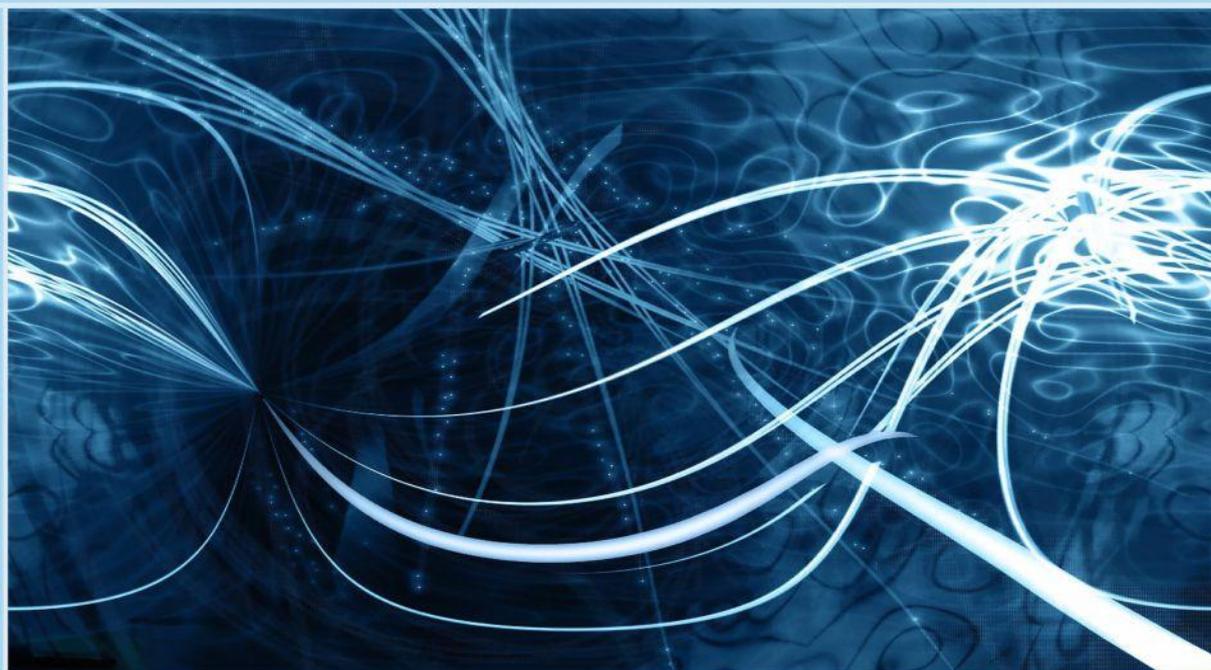


16+



Николаев М.Ю., Мальгин Г.В.,
Щекочихин А.В., Шкаруба М.В.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ



Учебное пособие

Нижневартовск
НВГУ
2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»

Николаев М.Ю., Мальгин Г.В., Щекочихин А.В., **Шкаруба М.В.**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

Нижевартовск
НВГУ
2022

Печатается по решению
Ученого совета ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»
протокол № 1 от 18 января 2022

Рецензенты: д-р техн. наук *В.К. Федоров*;
канд. техн. наук *Б. Н. Коврижин*

Николаев М.Ю., Мальгин Г.В., Щекочихин А.В., Шкаруба М.В.

Э 45 **Электротехнические и конструкционные материалы** : учебное пособие /
М.Ю. Николаев, Г.В. Мальгин, А.В. Щекочихин, **М.В. Шкаруба**. Нижневартовск :
изд-во НВГУ, 2022. 167 с.

ISBN 978-5-00047-657-4

Изложены основы строения материалов и приведена их классификация. Рассмотрена физика явлений, имеющих место в электротехнических материалах: диэлектриках, проводниках, полупроводниках и магнитных материалах. Описываются электрические и физико-механические свойства этих материалов.

Рассмотрены классификация, строение и механические свойства конструкционных материалов, приведены основы теории сплавов и их термической обработки.

ББК 31.23я73+30.3я73



Тип лицензии CC, поддерживаемый журналом: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ISBN 978-5-00047-657-4



9 785000 476574 >

© Николаев М.Ю., Мальгин Г.В.,
Щекочихин А.В., **Шкаруба М.В.**, 2022
© НВГУ, 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Материаловедение – наука, изучающая строение, свойства материалов, а также связь между строением и свойствами и влияние на них внешних воздействий (теплого, механического, химического и т. д.).

Учебное пособие «Электротехнические и конструкционные материалы» предназначено для студентов, которые изучают энергетические дисциплины и решили связать свою будущую и профессиональную деятельность с энергетикой. Пособие разбито на две важных составляющие, соответствующие своему названию, и раскрывает азы материаловедения, начиная от строения веществ и их взаимодействия в природе, а также использования в современной энергетике. Рассматривается физика явлений, имеющих место в диэлектрических, полупроводниковых и проводниковых материалах в электрическом поле, магнитных материалах в магнитном поле, а также в конструкционных материалах – под действием механического напряжения.

Это пособие является современной доработкой и переизданием пособия «Электротехническое и конструкционное материаловедение: учеб. пособие / М.В. Шкаруба – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. 192 с., ил. ISBN 978-5-8149-1596-2, посвящено памяти кандидата технических наук, доцента Шкарубы Михаила Васильевича, в работе использован его многолетний опыт преподавания дисциплин «Электротехнические материалы», «Материалы и элементы электронной техники» и «Материаловедение. Технология конструкционных материалов».

Чтобы не перегружать читателя, в пособии представлены все основополагающие и исчерпывающие материалы по вопросам электротехнических и конструкционных материалов, а новейшие изыскания современных признанных специалистов-материаловедов представлены в дополнительных источниках, указанных в библиографическом списке под номерами с 18 по 21. Читателям предлагается изучить эти источники самостоятельно.

1. ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

Существует несколько классификаций материалов. Например, по *агрегатному состоянию* все материалы подразделяются на следующие типы: твёрдые материалы, жидкости, газы и плазма.

Газ – это состояние вещества, в котором атомы и молекулы не связаны или слабо связаны силами взаимодействия и хаотически двигаясь, заполняют весь объём. Если силами взаимодействия молекул в газе пренебречь, то такой газ называется *идеальным*.

Жидкости – вещества, сочетающие свойства газов и твёрдых тел. Тепловое движение молекул (атомов) жидкости представляет собой сочетание малых колебаний около положения равновесия и перескоков из одного положения в другое.

Твёрдое тело характеризуется стабильностью формы. У него атомы могут совершать лишь малые (тепловые) колебания вокруг фиксированных положений равновесия.

Плазма – это особое состояние вещества. В данной дисциплине плазма не рассматривается.

Рассмотрим классификацию технических материалов по назначению [3]:

1. Конструкционные.
2. Электротехнические.
3. Триботехнические.
4. Инструментальные.
5. Рабочие тела.
6. Топливо.
7. Технологические и др.

В данной дисциплине рассматриваются только электротехнические и конструкционные материалы, которые широко применяются в электро-энергетике.

Конструкционные материалы – твёрдые материалы, предназначенные для изготовления изделий, подвергаемых механическому нагружению.

Электротехнические материалы предназначены для изготовления изделий, применяемых для производства, передачи, преобразования и потребления электроэнергии.

1.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА

1.2.1. Строение атома

Атом – это наименьшая частица химического элемента, обладающая его свойствами. Атом состоит из элементарных частиц: протонов, нейтронов, электронов и т. д. Протоны и нейтроны составляют положительно заряженное ядро атома, а электроны движутся вокруг ядра. Некоторые характеристики электрона, протона и нейтрона приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Характеристики элементарных частиц

Характеристика	Электрон	Нейтрон	Протон
Масса покоя	1	1838,5	1836
Заряд	-1	0	+1

Электрон имеет массу покоя $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г, является носителем наименьшего электрического заряда (кванта электричества) $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Рассмотрим планетарную модель атома, предложенную Нильсом Бором в 1913 г. По этой модели ядро атома и окружающие его электроны образуют устойчивую пространственную систему. Электроны могут вращаться не по произвольным, а только по строго определенным орбитам – соответствующим устойчивому состоянию атома (рис. 1.1). Количество протонов в ядре и порядок заполнения оболочек можно определить, используя Периодическую систему элементов Д.И. Менделеева.

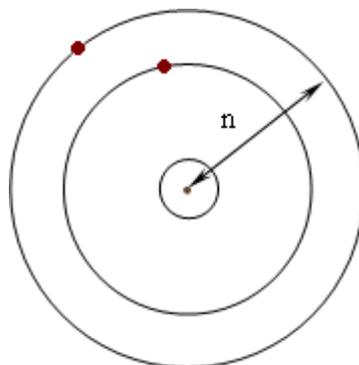


Рис. 1.1. Схематическое изображение атома

Здесь n – главное квантовое число электрона, определяющее среднее удаление электрона от ядра ($n = 1, 2, 3$).

Электронный слой – это совокупность электронов, имеющих одинаковое значение n . В электронном слое не более $2n^2$ электронов:

- первый слой ($n = 1$) – 2 электрона;
- второй слой ($n = 2$) – 8 электронов;
- третий слой ($n = 3$) – 18 электронов и т. д.

