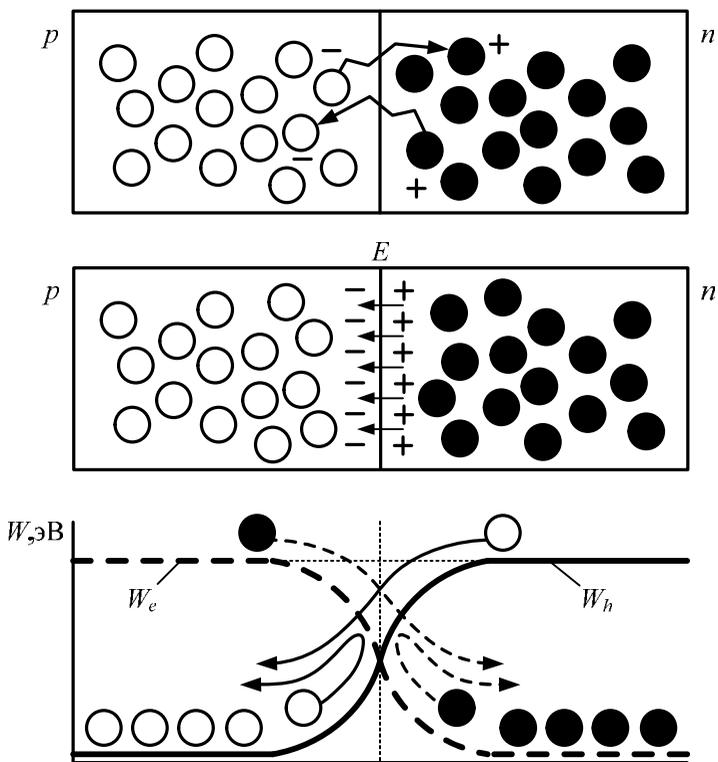


Рис. 83. Схема электрического перехода между двумя областями полупроводника с различными типами электропроводности (p - n)

Обе области полупроводника электрически нейтральны, поскольку, как и сам материал полупроводника, примеси также в целом электрически нейтральны. Отличия этих областей полупроводника в том, что левая содержит свободно перемещающиеся дырки, а правая свободно перемещающиеся электроны.

В результате хаотического теплового движения одна из дырок из области p -типа может попасть в область n -типа, где быстро рекомбинирует с одним из электронов. Аналогично, в результате теплового движения один из электронов из правой области может попасть в левую, где быстро рекомбинирует с одной из дырок. В правой области появится избыточный положительный заряд, а в левой – избыточный отрицательный заряд. Появление этих зарядов

приведет к появлению электрического поля на границе. Это поле будет отталкивать дырки p -области от границы раздела полупроводников влево, а электроны n -области – вправо. В результате, дырка для перехода из p -области в n -область должна «забраться» на потенциальный барьер высоты W . На аналогичный порог должен «забраться» электрон для перехода из n -области в p -область. То есть движение зарядов прекратится.

При наложении электрического поля, такой p - n переход будет либо пропускать, либо не пропускать электрический ток в зависимости от направления приложенного поля.

5.5. Применение полупроводников. Простейшие полупроводниковые компоненты

На основе полупроводниковых материалов получают простейшие устройства, именно они применяются в электротехнике. Полупроводниковыми компонентами называются простейшие устройства, состоящие из нескольких полупроводников, имеющих разные свойства.

5.5.1. Транзистор

Транзистор (англ. transistor), полупроводниковый триод – радиоэлектронный компонент из полупроводникового материала, обычно с тремя выводами (эмиттер, коллектор и база), способный от небольшого входного сигнала управлять значительным током в выходной цепи, что позволяет использовать его для усиления, генерирования, коммутации и преобразования электрических сигналов. Транзисторы по структуре, принципу действия и параметрам делятся на два класса – биполярные и полевые (униполярные).

В биполярном транзисторе используются полупроводники с обоими типами проводимости, он работает за счет взаимодействия двух близко расположенных на кристалле p - n переходов и управляется изменением тока через база–эмиттерный переход, при этом вывод эмиттера всегда является общим для управляющего и выходного токов (рис. 84).

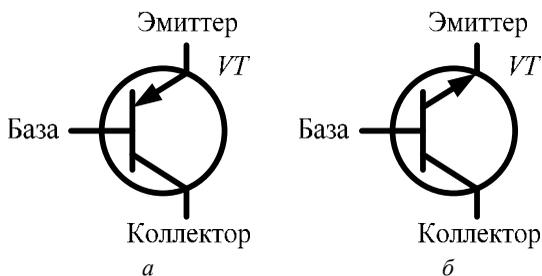


Рис. 84. Биполярный транзистор:
а – *p-n-p* транзистор; *б* – *n-p-n* транзистор

Простое изложение принципа работы биполярного транзистора следующее: подключение к зажимам одноименного напряжения к эмиттеру и базе (*p* подсоединяется к плюсу, а *n* – к минусу) приводит к появлению тока между эмиттером и базой. В базе образуются носители зарядов. Чем выше напряжение, тем больше количество носителей зарядов появляется в базе. Ток, подаваемый на базу, называется управляющим. Если к коллектору подключить обратное напряжение (*n*-коллектор подключается к плюсу, *p*-коллектор – к минусу), то между эмиттером и коллектором появится разница потенциалов, и между ними потечет ток. Чем больше носителей заряда скапливается в базе, тем сильнее будет ток между коллектором и эмиттером. При увеличении управляющего напряжения на базе растет ток «эмиттер–коллектор». Причем несущественный рост напряжения приводит к значительному усилению тока «эмиттер–коллектор». Этот принцип используется при производстве усилителей.

Если к эмиттеру и базе подключают напряжение, противоположное по знаку, ток прекращается, и транзистор переходит в закрытое состояние. Кратко принцип работы полупроводникового транзистора можно изложить так: при подключении к зажимам эмиттера и базы напряжения одноименного заряда прибор переходит в открытое состояние, при подключении к этим выводам обратных зарядов транзистор закрывается.

В полевом транзисторе используется полупроводник только одного типа проводимости, расположенный в виде тонкого канала, на который воздействует электрическое поле изолированного от канала затвора, управление осуществляется изменением напряжения между затвором и истоком. Полевой транзистор, в отличие от биполярного, управляется напряжением, а не током.

В настоящее время транзистор является основой схемотехники подавляющего большинства электронных устройств и интегральных микросхем.

5.5.2. Диод

Это двухэлектродный электронный компонент, обладающий различной электрической проводимостью в зависимости от полярности приложенного к нему напряжения.

Работа диода основана на принципе действия $p-n$ перехода. Конструктивно, полупроводниковый диод состоит из небольшой пластинки полупроводниковых материалов (кремния или германия), одна сторона (часть пластинки) которой обладает электропроводностью p -типа, то есть принимает электроны (содержит искусственно созданный недостаток электронов – «дырочная» сторона пластинки), другая сторона обладает электропроводностью n -типа, то есть отдает электроны (содержит избыток электронов – «электронная» сторона).

5.5.3. Терморезистор

Терморезистор изобретен в 1930 году и широко применяется в технике в настоящее время. Терморезистором называется простейший полупроводниковый компонент с температурозависимым электрическим сопротивлением.

Основные параметры, которыми характеризуют терморезисторы:

1. Сопротивление при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Температурный коэффициент сопротивления при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Время тепловой инерции – это время, за которое сопротивление термистора изменяется до определенной величины.
4. Максимальная температура эксплуатации.
5. Теплоемкость.

По характеру зависимости сопротивления полупроводникового элемента от температуры терморезисторы разделяют на две большие группы – позисторы и термисторы (рис. 85).

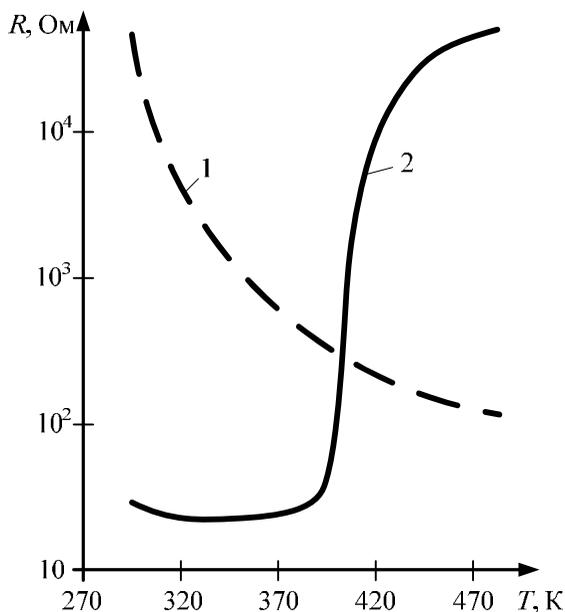


Рис. 85. График зависимости сопротивления терморезисторов от температуры: 1 – термистора; 2 – позистора

Термистор обладает отрицательным температурным коэффициентом сопротивления ($\text{ТКС} < 0$). **Позистор** обладает положительным температурным коэффициентом сопротивления ($\text{ТКС} > 0$).

5.5.4. Фоторезистор

Электроны в полупроводниках могут переходить из зоны валентности в зону проводимости не только при повышении температуры, но и при поглощении фотона. Это явление называют **внутренним фотоэффектом**.

Существуют полупроводники, у которых энергия этого перехода составляет десятые доли электронвольта, то есть на сопротивление таких полупроводников оказывает влияние не только видимый свет, но даже инфракрасное излучение.

Полупроводниковый компонент, работа которого основывается на изменении сопротивления под воздействием освещенности, называют **фоторезистором (фотосопротивлением)**.

Основной характеристикой фотосопротивлений является зависимость фототока (I) от величины светового потока (Φ). Фотосопротивления инерционны, то есть фототок нарастает до максимума не мгновенно. Спад фототока при прекращении освещения также происходит не мгновенно, а через некоторое время.