Но в слое орбиты немного отличаются, немного отличаются и энергии, поэтому в спектре атома все линии дискретны. Самые ближние орбиты электронов называются *основными*, на них электроны могут находиться очень долго, а более удаленные – *возбужденными*. Здесь электрон долго находиться не может. Электрон при поглощении фотона (кванта электромагнитного поля) может переходить с основной орбиты на более удаленную (не устойчивую, возбужденную орбиты). Но через некоторое время электрон испускает фотон и возвращается на основную устойчивую орбиту. Каждой орбите электрона соответствует определённый уровень энергии. Совокупность уровней энергии образует энергетический спектр атома. Они несут информацию об атомной структуре вещества.

1.2.2. Химическая связь

Такие газы, как гелий, аргон, неон – одноатомные. Большинство веществ в природе существует в виде молекул, состоящих из нескольких атомов. В молекуле между атомами возникают различные связи.

Под *химической связью* понимают взаимодействие между атомами, обусловленное совместным использованием их электронов.

Главные особенности химической связи:

1. Значение полной энергии многоатомной системы меньше чем сумма энергий несвязанных атомов, из которых она образована.

2. Электронная плотность в поле связи заметно отличается от плотности электронов в несвязанных атомах.

Природа химической связи определяется электрическим кулоновским взаимодействием ядер и электронов. При образовании связи *электроны* распределяются так, что силы, стремящиеся сблизить и оттолкнуть ядра, уравниваются.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся связи в молекулах: ковалентную, ионную, металлическую и молекулярную.

Ковалентная связь возникает при обобществлении электронов двумя соседними атомами. Обобществление ведёт к формированию общей для связывающихся атомов электронной пары. Ковалентная связь осуществляется в молекулах H_2 , O_2 , CO и т. д. Рассмотрим её образование на примере молекулы водорода (рис. 1.2).

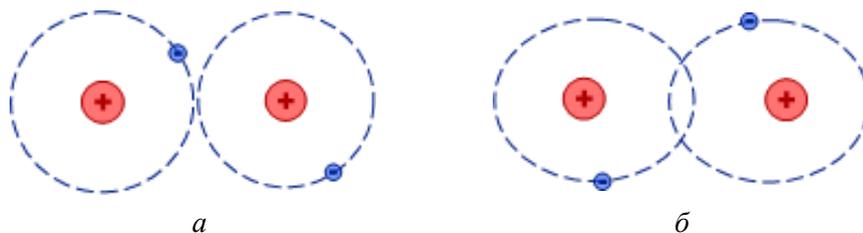


Рис. 1.2. Схематическое изображение образования ковалентной связи между двумя атомами водорода

У атомов водорода всего по одному электрону, которые вращаются по строго определённым орбитам, которые соответствуют устойчивому состоянию атома (рис. 1.2, а). При сближении атомов возникает устойчивая система – молекула H_2 (рис. 1.2, б). Причём орбиты обоих электронов проходят так, что они, вращаясь на орбите одного атома, пересекают в течение некоторого времени другой атом.

Молекулы, в которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, являются неполярными. Если же в молекулах центры противоположных по знаку зарядов не совпадают, то такие молекулы называются полярными или дипольными.

Ионная связь – тип химической связи, энергия которой определяется кулоновскими силами притяжения противоположно заряженных ионов. Образование ионной связи рассмотрим на примере молекулы $NaCl$ (рис. 1.3). При образовании ионной связи единственный электрон на внешней орбите Na переходит на одну из орбит Cl .

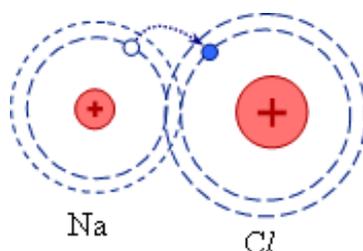


Рис. 1.3. Схема образования ионной связи в молекуле $NaCl$

Признаком соединений с ионной связью является свойство разлагаться на ионы в полярных растворителях (например, в воде).

Металлическая связь характерна для металлов и приводит к образованию твёрдых кристаллических тел. Металлы можно рассматривать как системы, построенные из положительных ионов в узлах решётки, находящихся в среде свободных электронов (рис. 1.4).

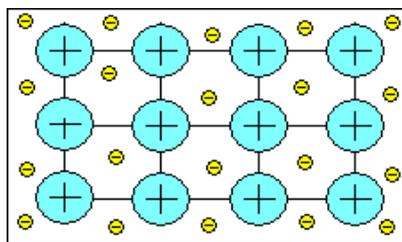


Рис. 1.4. Схема строения металла

Между положительными ионами и электронами возникает сила притяжения. Электроны равномерно распределены по всему металлу и как клей удерживают положительные ионы. Наличием свободных электронов объясняется высокая электропроводность и теплопроводность металла.

Молекулярная связь существует в некоторых веществах между молекулами с ковалентными связями (рис. 1.5). При сближении двух молекул с ковалентной связью валентные электроны в обеих молекулах начинают вращаться согласованно, и между молекулами возникает сила притяжения. Молекулярная связь наблюдается, например, в парафине, который имеет низкую температуру плавления, свидетельствующую о непрочности этой связи.

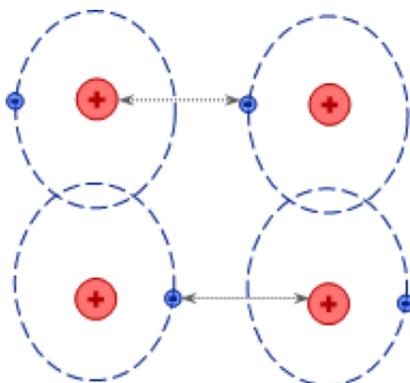


Рис. 1.5. Схематическое изображение молекулярной связи

2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Электротехнические материалы характеризуются особыми свойствами в электрическом или магнитном поле. Электротехнические материалы могут подвергаться воздействиям как отдельно электрических и магнитных полей, так и их совокупности. Здесь рассматривается только отдельное воздействие электрических и магнитных полей.

Электротехнические материалы в электрическом поле подразделяются на *диэлектрики*, *проводники* и *полупроводники*, а в магнитном поле – на *сильномагнитные* и *слабوماгнитные*.

Различие между проводниками, диэлектриками и полупроводниками наиболее наглядно иллюстрируется с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердого тела. Рассмотрим некоторые положения этой теории. Атомы состоят из ядра, окруженного электронами, вращающимися вокруг него по строго определенным орбитам (рис. 2.1). Энергия электронов, находящихся на разных орбитах, различна; она увеличивается с увеличением расстояния от ядра. Электроны, находящиеся на внешних орбитах, называются валентными.

Ближайшие разрешенные орбиты электроны занимают в нормальном состоянии атома, на удаленных орбитах они могут находиться лишь в случаях, когда атом испытывает внешнее энергетическое воздействие, например, при захвате фотона (если энергия фотона W_{ϕ} больше или равна разнице энергий электрона на этих орбитах ΔW). Такое состояние атома называется возбужденным, находится в нем атом всего 10^{-10} с. Стремясь прийти к устойчивому состоянию, атом излучает избыток энергии в виде фотона с энергией W_{ϕ} , и электрон возвращается на свою орбиту.

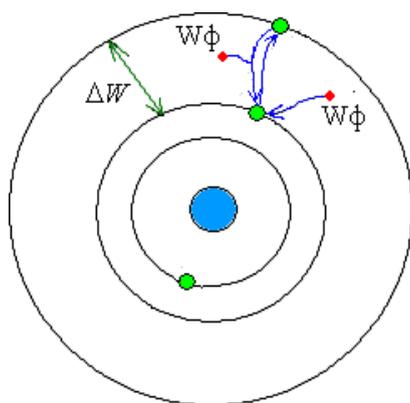


Рис. 2.1. Схематическое изображение атома и перехода атомов в возбужденное состояние (при поглощении фотона)

Дискретность значений энергий электронов в изолированном атоме подтверждается характером спектров поглощения и излучения различных веществ. Спектры атома имеют определенные линии, соответствующие переходу электронов атома с одной орбиты на

другую. Такой спектр характерен для вещества, находящегося в газообразном состоянии, когда атомы расположены относительно друг друга на большом расстоянии и не взаимодействуют между собой. Энергетические состояния атомов можно наглядно изобразить в виде энергетической диаграммы атома (рис. 2.2, а), в которой по вертикали отложены значения энергий электронов на орбитах.