Фотосопротивления используются в автоматике, сортировке изделий по окраске или размерам.

Термо- и фоторезисторы не создают электрический ток, а лишь меняют свое сопротивление току, идущему через них. Под влиянием тепла или света увеличивается число свободных носителей заряда (электронов и дырок), в результате чего возрастает электропроводность (уменьшается сопротивление).

5.5.5. Термоэлемент и фотоэлемент

Эти компоненты способны создавать электрический ток, то есть быть источниками электроэнергии.

Полупроводниковый **фотоэлемент** состоит из кристалла n -типа, в котором легированием создана p -область (рис. 86).

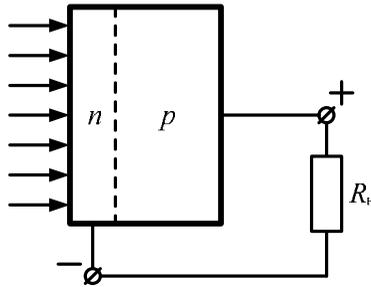


Рис. 86. Схема полупроводникового фотоэлемента

На концах p - n -перехода самопроизвольно возникают разноименные заряды, следовательно, его можно рассматривать как источник кратковременного тока. Если же к p - n -переходу постоянно подводить световую энергию (то есть вызывать образование все новых и новых пар электрон-дырка), получится постоянно действующий источник с напряжением около 1 В.

Полупроводниковый **термоэлемент** состоит из двух полупроводников p и n , которые соединены металлической пластинкой (рис. 87).

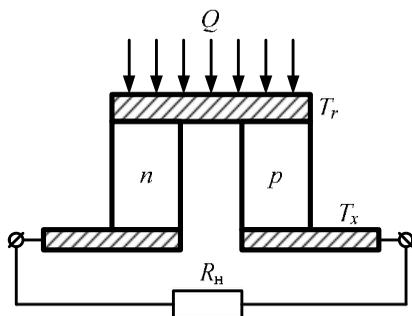


Рис. 87. Схема термоэлемента

Полупроводники в месте соединения нагревают, а противоположные концы при этом охлаждают (воздухом или иным способом). Свободные концы являются полюсами термоэлемента, к ним присоединяют нагрузку. В более холодных частях полупроводников уменьшается количество свободных электронов и дырок, так как при более низкой температуре «примесные» электроны реже покидают атомы, значит, и реже образуются дырки. Под действием теплоты в верхних концах полупроводников, наоборот, увеличивается количество свободных электронов и дырок. Они диффундируют в нижние части своих кристаллов, заряжая их разноименно.

Наличие двух полупроводников не обязательно, так как они не касаются друг друга. Полупроводниковую пару используют, чтобы создать встречные потоки электронов и дырок, то есть более высокое напряжение. Наряду с этим, теплота, получаемая от источника энергии, используется полнее, что ведет и к значительному росту КПД термоэлемента.

Из термоэлементов создают термоэлектрические батареи. КПД термобатарей около 6 %–7 %. Если через термоэлемент пропустить ток, то один спай нагревается, другой охлаждается (эффект Пельтье). Это явление используют в холодильниках, кондиционерах и др. С помощью полупроводниковых термоэлементов можно достичь охлаждения более чем на 80 °С.

5.5.6. Тензорезистор

Тензорезистор – резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации. Их работа основана на тензоэффекте. Это эффект изменения проводимости под действием механических напряжений.

Изменение проводимости в полупроводниках под действием механических напряжений объясняется тем, что при деформации меняется расстояние между атомами кристаллической решетки, что меняет концентрацию свободных электронов (и дырок) и, следовательно, меняется проводимость полупроводника.

Чувствительность тензорезистора характеризуется безразмерным коэффициентом тензочувствительности d_p (см. формулу 58). Есть и тензорезисторы на базе металлов, но для них этот коэффициент составляет порядка 1,5, а для полупроводников он в десятки раз больше.

Другим важным достоинством полупроводниковых тензодатчиков являются их гораздо меньшие габариты, что позволяет поместить этот датчик на малых площадях деталей, в которых необходимо измерять механические напряжения.

К недостаткам следует отнести зависимость сопротивления тензодатчика от температуры, поэтому требуется обязательная температурная компенсация таких датчиков.

Тензорезисторы используются для измерения деформации в твердых телах. На их основе строят датчики веса, давления, силы, перемещения, момента, ускорения, вибрации, натяжения, крутящего момента, остаточных напряжений в механических конструкциях и деталях машин после их обработки и т. д.

5.5.7. Варистор

Варистор – это полупроводниковый прибор с симметричной нелинейной вольтамперной характеристикой (рис. 88).

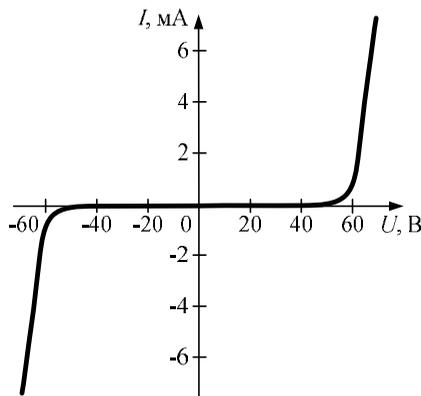


Рис. 88. Вольтамперная характеристика варистора

Проводимость варисторов существенно растет с увеличением напряженности электрического поля. В нормальном состоянии ток через варистор предельно мал, его называют **током утечки**. Принцип работы варистора в защитных цепях: варистор работает, как диэлектрический компонент с определенной электрической емкостью, практически не пропускает электрический ток. Но при определенном напряжении (на рис. 88 это ± 60 В) он начинает ток пропускать. Это позволяет использовать варисторы в качестве ограничителей перенапряжений. Величина критического напряжения зависит от природы полупроводника, температуры, концентрации примесей.

Достоинства варисторов: достаточно большое быстродействие; безынерционное отслеживание перепадов напряжений; выпускаются на широкий диапазон рабочих напряжений (от 12 до 1800 В); имеют длительный срок эксплуатации, низкую стоимость.

Варисторы широко применяются в промышленном оборудовании и приборах бытового назначения: для защиты полупроводниковых приборов – тиристоров, симисторов, транзисторов, диодов, стабилитронов; для электростатической защиты входов радиоаппаратуры; для защиты от электромагнитных всплесков в мощных индуктивных элементах; как элемент искрогашения в электромоторах и переключателях.

Совершенствование технологии изготовления варисторов во всем мире направлено на повышение их быстродействия. Это связано с тем, что типовое значение времени срабатывания варисторов при воздействии перенапряжения составляет не более 25 наносекунд (нс), но для защиты некоторых видов оборудования его может оказаться недостаточно (для электростатической защиты необходимо не более 1 нс).

5.6. Основные группы современных полупроводниковых материалов

Основные группы современных полупроводниковых материалов представлены на схеме рис. 89.

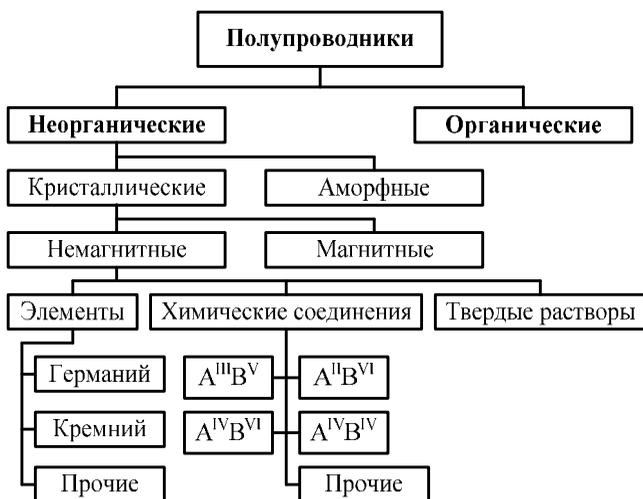


Рис. 89. Основные современные полупроводниковые материалы

Для обозначения некоторых полупроводников сложных составов используется общая формула $A^m B^n$. Индексы m и n – номера групп в таблице Менделеева, элемент из которых формирует полупроводник.

Самый многочисленный используемый класс полупроводниковых материалов – неорганические кристаллические полупроводники.

Некоторые материалы изготавливают в виде монокристаллов, из которых по определенным кристаллическим направлениям вырезают пластинки различных размеров с целью их последующего использования в выпрямителях, усилителях, фотоэлементах. Наиболее распространенными монокристаллическими полупроводниками являются германий и кремний.

Неорганические кристаллические полупроводниковые материалы условно можно разбить на 4 группы:

1. Простые (одноэлементные) полупроводниковые материалы.

Кристаллические полупроводниковые материалы, построенные из атомов или молекул одного элемента: В, С, Si, P, S, Ge, As, Se, а-Sn, Sb, Те.

Самостоятельно используются из них только Ge, Si и Se. Остальные полупроводниковые элементы используются как составные части полупроводниковых соединений (сложных полупроводников).

Германий Ge – содержание в земной коре мало ($7 \cdot 10^{-4} \%$). Температура его плавления $937,2^\circ\text{C}$. Основным источником получения

германия является зола углей и отходы металлургических заводов. Кристаллическая решетка – кубическая, типа алмаза. Удельное сопротивление чистого германия при комнатной температуре $\rho = 60 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Промышленно изготавливается легированный германий с электронной электропроводностью (n -тип) различных марок (ρ от 0,003 до 45 Ом·см), и германий легированный с дырочной электропроводностью (p -тип, с удельным сопротивлением ρ от 0,4 до 5,5 Ом·см и выше). Для получения в германии областей p -типа проводимости чаще всего применяют акцепторы In, Ga, Al. В качестве донорной примеси (для получения областей n -типа) применяют Sb и As. Легирование Ge проводят диффузией. Температура диффузии примесей – 700 °С – 900 °С. Наибольшей скоростью диффузии обладают Au, Al, Sb, а наименьшей растворимостью – Al, Ga, P, As. Недостатками германия являются малый диапазон рабочих температур из-за малой ширины запрещенной зоны и высокая стоимость.

Германий используется в ВЧ и СВЧ-транзисторах, а также в тензо-, магниточувствительных и холловских датчиках, обладает хорошими оптическими свойствами и используется в фотодиодах, фототранзисторах и других полупроводниковых приборов, которые могут работать при температуре до 75 °С.

Кремний Si в отличие от германия является одним из самых распространенных элементов в земной коре (29,5 %), занимая второе место после кислорода. Кремний, как и германий, темно-серого цвета, с металлическим блеском, твердый, хрупкий, хорошо шлифуется, полируется, но в отличие от германия является легким веществом (плотность 2,33 г/см³). Как и германий, кремний обладает хрупкостью. Его температура плавления значительно выше, чем у германия: 1423 °С. Удельное сопротивление чистого кремния $\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 20 °С. Кристаллический Si, как и Ge, имеет кубическую решетку типа алмаза. В кристалле кремния атомы расположены не плотно, объем междоузельных пустот составляет 75 %, так что при плавлении происходит не увеличение объема, как у всех металлов, а значительное (на 9 %) его уменьшение.

Кремний широко применяется в микроэлектронике. Например, на его основе производят сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) до 1 миллиона элементов в кристалле, микропроцессоры с тактовыми частотами на уровне 0,5–1,0 ГГц. Производство структур на основе монокристаллического кремния – процесс технологически сложный

и дорогостоящий. Поэтому используют поликристаллический и аморфный кремний в качестве более дешевой альтернативы, а также сплавы на основе кремния. Например, в качестве материала для изготовления нелинейных сопротивлений широкое применение получил поликристаллический карбид кремния. Из него также изготавливают вентиляльные разрядники для линий электропередачи – устройства, защищающие линию от перенапряжений.

Селен Se – самый «старый» простой полупроводник, его не применяют в таком масштабе, как германий и кремний. Элементарный селен используется ограниченно для изготовления выпрямителей, фотоэлементов и светофильтров. Но селен является важной составной частью полупроводниковых соединений (селенидов).

Не все полиморфные модификации селена полупроводники, селен имеет полупроводниковые свойства лишь в модификации, называемой серым селеном (β -Se), который имеет гексагональную кристаллическую структуру. Это полупроводник p -типа. В современной технологии полупроводников применяются не только сам селен, но и селениды многих элементов, например, селениды олова, свинца, висмута, сурьмы, селениды лантаноидов. Из свойств селена наиболее важными являются фотоэлектрические и термоэлектрические.

2. Оксидные кристаллические полупроводниковые материалы (из окислов металлов: Cu_2O , ZnO , CdO , NiO , Fe_2O_3 , MnO , Mn_3O_4 и др.).

Полупроводниковыми свойствами обладают не все оксиды переходных металлов, а только те, в которых ион металла относится к элементам переходного ряда Периодической системы химических элементов Менделеева (Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Ti).

Кроме оксидных полупроводников применяют и более сложные оксидные соединения (ZnFeO_4 , MnCr_2O_4), электропроводность которых можно подбирать, изменяя процентное соотношение компонентов.

Оксидные полупроводниковые материалы нашли широкое применение как материалы сенсоров (SnO_2 , WO_3 , ZnO , TiO_2 и т. п.) На основе смесей оксидов изготавливают терморезисторы, варисторы, выпрямители и другие приборы. Например, закись меди Cu_2O используется для изготовления купроксных выпрямителей (купрокс – вентиль). Оксид цинка ZnO применяется в радиоэлектронике для изготовления самоактивированного люминофора $\text{ZnO}:\text{Zn}$, имеющего сине-зеленый цвет свечения. На основе порошкообразного оксида цинка получают комплексные соединения, используемые для изготовления варисторов и т. д.

3. **Кристаллические полупроводниковые материалы $A^{III}B^V$** на основе соединений элементов третьей и пятой групп системы элементов Менделеева.

Существует всего девять соединений, которые можно получить, комбинируя In, Ga, Al с Sb, As, P. Например, фосфид галлия GaP, арсенид индия InAs, антимонид алюминия AlSb и т. д.

Между собой, а также с германием и кремнием, они образуют твердые растворы. Меняя состав, можно в определенном диапазоне изменять ширину запрещенной зоны и подвижность электронов.

Важнейшим полупроводниковым соединением этой группы является **арсенид галлия GaAs**, по значению он уступает только Ge и Si.

Арсенид галлия имеет лучшие свойства и более широкую область применения, чем германий и кремний. Он используется для изготовления транзисторов, фотолюминесцентных источников света, лазеров и т. д. Монокристалл арсенида галлия GaAs – один из наиболее перспективных материалов для создания высокоэффективных солнечных батарей.

Свойства некоторых полупроводников этой группы приведены в табл. 15.

Таблица 15

Свойства некоторых кристаллических полупроводниковых материалов $A^{III}B^V$

Наименование полупроводникового материала	Температура плавления, °C	Ширина запрещенной зоны, эВ	Относительная диэлектрическая проницаемость
GaAs	1240	1,4	11,1
InAs	940	0,45	11,7
GaP	1350	2,3	8,4
InP	1070	1,2	10,9
InSb	523	0,2	16,0
AlSb	1060	1,65	10,1
GaSb	705	0,8	14,0

4. **Кристаллические полупроводниковые материалы $A^{IV}B^{VI}$, $A^{II}B^{VI}$** на основе соединений элементов шестой группы – серы, селена и теллура (PbS, PbSe, PbTe и др.), а также некоторые другие группы соединений, например, $A^{IV}B^{IV}$, $A^{I}B^{VII}$, $A^{II}B^{IV}$ и твердые растворы между ними.

Природный PbS (галенит) – это соединение используется для изготовления фоторезисторов и термоэлектрических холодильников. Из группы Sb_2Te_3 , Sb_2Se_3 , Sb_2S_3 , Bi_2S_3 некоторые материалы используются для термоэлектрических холодильников, а некоторые – в качестве фотоэлектрических материалов.

5.6.1. Некристаллические полупроводниковые материалы

Типичными представителями этой группы являются стеклообразные полупроводниковые материалы – халькогенидные (As_2Se_3 – As_2Te_3 , Tl_2Se – As_2Se_3) и оксидные (V_2O_5 – P_2O_5 – RO_x , где R – металл I–IV гр.).

Все стеклообразные полупроводниковые материалы имеют электронную проводимость. Стеклообразные полупроводниковые материалы характеризуются удельной электрической проводимостью $\gamma=10^{-4}$ – 10^{-5} См/см. Обнаруживают фотопроводимость и термоЭДС. При медленном охлаждении обычно превращаются в кристаллические полупроводниковые материалы.

Другим важным классом некристаллических полупроводниковых материалов являются твердые растворы некоторых аморфных полупроводников с водородом, так называемые гидрированные некристаллические полупроводниковые материалы: α -Si:H, α -Si_{1-x}C_x:H, α -Si_{1-x}Ge_x:H, α -Si_{1-x}N_x:H, α -Si_{1-x}Sn_x:H. Водород обладает высокой растворимостью в этих материалах и замыкает на себе значительное количество "болтающихся" связей, характерных для аморфных полупроводников. В результате резко снижается плотность энергетических состояний в запрещенной зоне и появляется возможность создания *p-n* переходов.

Аморфный гидратированный кремний используют для производства солнечных батарей. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического. Поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки α -Si:H толщиной 0,5–1,0 мкм вместо дорогостоящих кремниевых 300-мкм подложек. Пока максимальный КПД экспериментальных элементов на основе α -Si:H составляет 12 %, что несколько ниже КПД кристаллических кремниевых солнечных элементов (~15 %). Однако не исключено, что с развитием технологии КПД элементов на основе α -Si:H достигнет теоретического потолка в 16 %.

5.6.2. Применение полупроводниковых материалов

Важнейшая область применения – **микроэлектроника**. На полупроводниках производят все современные большие и сверхбольшие интегральные схемы. Для повышения быстродействия и снижения потребляемой мощности интегральные схемы изготавливают на основе GaAs, InP и их твердых растворов с другими соединениями типа $A^{III}B^V$. Изготавливаются «силовые» электронные приборы – вентили, тиристоры, мощные транзисторы. Основным материалом для этих целей – Si, а в области более высоких рабочих температур применяют GaAs, SiC и другие широкозонные полупроводниковые материалы.

Другой важной областью является солнечная энергетика. Основными полупроводниковыми материалами для изготовления солнечных батарей являются Si, GaAs, гетероструктуры $Ga_xAl_{1-x}As/GaAs$, Cu_2S/CdS , $\alpha-Si:H$ и гетероструктуры $\alpha-Si:H/\alpha-Si_xC_{1-x}:H$. Это позволяет резко снизить стоимость солнечных батарей.

Полупроводники применяют для изготовления лазеров. Используют ряд соединений типа $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{IV}$, $A^{IV}B^{VI}$ и др. Важнейшими материалами для этого являются гетероструктуры: $Ga_xAl_{1-x}As/GaAs$, $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/InP$, $Ga_xIn_{1-x}As/InP$, $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/Ga_xAs_{1-x}P_x$.

Полупроводники используют для производства светодиодов ($GaAs$, GaP , $GaAs_{1-x}P_x$, $Ga_xIn_{1-x}As$, $Ga_xAl_{1-x}As$ и др.).