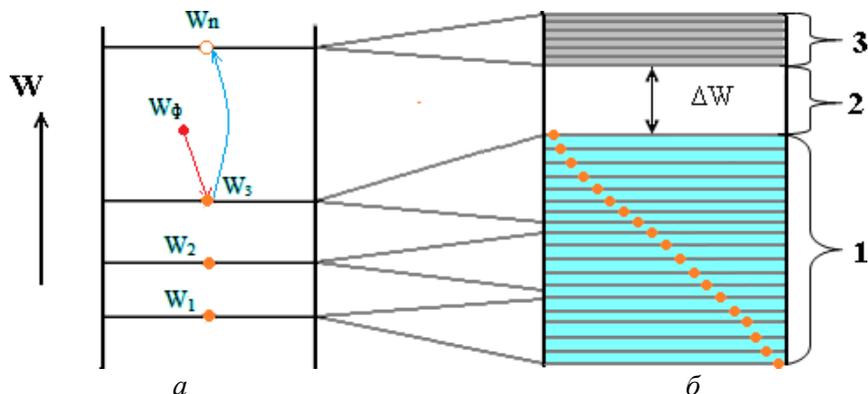


Рис. 2.2. Энергетические диаграммы изолированного атома (а) и твердого тела (б) при температуре $T \approx 0$ К

При объединении атомов в твердом теле начинает проявляться взаимодействие атомов между собой. В результате все энергетические уровни атомов (заполненные и незаполненные электронами) расщепляются, и из отдельных энергетических уровней образуются целые зоны энергетических уровней (рис. 2.2, б). Причем чем больше атомов в твердом теле, тем большее количество отдельных уровней имеет зона. В результате расщепления в твердом теле можно различить 3 зоны (рис. 2.2, б):

- 1 – заполненная электронами зона;
- 2 – запрещенная зона шириной ΔW (значения энергии, которыми электроны в данном твердом теле обладать не могут);
- 3 – зона проводимости (свободная зона). Электроны, находящиеся в этой зоне, обуславливают протекание электрического тока.

Классификация материалов по электрическим свойствам

С точки зрения зонной теории все материалы можно подразделить на три основные группы: *диэлектрики*, *проводники* и *полупроводники* (рис. 2.3).

У *диэлектрика* запрещенная зона настолько велика ($\Delta W \geq 3,0$), что свободные электроны практически не возникают и электроны в обычных условиях не наблюдаются, так как энергию $\Delta W \geq 3,0$ эВ имеют лишь фотоны космических лучей и радиоактивного излучения.

В большинстве учебников в качестве границы между диэлектриками и полупроводниками взята энергия $\Delta W = 3$ эВ [1; 4; 6], однако широко распространенные в

электроэнергетике полупроводники ZnO ($\Delta W = 3,2$ эВ) и карборунд SiC ($\Delta W = 2,8...3,1$ эВ) будут тогда относиться к диэлектрикам, поэтому более точным, по мнению Ю.В. Корицкого, следует считать значение $\Delta W = 3,5$ эВ [8].

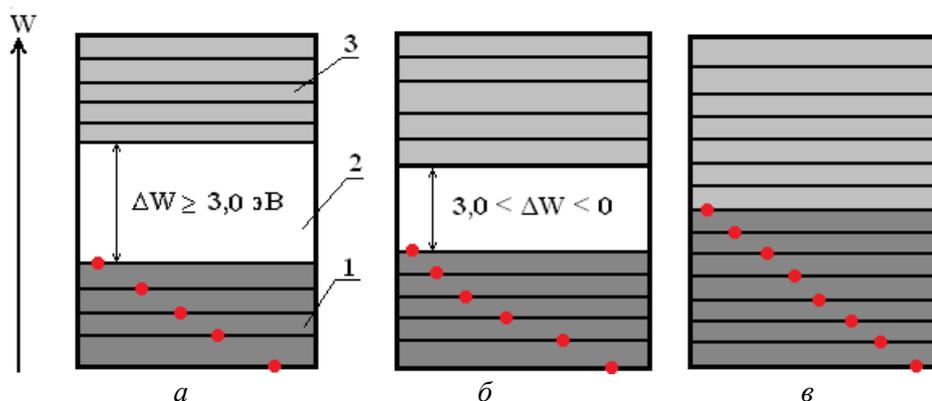


Рис. 2.3. Энергетические диаграммы диэлектриков (а), полупроводников (б), проводников (в):
 1 – заполненная электронами зона; 2 – запрещённая зона шириной ΔW ;
 3 – зона свободных энергетических уровней

Полупроводники имеют узкую запрещенную зону ($3,0 < \Delta W < 0$), которая может быть преодолена за счет внешних воздействий (облучение полупроводника, нагрев и т. д.), и у материала появляется проводимость.

У проводников заполненная электронами зона вплотную прилегает к зоне проводимости или даже перекрывается ею ($\Delta W \leq 0$). Вследствие этого электроны из заполненной зоны свободно могут переходить на занятые уровни зоны проводимости под влиянием слабой напряженности электрического поля и вызывать протекание тока.

Классификация материала по магнитным свойствам

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает магнитный момент. Если взять катушку и помещать в нее сердечники из разных материалов, то магнитное поле, возникающее внутри сердечника, будет усиливать или ослаблять внешнее поле в μ раз. По магнитным свойствам все материалы можно разделить на две группы: слабомагнитные ($\mu \approx 1$) и сильномагнитные ($\mu \gg 1$). Слабомагнитные материалы в технике применяются редко, поэтому их рассматривать не будем. В электроэнергетике в качестве магнитных материалов используются лишь материалы, у которых $\mu \gg 1$.

В данной главе нами будут рассмотрены следующие группы материалов:

1. Диэлектрики;
2. Полупроводники;
3. Проводники;
4. Магнитные материалы ($\mu \gg 1$).

2.2. ДИЭЛЕКТРИКИ

2.2.1. Общие сведения о диэлектриках

Как уже отмечалось ранее, к диэлектрикам относятся материалы, которые имеют удельное сопротивление $\rho > 10^8$ Ом · м или ширину запрещенной зоны $\Delta W \geq 3,0$ эВ (рис. 2.3, а).

Основным, характерным для любого диэлектрика процессом, возникающим при воздействии на него электрического поля, является *поляризация*.

2.2.2. Поляризация диэлектриков

Поляризация – это ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул.

Заряд конденсатора в вакууме Q_0 (рис. 2.4, а) будет:

$$Q_0 = C_0 U,$$

где C_0 – ёмкость конденсатора в вакууме; U – напряжение, приложенное к диэлектрику.

Если между пластинами конденсатора поместить диэлектрик (рис. 2.4, б), тогда заряд конденсатора будет

$$Q = CU,$$

где C – ёмкость конденсатора; U – напряжение, приложенное к диэлектрику.

Заряд конденсатора Q разобьём на две составляющие:

$$Q = Q_0 + Q_d,$$

где Q_0 – заряд конденсатора, если бы его пластины разделял вакуум; Q_d – дополнительный заряд, обусловленный поляризацией.

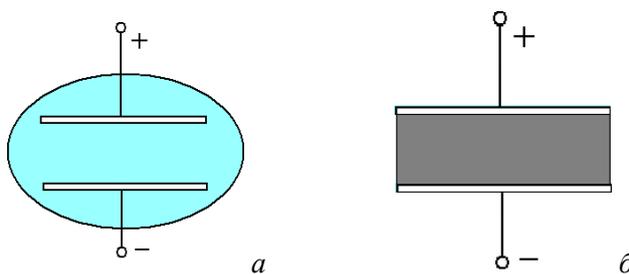


Рис. 2.4. Конденсатор в вакууме (а) и с диэлектриком (б)

Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика

$$\varepsilon_r = Q / Q_0 = (Q_0 + Q_d) / Q_0 = 1 + Q_d / Q_0.$$

Из этого выражения следует, что относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества больше единицы и равна единице только в случае вакуума (в дальнейших

расчетах для удобства будем обозначать относительную диэлектрическую проницаемость без индекса ϵ).

Количественной характеристикой поляризации служит также *поляризованность* диэлектрика. Поляризованностью P называют векторную физическую величину, равную отношению электрического момента dp элемента диэлектрика к объему dV этого элемента и выражаемую в кулонах на m^2 (Кл/ m^2):

$$P = dp / dV.$$

Виды поляризации

Все виды поляризации можно разбить на две группы:

1) упругую (быструю, мгновенную), совершающуюся в диэлектрике без рассеяния энергии, т. е. без выделения тепла;

2) неупругую (медленную), сопровождаемую рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. с выделением тепла. Её ещё называют релаксационной поляризацией.

Рассмотрим основные виды поляризации. Поляризация без потерь бывает двух видов: электронная и ионная.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Объясним этот механизм поляризации на примере поляризации атома (рис. 2.5). Перед приложением внешнего электрического поля положительные и отрицательные заряды в атоме распределены так, что внешне атом проявляет себя как электрически нейтральный. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов при этом совпадают.

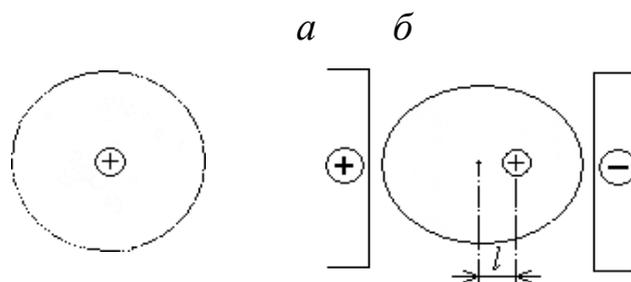


Рис. 2.5. Электронная поляризация атома: *a* – атом вне поля; *б* – атом в электрическом поле (*l* – смещение центров положительных и отрицательных зарядов)

При воздействии внешнего электрического поля симметрия в распределении зарядов нарушается и возникает *индуцированный электрический момент*. Центр тяжести положительных зарядов при этом смещается в направлении напряженности внешнего поля, а центр тяжести отрицательных зарядов – в противоположном направлении. Такой механизм поляризации называется **электронной поляризацией**. Смещение центра тяжести отрицательных зарядов пропорционально напряженности внешнего поля.

Такая поляризация происходит у всех диэлектриков независимо от их агрегатного состояния и существования в них других видов поляризации. Диэлектрики, у которых имеет

место только электронная поляризация, называются неполярными диэлектриками. Диэлектрическая проницаемость газообразных диэлектриков мало отличается от 1, а для неполярных, жидких и твёрдых диэлектриков не превышает 2,5, её можно определить как $\epsilon = n^2$, где n – показатель преломления света в диэлектрике.

Время установления поляризации ничтожно мало и составляет 10^{-15} с, поэтому электронную поляризацию называют мгновенной. Этот вид поляризации не зависит от частоты вплоть до $10^{14} \dots 10^{16}$ Гц (рис. 2.6, а).

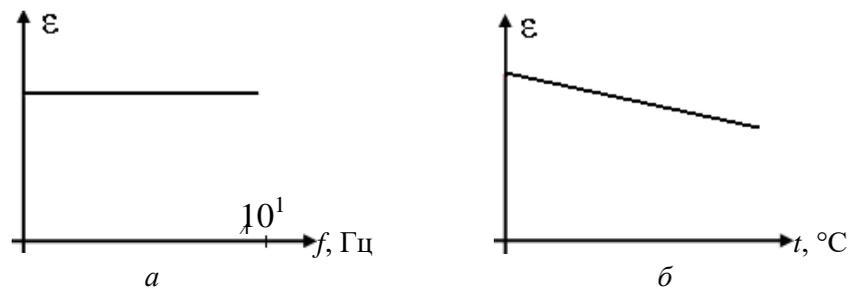


Рис. 2.6. Зависимости $\epsilon = \varphi(f)$ и $\epsilon = f(t)$ для электронной поляризации

С увеличением температуры (рис. 2.6, б) диэлектрическая проницаемость ϵ уменьшается за счет расширения тела. Однако уменьшение это незначительно, так как мал температурный коэффициент расширения диэлектрика.

Изменение диэлектрической проницаемости при повышении температуры характеризуется температурным коэффициентом:

$$\text{TK}_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{d\epsilon}{dt}.$$

Смещение диэлектриков при электронной поляризации носит упругий характер, при исчезновении электрического поля электроны возвращаются в своё исходное состояние, причём весь процесс происходит без рассеяния энергии.

Ионная поляризация возникает в кристаллических диэлектриках, построенных из положительных и отрицательных ионов, имеющих плотную упаковку. Сущность её заключается в смещении ионов электрическим полем: положительных – в сторону отрицательного электрода, отрицательных – в сторону положительного электрода (рис. 2.7).

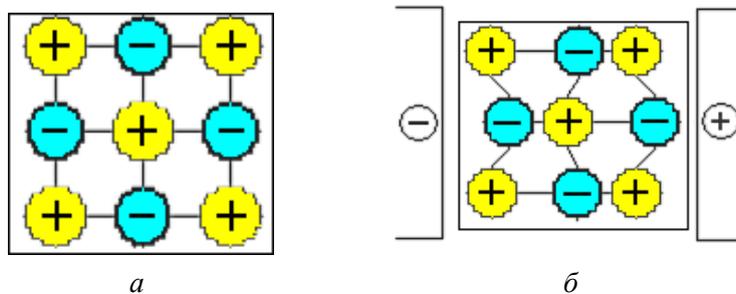


Рис. 2.7. Ионная поляризация в твёрдых диэлектриках ионной структуры с плотной упаковкой:
а – диэлектрик вне поля; б – диэлектрик в электрическом поле

В диэлектриках с плотной упаковкой эти смещения невелики, так как малы расстояния между ионами. Смещения носят упругий характер, с исчезновением электрического поля ионы возвращаются на место, процесс происходит без рассеяния энергии. Ионная поляризация накладывается на электронную и приводит к увеличению поляризованности, а, следовательно, к диэлектрической проницаемости.

Время установки ионной поляризации несколько больше, чем электронной, это объясняется большей массой ионов. Однако оно мало (10^{-13} с), что обеспечивает независимость диэлектрической проницаемости от частоты вплоть до 10^{13} Гц (рис. 2.8, а).

С увеличением температуры увеличивается расстояние между ионами. Это приводит к ослаблению упругих сил связи между ионами, к увеличению их смещения в электрическом поле, причем увеличение ε за счет смещения намного больше, чем уменьшение ε за счет теплового расширения. Поэтому ε ионных кристаллов с ростом температуры увеличивается (рис. 2.8, б).

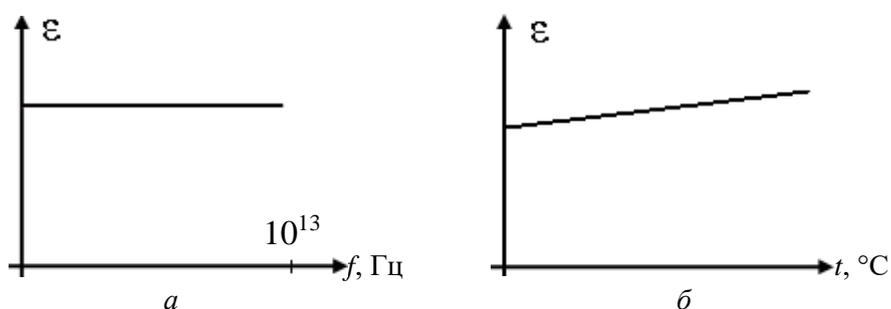


Рис. 2.8. Зависимости $\varepsilon = \varphi(f)$ и $\varepsilon = f(t)$ для ионной поляризации

Если индуцированный электрический момент возникает в результате смещения слабосвязанных частиц (электронов или ионов), которые не связаны упругими силами, или в результате ориентации постоянных диполей в направлении внешнего поля, то реакция этих частиц на изменения внешнего поля уже не такая быстрая, как в случае поляризации упругого типа. После исчезновения внешнего поля частицы возвращаются в исходное положение не мгновенно, а через определенное время, и не под действием упругих сил связи, а в результате хаотического теплового движения. Такие механизмы поляризации называются *релаксационными* и характерны тем, что сопровождаются потерями электрической энергии и сильно зависят от интенсивности теплового движения, т. е. от температуры. В узком смысле релаксационной поляризацией считается такая поляризация, при которой зависимость поляризованности от времени после приложения или снятия внешнего постоянного поля имеет экспоненциальный характер и описывается следующими выражениями:

поляризованность растет во времени после приложения поля:

$$P_r(t) = P_{r\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (2.1)$$

где $P_r(t)$ – релаксационная поляризованность в момент t ; $P_{r\infty}(t)$ – релаксационная поляризованность в установившемся состоянии; T – постоянная времени; e – основание натуральных логарифмов ($e = 2,718$);

– релаксационная поляризованность уменьшается после снятия внешнего поля:

$$P_r(t) = P_{r\infty} \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (2.2)$$

Важным параметром процесса релаксационной поляризации является *постоянная времени* T . Она равна времени, за которое релаксационная поляризованность после снятия электрического поля уменьшается до $1/e$, т. е. приблизительно до 37% первоначального уровня.

Релаксационной (неупругой) поляризации в диэлектриках несколько типов: *дипольная*, *ионно-релаксационная*, *миграционная*, *спонтанная* (самопроизвольная) и др. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся виды релаксационных поляризаций.

Дипольная поляризация. Некоторые молекулы из-за несимметричной структуры поляризованы без воздействия внешнего поля, т. е. у них не совпадают центры положительных и отрицательных зарядов. Такие молекулы называются диполями (рис. 2.9, *а*), изобразим их для простоты вектором (рис. 2.9, *б*).



Рис. 2.9. Диполь (*а*) и его упрощенное изображение (*б*)

Полярная молекула имеет собственный электрический момент (дипольный момент) $p = q \ell$. Без электрического поля сумма дипольных моментов всех молекул равна нулю, потому что полярные молекулы расположены в пространстве неупорядоченно, хаотично вследствие теплового движения молекул диэлектрика; следовательно, отдельные дипольные моменты направлены в разные стороны (рис. 2.10, *а*).

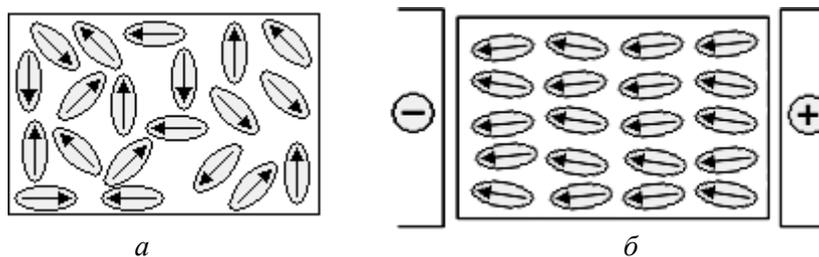


Рис. 2.10. Дипольная поляризация: *а* – полярный диэлектрик вне поля; *б* – полярный диэлектрик в электрическом поле

Если диполь поместить во внешнее поле, то он ориентируется по полю (рис. 2.10, *б*), одновременно у него увеличится расстояние ℓ между центрами зарядов.