Производят полупроводниковые фотоприемники для широкого спектрального диапазона. Их изготавливают на основе Ge, Si, GaAs, GaP, InSb, InAs, $Ga_xAl_{1-x}As$, $Ga_xIn_{1-x}As$, $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$, $Cd_xHg_{1-x}Te$, $Pb_xSn_{1-x}Te$ и ряда других полупроводниковых материалов.

Полупроводниковые лазеры и фотоприемники – важнейшие составляющие элементной базы волоконно-оптических линий связи.

Полупроводниковые материалы используются для создания детекторов ядерных излучений (используют особо чистые Ge, Si, GaAs, CdTe и др.), а также термохолодильников, тензодатчиков, высокочувствительных термометров, датчиков магнитных полей и т. п.

6. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6.1. Природа магнетизма

Некоторые тела обладают магнитными свойствами, причины этого явления впервые объяснил Анри Ампер (1820 г.). Согласно

его гипотезе, внутри молекул и атомов циркулируют элементарные электрические токи, которые и определяют магнитные свойства любого вещества.

Магнетизм атомов обусловлен двумя основными причинами:

1) движением электронов вокруг ядра по замкнутым орбитам со скоростью v , вследствие чего возникает орбитальный магнитный момент B (рис. 90);

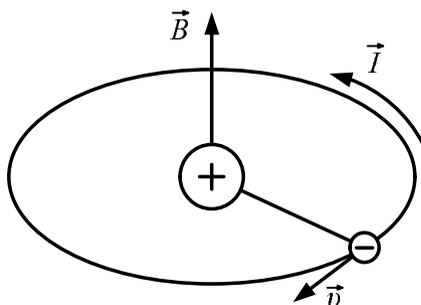


Рис. 90. Движение электрона по орбите вокруг ядра

2) собственное вращение электронов вокруг своей оси (спин), в результате чего возникает спиновый магнитный момент B (рис. 91).

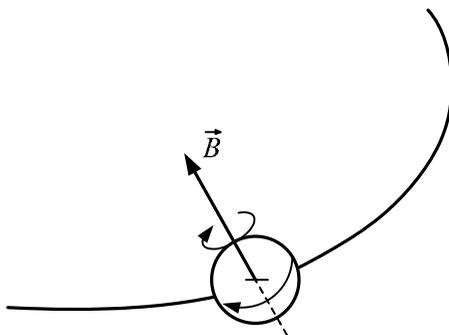


Рис. 91. Вращение электрона вокруг своей оси

В результате этих двух видов движения заряда внутри атома возникает суммарный магнитный момент атома, который на схемах изображают стрелкой (рис. 92).

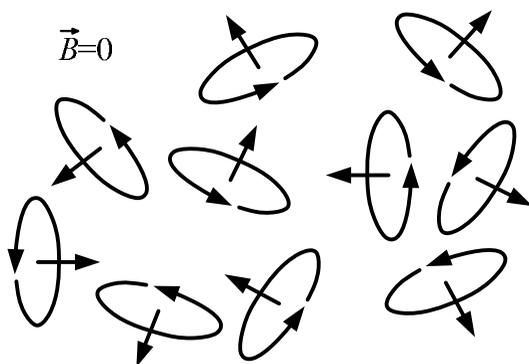


Рис. 92. Схема случайной ориентации магнитных моментов атомов

6.2. Основные электротехнические характеристики магнитных материалов

Магнитные свойства вещества характеризуют следующими параметрами:

- 1) Напряженность магнитного поля H (А/м).
- 2) Магнитная индукция B (Тл) – является основным параметром магнитного материала.
- 3) Намагниченность J (А/м) – это магнитный момент M единицы объема вещества V :

$$J = \frac{M}{V}. \quad (59)$$

Намагниченность пропорциональна напряженности магнитного поля:

$$J = \chi H, \quad (60)$$

где χ – магнитная восприимчивость материала (Гн/м).

- 4) Магнитная проницаемость материала μ (Гн/м). При наложении внешнего магнитного поля оно будет ориентировать магнитные моменты атомов, что создает собственное внутреннее магнитное поле. В результате магнитная индукция поля в веществе

будет равна сумме индукции поля в вакууме B_0 и магнитной индукции поля, возникшего благодаря намагничиванию вещества B_1 :

$$B_0 = B_0 + B_1. \quad (61)$$

Т. е. материал меняет внешнее магнитное поле в μ раз:

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (62)$$

Магнитная проницаемость – это скалярная физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля в данном веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

Индукцию магнитного поля в материале можно записать через напряженность приложенного извне магнитного поля H как:

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (63)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

5) $(BH)_{\max}$ – магнитная энергия (максимальное энергетическое произведение). Оно определяет, насколько мощным является постоянный магнит. Чем больше данная величина, тем более мощным является магнит.

6.3. Классификация материалов по магнитным свойствам

По магнитным свойствам материалы классифицируют соответственно величине магнитной проницаемости μ на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

6.3.1. Диамагнетики

К этой группе относят материалы, для которых магнитная проницаемость незначительно меньше единицы $\mu < 1$ (табл. 16).

Таблица 16

Магнитная проницаемость некоторых диамагнетиков

Наименование диамагнетика	Значение магнитной проницаемости μ
Водород (газообразный)	0,999937
Вода	0,999991
Стекло	0,999987
Цинк	0,999991
Серебро	0,999981
Золото	0,999963
Медь	0,999912
Висмут	0,999824

Диамагнетиками называют материалы, атомы (ионы) которых не обладают результирующим магнитным моментом. Внешне диамагнетики проявляют себя тем, что выталкиваются из магнитного поля. К диамагнетикам относятся все инертные газы, водород, большинство органических материалов, вода, некоторые металлы, например, Cu, Zn, Ag, Au, Be, Pb, Hg, и полупроводники, например Se, Si, Ge, В.

6.3.2. Парамагнетики

К этой группе относят материалы, для которых магнитная проницаемость в нормальных условиях незначительно больше единицы $\mu > 1$ (табл. 17).

Таблица 17

Величины магнитной проницаемости некоторых парамагнетиков

Наименование парамагнетика	Значение магнитной проницаемости μ
Азот (газообразный)	1,000013
Воздух (газообразный)	1,000038
Кислород (газообразный)	1,000017
Кислород(жидкий)	1,0034

Наименование парамагнетика	Значение магнитной проницаемости μ
Эбонит	1,000014
Алюминий	1,000023
Вольфрам	1,000175
Платина	1,000253

В парамагнетиках молекулы (ионы) обладают собственным магнитным моментом, но из-за теплового движения вектора магнитных моментов частиц ориентированы хаотически, поэтому их средняя намагниченность равна нулю. Внешне парамагнетики проявляют себя тем, что втягиваются в неоднородное магнитное поле. К парамагнетикам при комнатной температуре относятся некоторые металлы, например, Al, Cr, Na, Mg, Ta, Pt, W, кислород и некоторые оксиды, например, CoO, Cr₂O₃, CuO и некоторые другие материалы.

6.3.3. Ферромагнетики

К этой группе относят вещества, магнитная проницаемость которых в нормальных условиях зависит от величины внешнего поля и может значительно превышать единицу $\mu \gg 1$.

Название этого класса магнитных материалов происходит от латинского наименования железа – Ferrum. Ферромагнитные материалы состоят из множества замкнутых областей, в каждой из которых атомные моменты самопроизвольно ориентируются вдоль какого-либо направления.

Область самопроизвольной (спонтанной) намагниченности внутри материала называется **магнитным доменом**.

Размеры магнитных доменов составляют десятые или сотые доли миллиметра (10^{-4} – 10^{-5} м), что значительно превышает размеры отдельного атома (10^{-9} м).

В пределах одного домена магнитные поля атомов ориентированы строго параллельно. Но в отсутствие внешнего магнитного поля ориентация магнитных полей доменов в целом хаотичная, значит, материал магнитных свойств не проявляет (рис. 93).

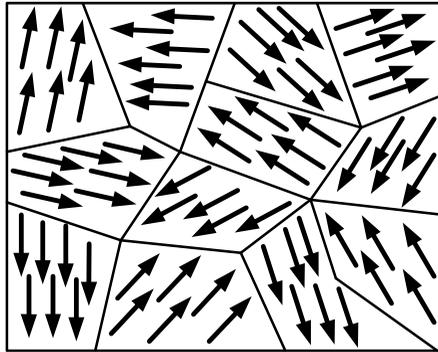


Рис. 93. Хаотичная ориентация магнитных доменов в отсутствие внешнего магнитного поля

Антиферромагнетики и ферримагнетики – эти материалы выделяют из класса ферромагнетиков, так как они также обладают доменной структурой.

Антиферромагнетики – это кристаллические твердые материалы, в которых магнитные моменты атомов внутри домена равны по величине и ориентированы антипараллельно, результирующий магнитный момент каждого домена равен нулю. Такое упорядочение магнитных моментов атомов возникает, так как в магнитном домене существуют две подрешетки (иногда и значительно более сложные структуры). И имеет место взаимная компенсация магнитных моментов внутри домена.

В макромасштабе антиферромагнетик не проявляет магнитных свойств, что подобно поведению парамагнетиков. Различие заключается в том, что магнитные моменты атомов парамагнетика ориентированы хаотично, а антиферромагнетиков – упорядочены (ориентированы) внутри доменов определенным образом.

Примеры антиферромагнетиков: хром Cr, марганец Mn, неодим Nd и др., а также химические соединения на основе металлов переходной группы: MnSe, FeCl₂, FeF₂, CuCl₂, MnO, FeO, NiO и некоторые другие.

Антиферромагнетики пока еще не находят практического применения, но в перспективе, если удастся сломать антипараллельное упорядочение магнитных моментов атомов внутри доменов, можно было бы ожидать очень высоких величин намагниченностей таких материалов.