Фактически вследствие теплового движения расположение диполей в пространстве будет постоянно изменяться, но эффект упорядоченности сохраняется. В диэлектриках с малой плотностью и сравнительно малыми размерами молекул (газы, жидкости) в

электрическом поле происходит непосредственный поворот самих молекул. В твердых диэлектриках поворот молекул невозможен, но входящие в их структуру отдельные дипольные группы атомов (гидроксильная – OH, карбонильная – CO и др.) могут менять свою ориентацию вслед за полем без нарушения их связи с молекулами, без отрыва от них.

Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков $\varepsilon > 3,5$, причём у жидких полярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость достигает значительно больших величин ($\varepsilon = 81$ у воды), чем у полярных твёрдых диэлектриков. Это объяснимо: в жидких диэлектриках молекулы поворачиваются целиком, а в твёрдых – лишь меняют ориентацию дипольной группы. Полярными являются некоторые газы: аммиак, пары воды и спиртов и т. д. Однако из-за больших расстояний между молекулами в газах во время поляризации диполи не мешают повороту друг друга, и дипольная поляризация в газах не сопровождается диэлектрическими потерями. А вот в жидких и твёрдых диэлектриках поворот диполей в направлении поля требует преодоления сопротивления соседних молекул, поэтому дипольная поляризация связана с потерями энергии.

Для дипольной поляризации характерна зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и частоты. Повышение температуры действует на дипольную поляризацию двояко: за счет ослабления межмолекулярных связей ориентация диполей облегчается, а за счёт усиления теплового движения – затрудняется, так как сильное тепловое хаотическое движение будет мешать упорядоченному расположению молекул. У диэлектрика есть оптимум, где ε максимально. При нагревании до температуры t_1 решающее значение имеет первый фактор и за счет снижения вязкости жидкого диэлектрика облегчается ориентация диполей по полю, а после температуры t_1 все сильнее сказывается хаотическое движение молекул, которое затрудняет ориентацию диполей (рис. 2.11, а).

Дипольная поляризация зависит также от частоты. Дело в том, что для ориентации диполя требуется время, называемое временем релаксации T . В переменном поле, если $T/2 < T$, то диполи не успевают ориентироваться по полю, и диэлектрическая проницаемость уменьшается (здесь T – период частоты переменного поля). На рисунке 2.11, б показана зависимость относительной диэлектрической проницаемости полярной жидкости от частоты при постоянной температуре.

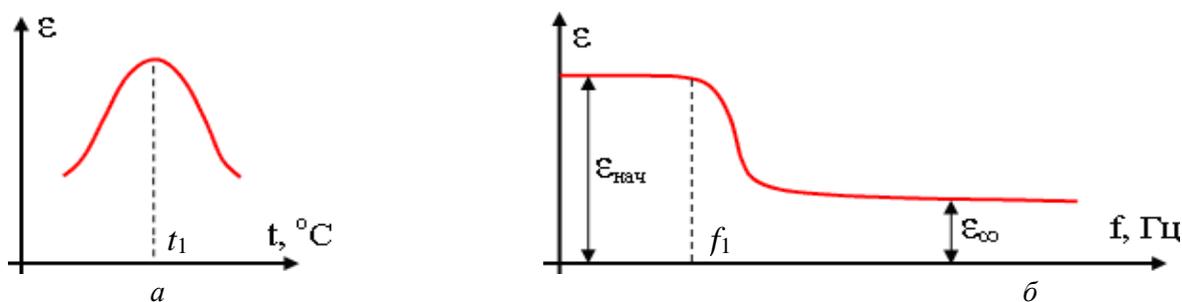


Рис. 2.11. Зависимости $\varepsilon = f(t)$ и $\varepsilon = \varphi(f)$ для полярного диэлектрика

До значения частоты f_1 диполи успевают за изменениями частоты, и ε остаётся постоянной, а при дальнейшем увеличении частоты начинается снижение диэлектрической

проницаемости и при высоких частотах дипольная поляризация практически полностью исключается.

Ионно-релаксационная поляризация наблюдается в некоторых твёрдых неорганических диэлектриках с неплотной упаковкой ионов (например, в неорганических стеклах). Она заключается в переброске электрическим полем слабосвязанных ионов (обычно ионов примесей) в ходе тепловых колебаний из положений временного закрепления в новое положение закрепления. Эти перемещения превосходят расстояния соответствующие, ионной поляризации смещения. Эти перескоки возможны во время сильных тепловых колебаний. Под воздействием электрического поля они получают направленные перемещения: положительно заряженные ионы – в сторону отрицательного электрода, отрицательные – в сторону положительного электрода (рис. 2.12). Особенностью этих ионов является то, что они не уходят от первоначального своего положения, не становятся свободными, т. е. ионами электропроводности, определяющими ток утечки. В результате переброски слабосвязанных ионов в диэлектриках образуются пространственные заряды, создающие электрический момент и увеличивающие диэлектрическую проницаемость.

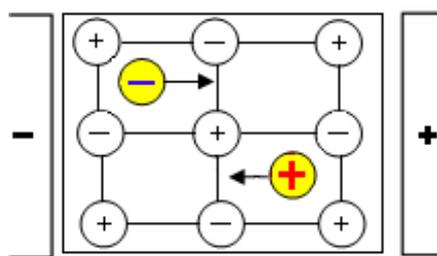


Рис. 2.12. Ионнорелаксационная поляризация

Влияние температуры и частоты для некоторых диэлектриков аналогично их влиянию на дипольную поляризацию, однако это влияние значительно менее выражено. Для примера, на рисунке 2.13, *а* приведена зависимость $\epsilon = f(t)$ для керамического конденсатора.

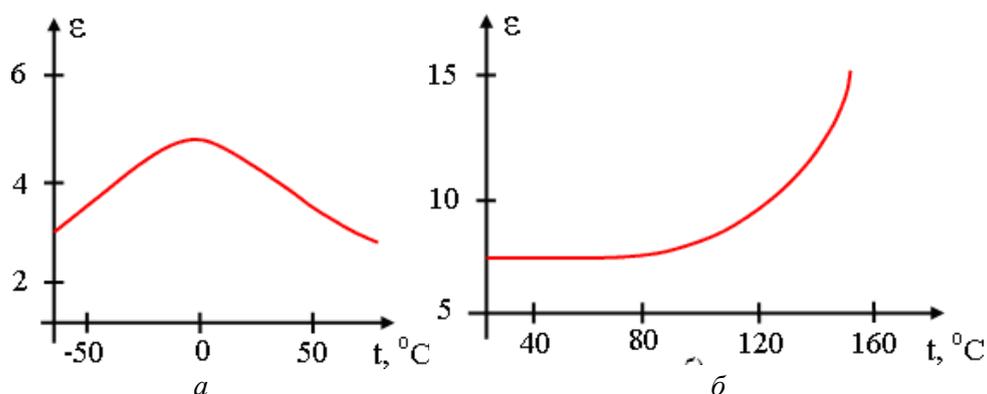


Рис. 2.13. Зависимости $\epsilon = f(t)$ для керамики (*а*) и натриево-силикатного стекла (*б*)

Ионно-релаксационная поляризация сильно зависит от плотности упаковки ионов диэлектрика. У некоторых диэлектриков с ростом температуры число ионов, перемещаемых

в новые положения, постоянно увеличивается, поэтому диэлектрическая проницаемость растёт (рис. 2.13, б).

Миграционная поляризация наблюдается в неоднородной, в частности слоистой изоляции, состоящей из диэлектриков с различными значениями электрических параметров (диэлектрической проницаемости ϵ и удельной проводимости γ). Рассмотрим случай с двухслойной изоляцией (рис. 2.14).

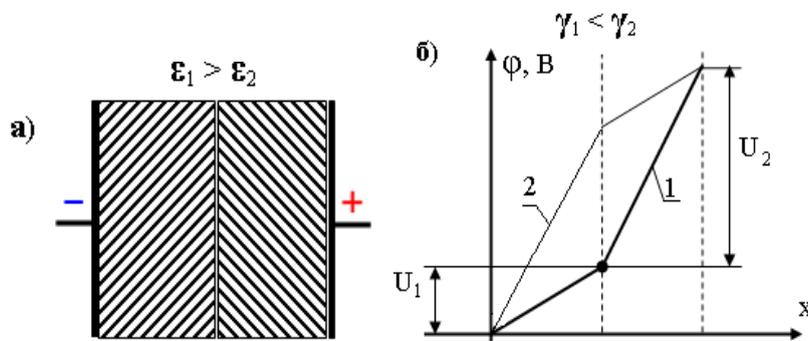


Рис. 2.14. Двухслойный диэлектрик и распределение потенциалов в нём:
1 – начальный момент; 2 – по окончании процесса

В момент включения напряжения в двухслойном диэлектрике распределение напряжённости электрического поля будет следующим:

$$E_1/E_2 = \epsilon_2/\epsilon_1,$$

где E_1 и E_2 – напряжённости; ϵ_1 и ϵ_2 – диэлектрические проницаемости в слоях диэлектрика. Первоначально $E_1 < E_2$, но при таком распределении не будут равны плотности токов в диэлектриках:

$$j_1 = \gamma_1 \cdot E_1 < j_2 = \gamma_2 \cdot E_2.$$

Это приведёт к тому, что на границе между диэлектриками будет накапливаться положительный заряд. Этот процесс закончится, когда $j_1 = j_2$. Обычно он продолжается 1...3 мин и приводит к новому распределению напряжения между слоями (кривая 2 на рис. 2.14) и увеличению диэлектрической проницаемости ϵ . В переменном поле в изоляции будет всё время наблюдаться ток добавочной миграционной поляризации и добавочные потери в диэлектрике.

Самопроизвольная поляризация характерна для особого класса твёрдых диэлектриков – сегнетоэлектриков, получивших своё название от сегнетовой соли, у которой впервые были обнаружены эти свойства. В сегнетоэлектриках имеются области (домены), обладающие поляризацией в отсутствие внешнего поля (рис. 2.15, а). В электрическом поле домены начинают ориентироваться по полю, это даёт эффект очень сильной поляризации.

В переменном поле происходит постоянная переориентация доменов по полю, что требует значительных энергозатрат. Это объясняет большое значение $\text{tg } \delta$ у сегнетоэлектриков. Сегнетоэлектрики обладают нелинейными свойствами: диэлектрическая проницаемость у них сильно зависит от напряжённости электрического поля. При некотором значении напряжённости наступает насыщение, т. е. все домены уже ориентированы по полю и дальнейшее увеличение напряжённости уже не увеличивает поляризацию.

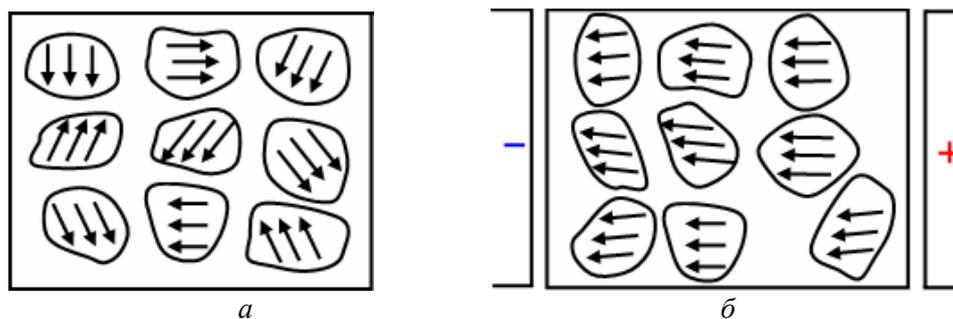


Рис. 2.15. Самопроизвольная поляризация:
a – сегнетоэлектрик вне поля; *б* – сегнетоэлектрик в электрическом поле

Если на сегнетоэлектрик подать переменное напряжение, то зависимость $Q = f(U)$ приобретает характерную форму петли гистерезиса (рис. 2.16, *a*).

Для сегнетоэлектриков характерна также сильная зависимость от температуры (рис. 2.16, *б*). Увеличение температуры приводит к ослаблению сил, препятствующих ориентации доменов, и диэлектрическая проницаемость растет. Однако при температуре T_K , которая получила название точка Кюри, доменная структура сегнетоэлектрика разрушается, и диэлектрическая проницаемость для сегнетоэлектрика резко падает.

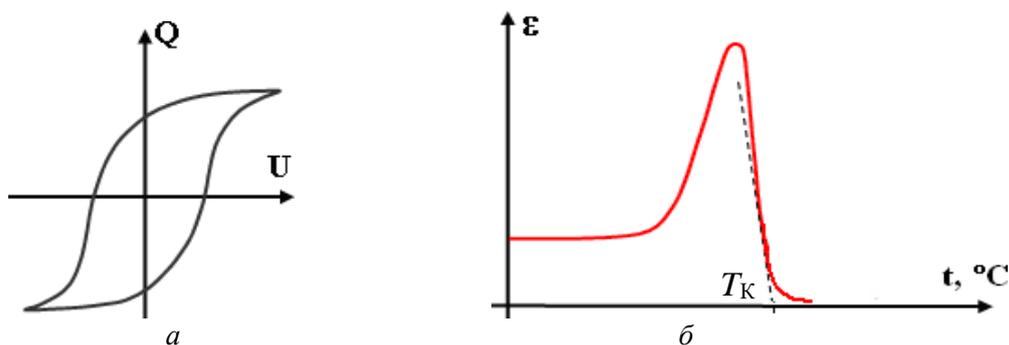


Рис. 2.16. Петля диэлектрического гистерезиса (*a*) и зависимость $\varepsilon = f(t)$ для сегнетоэлектрика (*б*)

Классификация диэлектриков по виду поляризации

Все диэлектрики можно подразделить на следующие основные группы:

1. неполярные или слабополярные;
2. Полярные;
3. Твёрдые неорганические диэлектрики: а) с плотной упаковкой ионов, б) с неплотной упаковкой ионов;
4. Сегнетоэлектрики;
4. Слоистые диэлектрики.

К первой группе можно отнести диэлектрики, обладающие в основном электрической поляризацией. Сюда относятся:

- твёрдые вещества (парафин, сера, полистирол, полиэтилен, фторопласт-4, алмаз);

- жидкости (бензол, тетраформ (CCL₄));
- газы (водород, гелий, азот, метан).

Ко второй группе относятся диэлектрики, обладающие одновременно электронной и дипольно-релаксационной поляризациями:

- твердые (целлюлоза);
- жидкие (маслоканифольный компаунд, совол);
- газы (аммиак, пары воды и спиртов);

К третьей группе – твердым диэлектрикам относятся:

а) с плотной упаковкой ионов – диэлектрики с электронной и ионной поляризациями (кварц, смола, каменная соль, корунд, рутил);

б) с неплотной упаковкой ионов – диэлектрики с электронной, ионной и ионно-релаксационной поляризацией. К этой подгруппе относится фарфор, микалекс (основа – слюда со стеклом), неорганические стекла.

К четвертой группе относятся сегнетоэлектрики, у которых спонтанная, электронная, ионно-релаксационная поляризации. К этой группе относится сегнетовая соль, метатитанат бария, титанат бария и др.

Пятую группу слоистых диэлектриков представляет слоистая изоляция. Она широко применяется в энергетике: изоляция трансформаторов, кабелей, конденсаторов, проходных изоляторов и т. д. Это может быть бумажно-масляная, маслобарьерная или бумага, пропитанная маслоканифольным компаундом.

Диэлектрическая проницаемость газов

Газообразные вещества имеют малые плотности вследствие больших расстояний между молекулами, поэтому диэлектрическая проницаемость всех газов незначительна и близка к единице ($\epsilon \approx 1,00007 \dots 1,0014$). У газов могут быть только два вида поляризации: электронная и дипольная. Однако и для полярных газов основное значение имеет электронная поляризация. А для неполярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx n^2$, где n – показатель преломления света в диэлектрике.

Диэлектрическая проницаемость газа зависит от температуры. Температурный коэффициент для газов отрицателен. Дело в том, что при $P = \text{const}$ при увеличении температуры в объеме газа уменьшается количество молекул (см. рис. 2.6, б).

Для воздуха при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $TK_\epsilon = -2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Диэлектрическая проницаемость газов не зависит от частоты (рис. 2.6, а) до $10^{14} \dots 10^{16}$ Гц, так как электронная поляризация успевает почти за любой частотой.

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики делятся на *неполярные* и *полярные*.

В *жидких неполярных диэлектриках* только один вид поляризации – это электронная поляризация. К ним относится бензол, толуол, четыреххлористый углерод и т. д. Значения диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей невелики и близки к значению квадрата показателя преломления света: $\epsilon \approx n^2$, обычно она не превышает $\epsilon \leq 2,5$.

Зависимость диэлектрической проницаемости неполярной жидкости от температуры связана с уменьшением числа молекул в единице объема, поэтому

$$TK_\epsilon \approx -\beta,$$

где β – температурный коэффициент объемного расширения жидкости. Затем при дальнейшем увеличении температуры до $t_{\text{кип}}$ (рис. 2.17, а) ϵ падает примерно до $\epsilon \approx 1$.