Ферримагнетик – кристаллический материал, магнитную структуру которого внутри домена также можно представить в виде двух или более подрешеток моментов атомов, но результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Самопроизвольная намагниченность домена в ферримагнетике равна векторной сумме намагниченностей всех подрешеток, а **ферримагнетизм** можно рассматривать как наиболее общий случай магнитного упорядоченного состояния.

Таким образом, ферромагнетизм можно рассматривать как частный случай ферримагнетизма, когда в веществе есть только одна подрешетка. А антиферромагнетизм – частный случай ферримагнетизма, когда магнитные моменты атомов равны по величине и антипараллельны.

К ферримагнетикам относятся некоторые упорядоченные металлические соединения, различные оксиды. Наибольшее применение среди ферримагнетиков нашли сложные оксидные системы – ферриты.

Схематично, ориентация магнитных моментов атомов внутри домена в каждом из перечисленных классов материалов изображена на рис. 94.

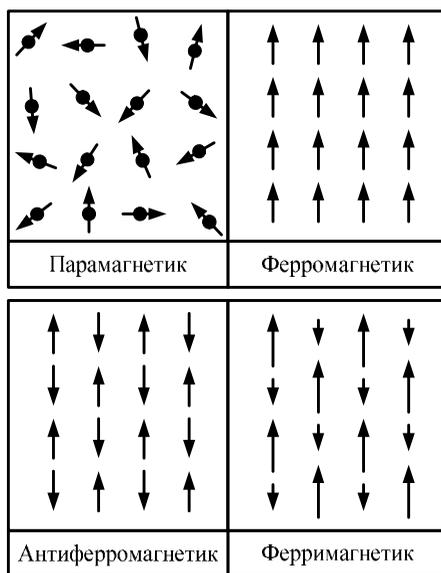


Рис. 94. Схема ориентации магнитных моментов атомов внутри домена в различных материалах

Ферромагнетик состоит из множества самопроизвольно (спонтанно) намагниченных областей, с линейными размерами порядка 10^{-3} – 10^{-4} см, которые называются **доменами**.

Причиной их образования является сильное взаимодействие спиновых магнитных моментов, которые, стремясь стать параллельными, ориентируются одинаково в пределах достаточно большой области, которая и становится доменом. Раз в каждом из доменов магнитные моменты всех его молекул или атомов направлены в одну сторону, то их векторная сумма дает отличный от нуля магнитный момент всего домена.

Кроме доменной структуры, ферромагнетик обладает и другими **особыми свойствами**.

1) Естественное состояние ферромагнетиков, как правило, кристаллическое.

2) Для каждого ферромагнетика существует своя определенная температура (**точка Кюри**), при которой доменная структура полностью разрушается, и ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Значения температуры Кюри некоторых ферромагнетиков приведены в табл. 18.

Таблица 18

Температуры Кюри некоторых ферромагнетиков

Наименование ферромагнитного материала	Fe	Co	Ni	Gd	Dy	Ho	Tb	Er
Значение температуры Кюри, К	1043	1403	631	289	87	20	25	19,6

3) Магнитная проницаемость μ нелинейно зависит от внешнего магнитного поля H (рис. 95).

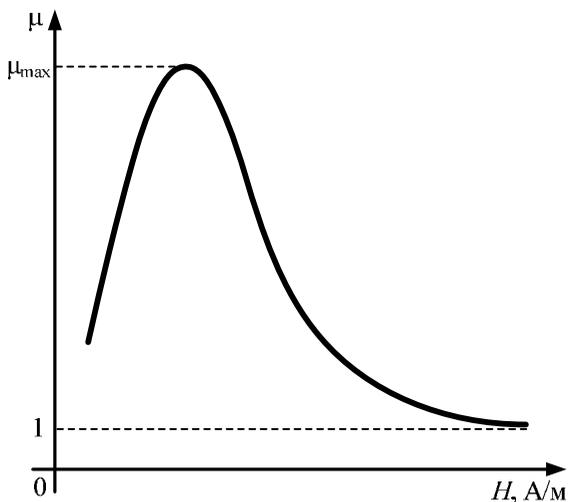


Рис. 95. Зависимость магнитной проницаемости μ от внешнего магнитного поля H

4) Нелинейная зависимость намагниченности от напряженности внешнего магнитного поля. Ферромагнетики способны намагничиваться до насыщения даже в относительно слабых магнитных полях (рис. 96).

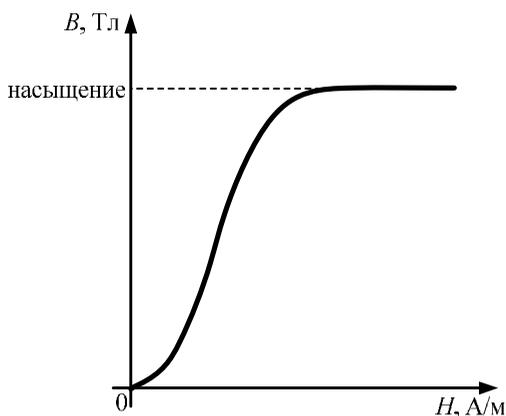


Рис. 96. Зависимость индукции поля ферромагнетика B от напряженности внешнего магнитного поля H

Насыщение индукции магнитного поля внутри ферромагнетика наступает, когда все магнитные моменты доменов ориентируются по полю (рис. 97).

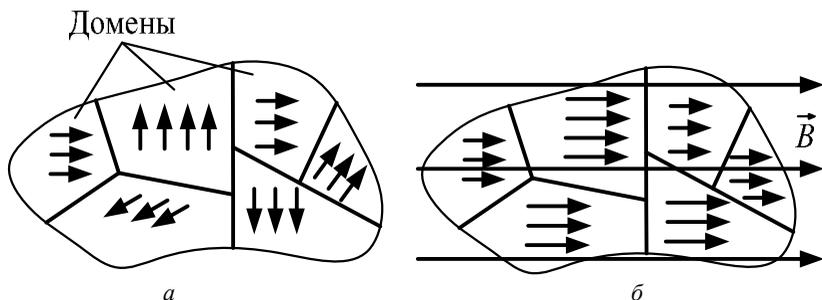


Рис. 97. Ориентация доменов ферромагнетика:
 а – в отсутствие внешнего магнитного поля (не намагничен);
 б – состояние насыщения во внешнем магнитном поле

5) Остаточная намагниченность – намагниченный ферромагнетик может сохранять намагниченность после снятия внешнего магнитного поля.

Чтобы размагнитить ферромагнетик, необходимо приложить магнитное поле в направлении, противоположном внутреннему остаточному полю ферромагнетика.

Модуль напряженности внешнего магнитного поля, размагничивающего намагниченный ферромагнетик, называют **коэрцитивной силой H_c** .

Способность ферромагнетиков намагничиваться до насыщения и сохранять намагниченность после снятия внешнего поля являются основой явления, называемого **магнитный гистерезис**.

Явление **гистерезиса** состоит в отставании индукции магнитного поля внутри ферромагнетика B от напряженности внешнего магнитного поля H в циклах намагничивание – размагничивание.

В переменном магнитном поле график этого явления в координатах $B-H$ представляет собой замкнутую фигуру, которую называют **петлей гистерезиса** (рис. 98).

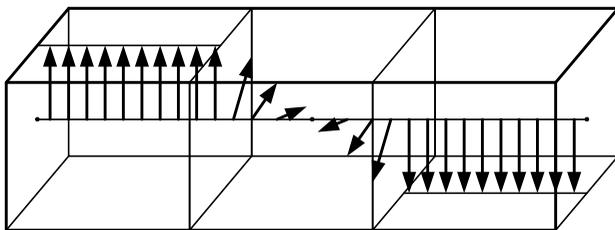


Рис. 99. Схематичное изображение доменной стенки между двумя доменами (соседние магнитные моменты ориентированы антипараллельно)

Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше энергия внешнего поля, затрачиваемая на нагревание материала в процессе перемагничивания.

Потери на гистерезис, Вт:

$$P = \eta B_m^n f V , \quad (64)$$

где η – коэффициент, зависящий от свойств материала;

B_m – максимальная индукция в течение цикла, Тл;

n – коэффициент, зависящий от индукции;

f – частота поля, Гц;

V – объем образца, м³.

При работе в переменных полях добавляются потери на вихревые токи, Вт:

$$P = \chi B_m^2 f^2 V , \quad (65)$$

где χ – коэффициент, зависящий от типа магнитного материала и его формы.

6.4. Ферриты

Ферриты – особые, широко используемые в технике магнитные материалы. В каждом по применению классе магнитных материалов есть эти представители современных магнитных материалов.

Ферриты – сложные материалы на основе оксида железа Fe_2O_3 и оксидов других металлов, получаемые по керамической технологии.

Керамическая технология – спекание тугоплавких порошков при температуре значительно ниже температур их плавления.

Общая формула простых ферритов $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me – какой-либо металл. Обязательным окислом, входящим в состав феррита, является окись железа Fe_2O_3 .

Сложные ферриты состоят из нескольких простых. Например, $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ (бариевый феррит), $(NiO \cdot ZnO)Fe_2O_3$ – никель-цинковый феррит и др.

6.4.1. Особые свойства ферритов

Особыми свойствами ферритов являются следующие:

1) По электрическим свойствам ферриты – это диэлектрики или полупроводники, следовательно, магнитные потери (на вихревые токи) в переменных полях незначительны. По этой причине ферриты используют в электротехнических устройствах, работающих в высокочастотных полях.

2) Так как ферриты по способу получения – керамика, получаемая спеканием порошков компонент, входящих в состав феррита, то легко получить магнит любой формы и с высокой точностью размеров.

3) Ферриты радиопрозрачны.

4) Ферриты имеют керамические механические свойства – то есть обладают высокой твердостью и хрупкостью. То есть ферриты не позволяют производить обработку резанием и допускают только шлифовку и полировку.

5) Для ферритов, как для керамических материалов, характерна сильная зависимость их свойств от состава, дисперсности, режима спекания, температуры эксплуатации и др.