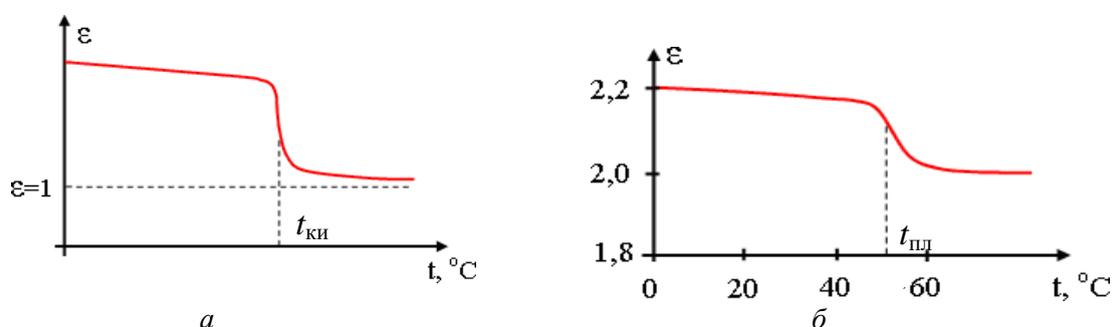


Рис. 2.17. Зависимости $\epsilon = f(t)$ для неполярного жидкого диэлектрика (а) и парафина (б)

Диэлектрическая проницаемость не зависит от частоты, так как электронная поляризация успевает почти за любой частотой (см. рис. 2.6, а).

В *жидких полярных диэлектриках* два вида поляризации (электронная и дипольная), поэтому для них $\epsilon > n^2$ и превышает $\epsilon > 3,5$. У сильнополярных жидкостей значение диэлектрической проницаемости очень высоко: у воды $\epsilon \approx 81$, у спирта $\epsilon = 33$.

На зависимость ϵ от температуры основное влияние оказывает дипольная поляризация, поэтому она имеет максимум при температуре t_1 . На рисунке 2.18, а приведена зависимость $\epsilon = f(t)$ для совола.

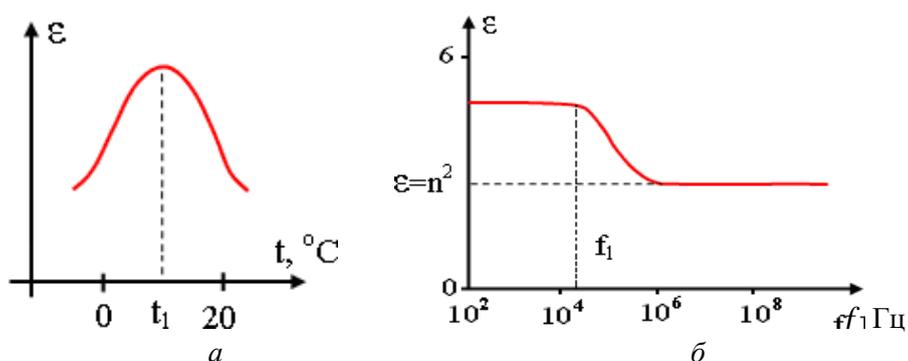


Рис. 2.18. Зависимость $\epsilon = f(t)$ и $\epsilon = \varphi(f)$ для полярного диэлектрика

На рисунке 2.18, б показано как частота влияет на диэлектрическую проницаемость ε совола. При низких частотах диполи успевают за частотой, а при большой частоте диэлектрическая проницаемость уменьшается до значения, обусловленного электронной поляризацией $\varepsilon \approx n^2$.

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

В твердых диэлектриках возможны все виды поляризации.

В неполярных твердых диэлектриках может быть только электронная поляризация. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon \approx n^2$.

При нагревании из-за расширения твердого диэлектрика диэлектрическая проницаемость уменьшается. На рисунке 2.17, б приведена зависимость $\varepsilon = f(t)$ для парафина. При переходе парафина из твердого состояния в жидкое (температура плавления 54 °С) происходит резкое уменьшение диэлектрической проницаемости вследствие сильного понижения плотности вещества.

Диэлектрическая проницаемость твердых неполярных диэлектриков не зависит от частоты (см. рис. 2.6, а).

Для полярных твердых диэлектриков характерны те же закономерности, что и для полярных жидкостей. У них диэлектрическая проницаемость $\varepsilon > n^2$, однако, среди них нет таких сильно полярных диэлектриков с большой диэлектрической проницаемостью, как вода и спирт.

К полярным твердым диэлектрикам относятся материалы на основе целлюлозы (бумага, картон). Также к ним относятся полимеры (органическое стекло), полиамиды (капрон, полисульфон), фенолоформальдегидные смолы (бакелит), каучуковые материалы (эбонит) и т. д. Диэлектрическая проницаемость их обычно лежит в диапазоне $\varepsilon = 3 \dots 7$.

Температура на дипольную поляризацию действует двояко. Однако увеличение ε с увеличением температуры не так значительно по сравнению с полярными жидкостями (рис. 2.18, а).

Влияние частоты на полярный диэлектрик такое же, как и на полярную жидкость (рис. 2.18, б). Однако снижение ε с увеличением частоты не так значительно по сравнению с полярными жидкостями.

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с плотной упаковкой ионов, обладают электронной и ионной поляризациями и имеют диапазон изменения диэлектрической проницаемости значительно шире чем полярная. Поэтому диэлектрическая проницаемость $\varepsilon > n^2$ (например, для каменной соли $n^2 = 2,37$, а $\varepsilon = 6$; у рутила $n^2 = 7,3$, а $\varepsilon = 110$). Диэлектрическая проницаемость ионных кристаллов не зависит от частоты, так как время установления ионной поляризации порядка 10^{-13} с, и она успевает за частотой до $10^{12} \dots 10^{13}$ Гц (см. рис. 2.8, а).

Для большинства ионных кристаллов с увеличением температуры ϵ увеличивается (рис. 2.8, б). Это вызвано тепловым расширением кристаллов и ослаблением связей между ионами и потому приводит к увеличению их смещения. Исключением являются кристаллы, содержащие ионы титана. У них с увеличением температуры ϵ уменьшается.

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с *неплотной упаковкой ионов*, в которых присутствует, помимо электронной и ионной, также и ионно-релаксационная поляризация, характеризуются в большинстве случаев сравнительно невысоким значением диэлектрической проницаемости. К ним относится фарфор $\epsilon \approx 6 \dots 7$, неорганические стекла $\epsilon = 4 \dots 20$. Есть и исключения, например: минерал перовскит, у которого $\epsilon = 160$, используемый для получения керамических конденсаторов с большой удельной емкостью. Большинство таких диэлектриков имеет большой положительный температурный коэффициент (см. рис. 2.13, б).

У некоторых материалов влияние температуры аналогично их влиянию на дипольную поляризацию, однако на практике это значительно менее выражено. Это объясняется тем, что ионно-релаксационная поляризация не дает основной добавки к диэлектрической проницаемости как дипольная у полярных диэлектриков (см. рис. 2.13, а).

Диэлектрическая проницаемость *сегнетоэлектрика* в основном определяется доменной (самопроизвольной) поляризацией и сильно зависит от напряженности поля и температуры (см. рис. 2.16, б).

Доменная поляризация наблюдается при разных частотах вплоть до сверхвысоких радиочастот (рис. 2.19) лишь за тем начинает не успевать за частотой.

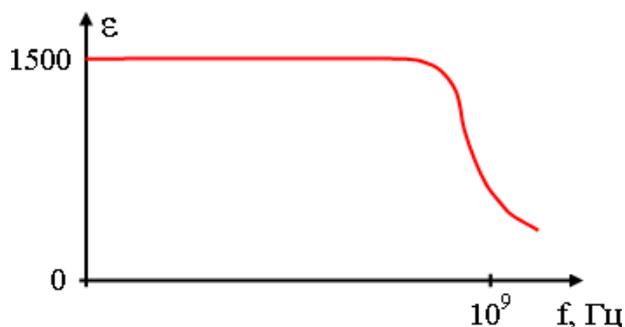


Рис. 2.19. Зависимость ϵ от частоты для метатитаната бария

В таблице 2.1 приведены значения ϵ для некоторых сегнетоэлектриков в слабых полях при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 2.1

**Значения диэлектрической проницаемости
для некоторых сегнетоэлектриков в слабых полях при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$**

<i>Сегнетоэлектрик</i>	ϵ
Сегнетовая соль	500...600
Титанат бария	1500...2000
Титанат бария с добавками	7000...9000

Диэлектрическая проницаемость твердых сложных (слоистых) диэлектриков

В энергетике широко используются диэлектрики, состоящие из смеси двух и более компонентов: керамика, гетинакс, текстолит, пропитанная маслом бумага и т. д. Значения относительной диэлектрической проницаемости температурного коэффициента TK_ε у них следует определять экспериментально. Однако в ряде оценочных расчетах можно использовать приближенные формулы.

Например, при последовательном включении двух компонентов среднее значение диэлектрической проницаемости можно определить по формуле:

$$\varepsilon = \theta_1 \varepsilon_1 + \theta_2 \varepsilon_2,$$

где ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость первого диэлектрика; ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость второго диэлектрика; θ_1 – объемная концентрация первого компонента смеси; θ_2 – объемная концентрация второго компонента смеси.

Зависимость типа $\varepsilon = f(t)$ можно построить только экспериментально, так как на нее влияют многие факторы.