6.4.2. Классификация ферритов

Ферриты классифицируют по типу кристаллической структуры:

1) **Ферриты–шпинели** кристаллизуются в кубической кристаллической решетке (рис. 100), имеют общую формулу $Me^{II}Fe_2O_3$, где Me^{II} – Ni, Co, Mn, Mg, Cu, Fe, Zn, Cd.

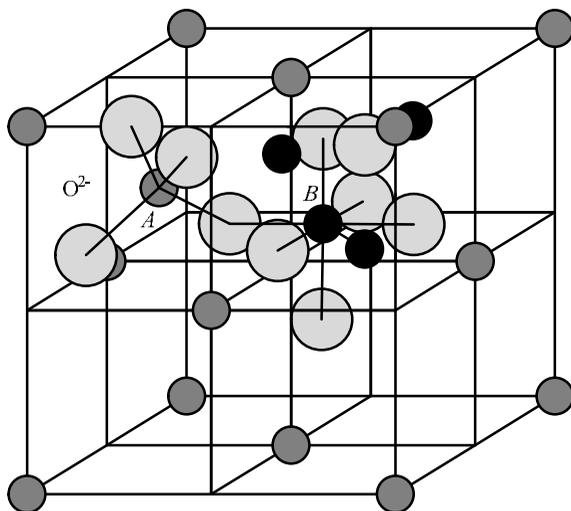


Рис. 100. Структура феррита–шпинеля

2) **Ферриты–гранаты** имеют кубическую структуру и общую формулу $R_3Fe_5O_{12}$, где R – редкоземельный элемент (например, Sm, Y). Важнейший из этой группы – иттрий-железный гранат $Y_3Fe_5O_{12}$.

3) **Гексаферриты** – ферриты с гексагональной структурой. Важнейшие: $BaFe_{12}O_{19}$, $BaM_2Fe_{16}O_{27}$.

4) **Ортоферриты** – группа с ромбической структурой, формула $RFeO_3$, где R – редкоземельный элемент.

6.5. Классификация магнитных материалов по применению

Классификация магнитных материалов по применению приведена на рис. 101.



Рис. 101. Классификация магнитных материалов по применению

Магнитомягкие и магнитотвердые материалы различают по форме петли гистерезиса (рис. 102).

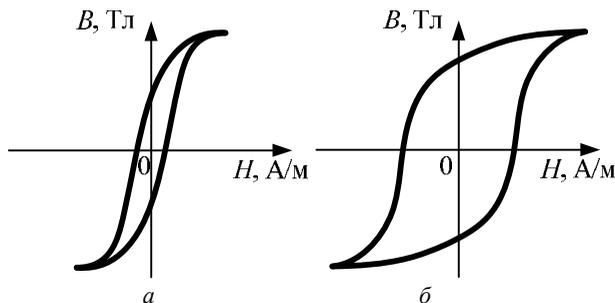


Рис. 102. Петля гистерезиса магнитомягкого (а) и магнитотвердого материалов (б)

6.5.1 Магнитомягкие материалы

К магнитомягким относят материалы с малой коэрцитивной силой и высокой магнитной проницаемостью, характеризуются узкой петлей гистерезиса (малая площадь петли) и малыми потерями на перемагничивание. Сравнительные площади петель гистерезиса магнитомягких и магнитотвердых материалов приведены на рис.103.

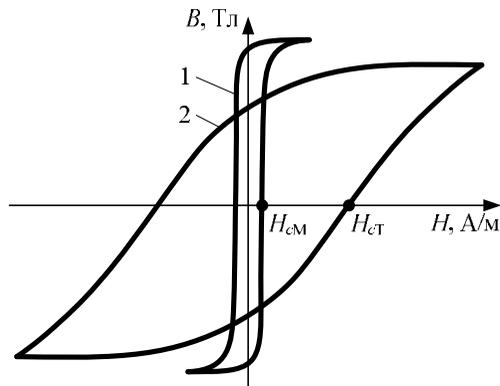


Рис. 103. Петля гистерезиса:
 1 – магнитомягкого материала (МММ); 2 – магнитотвердого материала (МТМ);
 H_{cM} H_{cT} – коэрцитивная сила магнитомягкого и магнитотвердого
 материалов соответственно

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых $H_c < 800$ А/м. У лучших магнитомягких материалов коэрцитивная сила H_c может составлять менее 1 А/м.

Магнитомягкие материалы используются во всех устройствах, которые работают при периодически изменяющемся магнитном потоке (трансформаторы, сердечники дросселей, электромагниты и т. п.).

Примеры магнитомягких материалов: технически чистое железо (АРМКО-железо); электротехнические кремнистые стали; железоникелевые (Fe–Ni) сплавы (пермаллой), железокобальтовые сплавы (Fe–Co); магнитомягкие ферриты.

Пермаллой – это железоникелевые сплавы (Fe–Ni), обычно легированные молибденом, хромом и некоторыми другими элементами. Основное преимущество пермаллоев – очень высокая магнитная проницаемость в слабых магнитных полях и малая коэрцитивная сила. Максимальная магнитная проницаемость μ достигается при содержании никеля Ni 50 %–70 %. **Суперпермаллой** имеет состав 79 % Ni + 15 % Fe + 5 % Mo + 0,5 % Mn. Недостатки пермаллоев: большая чувствительность магнитных свойств к механическим напряжениям, достаточно высокие магнитные потери при перемагничивании и сравнительно высокая стоимость. Хорошие магнитные свойства у пермаллоев получают лишь после отжига изделий в водороде или вакууме, что усложняет их изготовление.

Наиболее широко в качестве **магнитомягких ферритов** применяют никель-цинковые и марганец-цинковые ферриты, представляющие собой твердые растворы между NiO·Fe₂O₃ или MnO·Fe₂O₃ и немагнитным ZnO·Fe₂O₃. Удельное сопротивление ρ ферритов в $10^6 - 10^{13}$ раз больше, чем удельное сопротивление металлических материалов. Это значит, что потери на вихревые токи значительно меньше. Это позволяет использовать ферриты при изготовлении изделий, работающих в областях звуковых и радиочастот. К недостаткам магнитомягких ферритов относятся: низкие значения индукции насыщения, сравнительно малая магнитная проницаемость, большая зависимость магнитных свойств от температуры, значительные хрупкость и твердость.

Маркировка магнитомягких ферритов следующая: стоящее впереди число указывает номинальное значение μ . Следующие за числом буквы Н или В означают, соответственно, низкочастотный или высокочастотный материал. Далее следует буква, указывающая состав феррита: М – марганец-цинковый, Н – никель-цинковый.

Например, 2000НМ – низкочастотный марганец-цинковый феррит с $\mu = 2000$.

Магнитные свойства некоторых магнитомягких материалов приведены в табл. 19.

Таблица 19

Магнитные свойства некоторых магнитомягких материалов

Наименование материала	Начальная магнитная проницаемость	Максимальная магнитная проницаемость	Коэрцитивная сила, А/м	Индукция насыщения, Тл	Удельное сопротивление, мкОм/м
Технически чистое железо	250–400	3500–4500	50–100	2,18	0,1
Электролитическое железо	600	15000	30	2,18	0,1
Карбонильное железо	2000–3000	20000–21500	6,4	2,18	0,1
Монокристалл чистейшего железа	> 20000	1430000	0,8	-	0,097
Электротехническая сталь	200–600	3000–8000	10–65	1,95–2,02	0,25–0,6
Низконикелевый пермаллой	1500–4000	15000–60000	5–32	1,0–1,6	0,45–0,9
Высоконикелевый пермаллой	7000–100000	50000–300000	0,65–5	0,65–1,05	0,16–0,85

6.5.2. Магнитотвердые материалы

К **магнитотвердым** (магнитожестким) относят материалы с большой коэрцитивной силой H_c и относительно малой магнитной проницаемостью. Они обладают большой площадью гистерезисной петли и полого поднимающейся кривой намагничивания. Условно магнитотвердыми считают материалы, у которых $H_c > 4$ кА/м. У лучших магнитотвердых материалов H_c превышает 500 кА/м.

Магнитотвердые материалы – это материалы для постоянных магнитов, использующихся в электродвигателях и других электротехнических устройствах, в которых требуется постоянное магнитное поле.

Основная характеристика постоянных магнитов: $(BH)_{\max}$ – магнитная энергия или максимальное энергетическое произведение. Чем больше $(BH)_{\max}$, тем более мощным является магнит. Важной характеристикой магнитов является также T_{\max} – максимальная рабочая температура. Определяет предел температуры, при которой магнит временно теряет часть своих магнитных свойств. При снижении температуры магнит полностью восстанавливает все магнитные свойства.

Примеры магнитотвердых материалов:

1) **Литые магниты** (трудно деформируемые сплавы) Al+Ni+Fe (**Альни**) и Al+Ni+Co+Fe (**Альнико**), российское название **ЮНДК**, (табл. 20).

Таблица 20

Свойства некоторых промышленных магнитов

Марка сплавов	Максимальное энергетическое произведение $(BH)_{\max}$, кДж/м ³	Коэрцитивная сила H_c , кА/м	Остаточная индукция B_r , Тл	Плотность, г/см ³
ЮНД4	Не менее 7,2	Не менее 40	Не менее 0,5	6,9
ЮНТС	Не менее 8,0	Не менее 58	Не менее 0,43	6,9
ЮНДКИ	12,0–19,4	48–55	0,75–0,90	7,3
ЮНДК	36,0–44,0	44–52	1,1–1,15	6,9–7,2
ЮНДКБА	56,0–60,0	44–62	1,4–1,25	7,3
ЮНДКТ5	28,0–44,0	92–110	0,75–0,90	7,3
ЮНДКТ5БА	72,0–88,0	110–120	1,02–1,10	7,3
ЮНДКТ5АА	80,0–88,0	115–120	1,05–1,10	7,3
ЮНДКТ8	Не менее 36,0	145–168	0,70–0,75	7,3

Используются для изготовления магнитов всех назначений, магнитных систем измерительных приборов и поляризованных реле, магнитных систем тахогенераторов и исполнительных двигателей, магнитных аппаратов и магнитных муфт.

2) **Деформируемые сплавы** Co+Mo+Fe (**комоль**), Cr+Co+Fe, V+Co+Fe (**викаллоу**), Cu+Ni+Co (**кунико**), Cu+Ni+Fe (**кунифе**). Используются для изготовления магнитов сложной конфигурации,

стрелок компасов, магнитных пружин измерительных приборов, магнитных систем гистерезисных двигателей, устройств записи и хранения информации.

3) **Редкоземельные магниты** – интерметаллические соединения типа РЗМ+Со (РЗМ – редкоземельный элемент, например, Sm, Pr). Эти магниты обладают рекордно высокими магнитными свойствами, используются в магнитных системах магнетронов и другой радиоэлектронной аппаратуры. Магниты химического состава $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (**неодимовые магниты**) обладают самыми высокими магнитными параметрами (B_r , $(BH)_{\text{max}}$) из всех современных материалов постоянных магнитов, выпускаемых промышленностью.

4) **Магнитотвердые ферриты** – **феррит бария** $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, **феррит кобальта** $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, **феррит стронция** $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. По сравнению с литыми, эти магниты имеют много большую коэрцитивную силу H_c и малую индукцию насыщения B_s , отличаются высокой стабильностью при механических воздействиях и воздействии магнитных полей, не подвергаются структурному старению. Достоинство – стоимость магнитов из ферритов почти в 10 раз меньше, чем у магнитов из АЛНИ (сплава ЮНДК-24). Недостатки – сильная зависимость магнитных свойств от температуры (ухудшение с ростом T), большая хрупкость и твердость, используются для изготовления магнитных систем радиоэлектронной аппаратуры, магнитных линз, магнитных систем поляризованных реле, исполнительных электродвигателей.

Прочие магнитотвердые материалы – пластически деформируемые сплавы, эластичные магниты, материалы для магнитных носителей информации, жидкие магниты. Например, **металлопластические** магниты (металлопласты) получают из металлических порошков, прессуют их вместе с изолирующей связкой и нагревают до невысоких температур, необходимых для полимеризации связующего вещества. Имеют пониженные магнитные свойства по сравнению с литыми магнитами, однако обладают большим электрическим сопротивлением, малой плотностью, меньшей стоимостью.

5) **Материалы для устройств записи и хранения информации.** Это магнитные ленты и диски. Они должны иметь высокую остаточную индукцию для повышения уровня считываемого сигнала, а коэрцитивная сила H_c должна иметь оптимальное значение.

При низких значениях H_c облегчается процесс стирания записи, но увеличивается эффект саморазмагничивания, что приводит к потере записанной информации. Хорошие результаты дают материалы, у которых соотношение $H_c/B_r > 8$ кА/(м·Тл).

Для записи и воспроизведения информации используют металлические ленты (толщиной 0,005 – 0,01 мм) и проволоку (диаметром до 0,1 мм) из специальной нержавеющей стали ($H_c = 32$ кА/м, $B_r = 0,7$ Тл) и **викаллоя** – сплав Fe-Co-V ($H_c = 36$ кА/м, $B_r = 1$ Тл). Недостатком этих сплавов является высокая стоимость и быстрый износ записывающих и воспроизводящих устройств.

Также используют магнитотвердые порошковые покрытия, нанесенные на различные основания: металлические или пластмассовые ленты, металлические диски и барабаны. В качестве магнитного порошка используют Fe_2O_3 и Fe_3O_4 , магнитотвердые ферриты, сплавы типа альни (Fe – Ni – Al).

б) **Жидкие магниты.** В середине прошлого века были открыты феррофлюиды – жидкости, состоящие из частиц оксида железа, которые могут генерировать магнитное поле. Но намагниченность такие жидкости сохраняют только во внешнем магнитном поле.

В 2019 г. ученые нескольких американских и китайских университетов заявили о создании жидкого магнита, который сохраняет свои магнитные свойства в отсутствие внешнего электромагнитного поля. Этот жидкий магнит получен на основе ферромагнитных наночастиц с диаметром 22 нм (Fe_3O_4 – CO_2H), которые собрали в магнитные капли, используя поверхностно-активное вещество (ПАВ) масляно-полимерную смесь POSS– NH_2 (рис. 104).

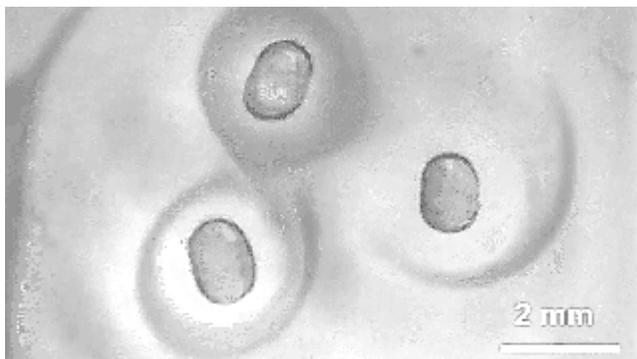


Рис. 104. Жидкий магнит

Жидкость может принять любую форму: цилиндрическую, сферическую, вытянутую, как проволока, или заполнять объекты со сложной геометрией. В перспективе жидкие магниты будут применяться для создания «мягких» роботов, искусственных клеток и адресной доставки лекарств в организм.

6.5.3. Магнитные материалы специального назначения

Магнитные материалы специального назначения – это магнитные материалы, имеющие узкие области применения, благодаря высоким значениям одного, иногда двух магнитных параметров.

К числу таких материалов относятся: магнитострикционные материалы, магнитокалорические материалы, материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, ферриты для устройств СВЧ, материалы с постоянным значением магнитной проницаемости в слабых полях, материалы с цилиндрическими магнитными доменами и др.

Магнитострикционные материалы. Магнитострикция – изменение формы и размеров тела при его намагничивании. Существует и обратный магнитострикционный эффект – намагничивание тела при изменении его размеров. Есть также два других эффекта, взаимосвязанных с магнитострикцией: эффект Маттеучи (создание спиралеобразного магнитного поля магнитострикционным материалом, подвергнутым вращению) и эффект Вайдемана (противоположен эффекту Маттеучи), создание вращательного движения магнитострикционным предметом, подвергнутым спиралеобразному магнитному полю. К магнитострикционным материалам относится никель. Джеймс Джоуль обнаружил магнитострикцию в 1842 году, анализируя образцы никеля. Также к этой группе материалов относятся алферы (сплавы железа и алюминия), пермаллои, сплавы кобальта и никеля, ряд ферритов (CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4), некоторые редкоземельные металлы и др.

Материалы с большим магнитострикционным эффектом применяются в качестве преобразователей электромагнитной энергии в механическую, для датчиков давления, датчиков линейного перемещения, и т. д. Пример – магнитострикционные преобразователи, которые преобразуют энергию магнитного поля в механическую (звуковую или ультразвуковую). Их действие основано на магнитоупругом эффекте. Если

магнитоупругий стержень расположить вдоль переменного магнитного поля, то этот стержень станет попеременно сокращаться и удлиняться, то есть испытывать механические колебания с частотой переменного магнитного поля и амплитудой, пропорциональной его индукции. Вибрации преобразователя возбуждают в твердой или жидкой среде, с которой он соприкасается, волны ультразвука той же частоты. Обычно такие преобразователи работают на собственной частоте механических колебаний, так как на ней наиболее эффективно преобразование энергии из одной формы в другую. Например, магнитострикционные преобразователи из тонкого листового металла работают лучше всего в низкочастотном ультразвуковом диапазоне (от 20 до 50 кГц), на частотах выше 100 кГц у них очень низкий КПД.

Магнитокалорические материалы. Магнитокалорический эффект – изменение температуры магнетика при его адиабатическом (без теплообмена с окружающей средой) намагничивании или размагничивании. Возможен обратный эффект – намагничивание материала при изменении его температуры.

Наиболее перспективные магнитокалорические материалы – гадолиний, соединения на основе арсенида марганца ($MnAs$), твердые растворы $Gd_5(Si_xGe_{1-x})$, $MnFe(P_xAs_{1-x})$, $La(Fe_xSi_{1-x})_{13}$ и некоторые другие.

Магнитокалорические материалы могут применяться в роли рабочего тела магнитных холодильников. Это позволяет упростить и существенно повысить надежность, добиться до 50 % снижения энергопотребления, создавать холодильники небольших габаритных размеров, снизить уровень шума и вибраций при работе. Перечисленные достоинства делают магнитокалорические холодильники идеальными для решения многих технических задач: например, такие устройства могут охлаждать серверы с минимальными затратами.

Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ). Основным параметром таких материалов является коэффициент прямоугольности петли гистерезиса $K_{пу}$ – отношение остаточной индукции B_r к максимальной индукции B_{max} :

$$K_{пу} = \frac{B_r}{B_{max}}. \quad (66)$$

К магнитным материалам с ППГ относятся материалы, для которых КПУ не менее 0,85 (рис. 105).

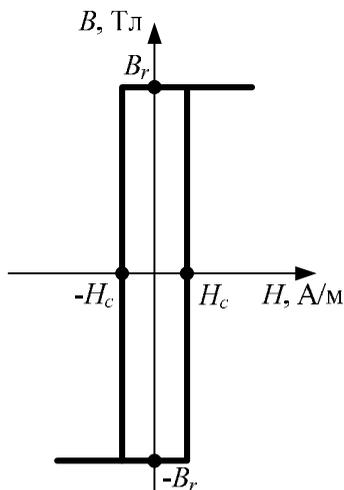


Рис. 105. Прямоугольная петля гистерезиса

Магнитные материалы с ППГ можно подразделить на 3 группы: ферриты, текстурированные ферромагнитные сплавы в виде лент толщиной от 0,5 мм до нескольких мкм и тонкие ферромагнитные пленки.

Ферриты для устройств СВЧ. В качестве ферритов СВЧ используются магний-марганцевые ферриты с большим содержанием оксида магния. В диапазоне длин волн 0,8–2 см применяют литий-цинковые ферриты. Применяются никель-цинковые ферриты и ферриты сложного состава (полиферриты). Особое место занимают феррогранаты иттрия.

Материалы с постоянным значением магнитной проницаемости в слабых полях. Это перминвар – тройной сплав железо–никель–кобальт (45 % Ni + 30 % Fe + 25 % Co), изоперм – сплав, представляющий собой твердый раствор железа и никеля с медью или алюминием. Магнитная проницаемость изопермов $\mu = 30\text{--}80$ и мало изменяется в полях до $H = 500\text{ А/м}$.

Материалы с цилиндрическими магнитными доменами (ЦМД). Для очень тонких пленок характерна однодоменная структура. При толщине пленки свыше $10^{-3}\text{--}10^{-2}$ мм образуется многодоменная структура, состоящая из длинных и узких полосовых доменов шириной от долей микрометров до нескольких мкм (табл. 21).

Свойства некоторых материалов с ЦМД

Наименование материала	Свойства, особенности технологии или применения
Ортоферриты $RFeO_3$ R – редкоземельный элемент (Y, Sm, Eu, Er, Yb).	Высокая подвижность доменных границ, прозрачность в красном свете ($l = 0,6$ мкм). Плотность информации не велика. $10^3 - 10^4$ бит/см ²
Ферриты гранаты $R_3Fe_5O_{12}$.	Плотность информации выше $10^5 - 10^6$ бит/см ² , но подвижность доменных границ ниже, чем у ортоферритов. Применяются в виде монокристаллических пленок
Аморфные магнитные пленки сплавов Cd-Co и CdFe.	Плотность информации до 10^9 бит/см ² . Относительно низкая стоимость. Низкая термостабильность и низкое электрическое сопротивление – недостаток
Гексагональные ферриты $BaFe_{12}O_{19}$ и др.	Высокая намагниченность насыщения. Субмикронное ЦМД, однако низкая подвижность ограничивает применение

Под действием внешнего магнитного поля вся система полос доменов может перемещаться и поворачиваться. При наложении магнитного поля в направлении, перпендикулярном поверхности пленки, полосовые домены превращаются в цилиндрические магнитные домены (ЦМД).

ЦМД в микроэлектронике используют для создания запоминающих устройств (ЗУ). Рабочим элементом ЗУ может являться,

например, монокристаллическая гранатовая пленка магнитного феррита граната толщиной 1–3 мкм, нанесенная на подложку из немагнитного галлия-гадолиниевого феррита–граната.

Несколько примеров материалов с максимально высокими магнитными характеристиками: магнитный материал с максимальной температурой Кюри – это кобальт ($T_C=1404$ К); максимальной намагниченностью насыщения $\sim 2,43$ Тл обладают сплавы состава 60 % Fe–40 % Co; суперпермаллои обладают отличным сочетанием высокой магнитной проницаемости ($\mu \sim 10^5$) и низкой коэрцитивной силы ($H_c \sim 0,3$ А/м); для неодимовых магнитов получены максимальные величины магнитной энергии (~ 400 кДж/м³) и коэрцитивной силы ($H_c \sim 1,6 \cdot 10^6$ А/м); иттриевый феррит–гранат состава $Y_3Fe_5O_{12}$ – материал, обладающий магнитными свойствами и одновременно являющийся отличным диэлектриком с величиной удельного сопротивления $\rho \sim 10^{14}$ Ом·см.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ЭУМК – электронный учебно-методический комплекс.

УМК – учебно-методический комплекс.

ЭТКМ – электротехнические и конструкционные материалы.

ЭИМ – электроизоляционные материалы.

АФ – антифрикционные материалы.

ОЦК – объемно центрированная кубическая структура.

ГЦК – гранецентрированная кубическая структура.

ГПУ – гексагональная плотноупакованная структура.

А.е.м. – атомная единица массы.

ЭДС – электродвижущая сила.

КПД – коэффициент полезного действия.

ТК или ТКС – температурный коэффициент удельного сопротивления.

СП – сверхпроводимость.

ВТСП – высокотемпературные сверхпроводники.

СКВИД – сверхпроводящий квантовый интерференционный детектор.

СБИС – сверхбольшие интегральные схемы.

$A^m B^n$ – общая формула записи соединений, где индексы m и n указывают номер группы в таблице Менделеева, из которой взят элемент.

МММ – магнитомягкие материалы.

МТМ – магнитотвердые материалы.

СВЧ – сверхвысокие частоты.

ППГ – прямоугольная петля гистерезиса.

ЦМД – цилиндрические магнитные домены.

ЗУ – запоминающие устройства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение : учебник / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – 4-е изд., стереотип. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 646 с.
2. Сапунов, С. В. Материаловедение : учебное пособие / С. В. Сапунов. – СПб. : Лань, 2015. – 202 с.
3. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы : учебное пособие / А. С. Серебряков. – М. : Маршрут, 2005. – 280 с.
4. Журавлева, Л. В. Электроматериаловедение: учебник / Л. В. Журавлева. – 7-е изд., испр. – М. : Академия, 2012. – 352 с.
5. Готтштайн, Г. Физико-химические основы материаловедения / Г. Готтштайн; под ред. В. П. Зломанова. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 400 с.
6. Электротехнические и конструкционные материалы : учебное пособие / В. Н. Бородулин [и др.]; под общ. ред. В. А. Филикова. – М. : Высшая школа, 2001. – 280 с.
7. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебное пособие / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1980. – 493 с.
8. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб. : Химиздат, 2007. – 784 с.
9. Мороз, Н. К. Электротехническое материаловедение : учебник / Н. К. Мороз. – Изд-во «Инфра-Инженерия», Москва–Вологда, 2020. – 148 с.
10. Петрова, Л. Г. Электротехнические материалы : учебное пособие / Л. Г. Петрова, М. А. Потапов, О. В. Чудина. – М., 2008. – 198 с.
11. Агеева, Н. Д. Электротехническое материаловедение : учебное пособие / Н. Д. Агеева, Н. Г. Винаковская, В. Н. Лифанов. – Владивосток : ДВГТУ, 2006. – 115 с.
12. Дудкин, А. Н. Электротехническое материаловедение / А. Н. Дудкин, В. С. Ким. – СПб. : Лань, 2020. – 200 с.
13. Черепяхин, А. А. Электротехническое и конструкционное материаловедение. / А. А. Черепяхин, Т. И. Балькова, А. А. Смолькин. – М. : Высш. образование, 2017 – 349 с.
14. Целебровский, Ю. В. Материаловедение для электриков в вопросах и ответах : учебное пособие / Ю. В. Целебровский. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2018 – 64 с.

15. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / под ред.: Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – Т. 1. – 367 с.

16. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / под ред.: Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 2. – 464 с.

17. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / под ред.: Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3 – 728 с.

Информационные ресурсы:

18. Электротехнические и конструкционные материалы [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине «Электротехнические и конструкционные материалы» для специальностей: 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства» (по направлениям), направления специальности: 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика), 1-74 06 05-02 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика) / Минсельхоз-прод РБ, УО «БГАТУ», АЭФ, Кафедра ППС; сост. : Т. М. Ткаченко [и др.]. – Электронные данные (145 674 731 байт). – Минск: БГАТУ, 2017.

19. Электротехнические материалы. Электронное учебное пособие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electrofaq.com/ETMbook/Mbook.HTM>. – Дата доступа: 17.03.2021.

20. Электротехническое материаловедение. Электронный базовый учебник [Электронный ресурс] / В. Н. Бородулин [и др.]. – Режим доступа: <http://ftemk.mpei.ac.ru/ctlw/LocalContent.aspx?id=etm1>. – Дата доступа: 04.02.2021.

21. Электронный учебник по электротехническому материаловедению [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://etm.mpei.ru/content/tut>. – Дата доступа: 11.03.2021.

22. Дамбис, М. К. Электротехническое материаловедение. Экспресс-учебник [Электронный ресурс] / М. К. Дамбис. – Режим доступа: http://ftemk.mpei.ac.ru/ctlw/LocalContent.aspx?id=etm_expr. – Дата доступа: 11.02.2021.

23. Мир современных материалов. Всё о материалах и их испытаниях : справочник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://worldofmaterials.ru/spravochnik>. – Дата доступа: 27.03.2021.

24. Ковалевская, Ж. Г. Материаловедение и технология конструкционных материалов [Электронный ресурс] / Ж. Г. Ковалевская. – Режим доступа: https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOVALEVSKAYA/training_work/Tab1. – Дата доступа: 02.04.2021.

25. Буслаева, Е. М. Материаловедение [Электронный ресурс] / Е. М. Буслаева. – Режим доступа: http://www.e-read-ing.club/bookreader.php/99301/Buslaeva_Materialovedenie._Shpargalka.html. – Дата доступа: 02.03.2021.

26. Материаловедение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mccm--vv.narod.ru/material/mater.htm>. – Дата доступа: 15.03.2021.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Ткаченко Тамара Михайловна

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

Учебное пособие

Ответственный за выпуск *С. М. Барайшук*

Редактор *Г. В. Анисимова*

Корректор *Г. В. Анисимова*

Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*

Дизайн обложки *А. А. Покало*

Подписано в печать 02.12.2022. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 9,63. Тираж 99 экз. Заказ 385.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/359 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–1, 220023, Минск.