2.2.3. Электропроводность диэлектриков

Основные понятия

Проводимость диэлектриков хотя и очень мала по сравнению с проводимостью проводников, но не равна нулю. В технических диэлектриках всегда есть небольшое количество свободных зарядов, которые перемещаются в электрическом поле. Однако правильно определить ток через диэлектрик (или сопротивление диэлектрика) не так просто. Ток сильно зависит от времени, поясним это с помощью схемы замещения диэлектрика (рис. 2.20), где C_0 – ёмкость диэлектрика, вызванная электронной и ионной поляризациями; R – сопротивление сквозному току; C_1 и R_1 – ёмкость и сопротивление обусловленные релаксационными видами поляризации.

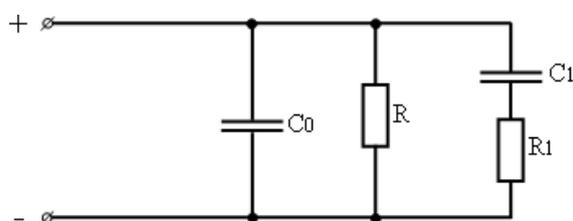


Рис. 2.20. Схема замещения диэлектрика

Проводимость диэлектрика принято определять по *сквозному току* (в схеме замещения – это ток через сопротивление R). Однако одновременно идёт поляризация диэлектрика, возникает ток заряда ёмкости (ток смещения), вследствие чего может создаться неправильное представление о большой проводимости.

Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризации столь кратковременны, что их обычно не удаётся зафиксировать обычным прибором. Токи смещения различных видов замедленной поляризации (миграционной, дипольной, ионно-релаксационной и др.), наблюдаемые у большего числа технических диэлектриков, называются *абсорбционными токами* (в схеме замещения они учтены цепочкой C_1 и R_1).

Ток утечки $I_{ут}$ в техническом диэлектрике представляет собой сумму сквозного тока $I_{ск}$ и тока абсорбции $I_{абс}$:

$$I_{ут} = I_{ск} + I_{абс}$$

При постоянном напряжении абсорбционные токи протекают только в моменты включения и выключения напряжения. Поэтому для определения сквозного тока показания прибора следует снимать после небольшой выдержки времени, когда ток абсорбции затухнет (рис. 2.21).

«В большинстве диэлектриков время затухания тока абсорбции менее 60 с. Поэтому при измерении сопротивления изоляции рекомендуется отсчёт показания прибора делать после выдержки образца под напряжением в течение одной минуты. При переменном напряжении абсорбционный ток течёт в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле и измерить отдельно сквозной ток не удаётся» [11].

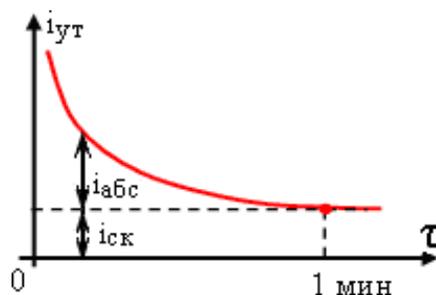


Рис. 2.21. Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени

В диэлектриках свободными зарядами, которые перемещаются в электрическом поле и обуславливают электропроводность, могут быть ионы, электроны, слабо связанные заряды.

Если носитель заряда – электрон, то при протекании тока нет переноса вещества и выделения его на электродах.

При ионной электропроводности принимают участие ионы обоих знаков (катионы и анионы). Молекулы распадаются на ионы, происходит перенос и отложение вещества на электродах.

В некоторых диэлектриках, особенно в жидкостях, присутствует ещё один вид – молионная электропроводность. Здесь носитель заряда – крупные частицы (группы заряженных молекул) – молионы.

Электропроводность диэлектрика сильно зависит от агрегатного состояния: газообразный, жидкий, твёрдый диэлектрик.

Газы при небольших значениях напряжённости электрического поля обладают исключительно малой электропроводностью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает в результате двух процессов:

- 1) под действием внешних факторов;
- 2) вследствие соударений заряженных частиц с молекулами (в сильных полях).

Рассмотрим первый процесс.

В слабых электрических полях газы состоят из электрически нейтральных частиц – молекул или атомов. Все заряды в них очень сильно связаны, и сам газ не имеет способности проводить электрический ток. Свободные носители заряда возникают под действием внешних ионизирующих факторов, например космического или радиоактивного излучения. При этом в газ попадают частицы с большой энергией, которая превышает энергию ионизации молекул или атомов $W_{\phi} > \Delta W$. От столкновения с такими частицами происходит ионизация определенного числа молекул. Одновременно с ионизацией молекул идёт образование отрицательных ионов и рекомбинация (нейтрализация положительных и отрицательных ионов), поэтому это препятствует безграничному росту числа ионов, и их количество быстро стабилизируется. В слабых полях под действием внешних факторов возникает небольшое количество ионов (приблизительно по 650...750 положительных и отрицательных ионов на 1 см^3). Поэтому газы способны проводить в слабых электрических полях малый, но все же поддающийся измерению ток.

На рисунке 2.22 приведена зависимость плотности тока от напряжённости электрического поля $j = f(E)$ для газообразного диэлектрика.

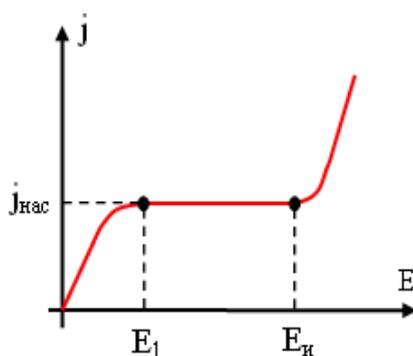


Рис. 2.22. Зависимость плотности тока в газе от напряжённости электрического поля

На начальном участке зависимости (до напряжённости E_1) выполняется закон Ома $j \sim E$.

Здесь запас положительных и отрицательных ионов достаточный. При напряжённости E_1 наступает насыщение, т. е. все образовавшиеся ионы уходят к электродам, и дальнейшее увеличение напряжённости не приводит к росту плотности тока. Например, в воздухе при нормальных условиях при расстоянии в 1 см между плоскими электродами насыщение

наступает при напряженности $E_1 \approx 0,6$ В/м. Плотность тока $j_{\text{нас}} \approx 10^{-15}$ А/м² (удельное объёмное сопротивление $\rho \approx 10^{16}$ Ом · м). Поэтому воздух на этом участке можно рассматривать как совершенный диэлектрик.

При увеличении напряжённости плотность тока остаётся постоянной лишь до тех пор, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов.

Однако уже при напряжённости $E_{\text{и}}$ плотность тока опять начинает возрастать, быстрее, чем по закону Ома. Дело в том, что электроны между соударениями (на длине свободного пробега λ) набирают кинетическую энергию, равную или превышающую энергию ионизации молекулы ($W = g E \lambda \geq \Delta W$). Такие быстрые электроны способны при столкновении с нейтральными молекулами вызвать их ионизацию, то есть расщепить их на электроны и положительные ионы. После каждого столкновения, таким образом, получаются два электрона, которые способны ионизировать две следующие молекулы, и т. д. Такой процесс резкого возрастания количества свободных электронов в газе вследствие ионизации от столкновения электронов с нейтральными молекулами называется *ударной ионизацией*. Для воздуха при нормальных условиях процесс ударной ионизации наступает при

$$E_{\text{и}} \approx 10 \dots 100 \text{ кВ/см.}$$

Электрическая проводимость газов в обычных условиях эксплуатации не зависит от температуры.

Электропроводность жидких диэлектриков

Электропроводность жидких диэлектриков сильно зависит от двух основных причин:

- 1) наличия примесей;
- 2) строения молекул (неполярная или полярная).

В неполярных жидкостях число носителей заряда в единице объема не велико и проводимость мала, если в них нет примесей.

Жидкие диэлектрики легко загрязняются, причём характер загрязнений может быть различным. В качестве загрязнений могут быть примеси, сопутствующие данному диэлектрику по его природе, например органические кислоты в трансформаторном масле. Могут быть и другие загрязнения: пыль, волокна, а также вода. Вода – самое распространённое загрязнение, увеличивающее электропроводность жидкости. Она может быть в трёх состояниях:

а) молекулярно-растворённом;

б) в виде эмульсии, т. е. в виде мельчайших капелек, находящихся в диэлектрике во взвешенном состоянии;

в) в виде избыточной воды (избыточная вода в трансформаторном масле собирается на дне, а в соволе – на поверхности).

Вода в диэлектрике может переходить из одного состояния в другое при изменении температуры.

Электропроводность жидкого диэлектрика, не имеющего никаких примесей и загрязнений – ионная. Ионы в жидком диэлектрике возникают вследствие частичной диссоциации молекул самой жидкости. Диссоциация – это распад жидкого диэлектрика на ионы. Степень диссоциации

$$\alpha = n / N,$$

где n – число распавшихся молекул; N – общее число молекул.

Полярные жидкости всегда имеют повышенную проводимость по сравнению с неполярными жидкостями, причём чем больше диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем выше диссоциация и проводимость (табл. 2.2).

Таблица 2.2

**Удельное объемное сопротивление
и диэлектрическая проницаемость некоторых жидкостей при температуре 20 °С**

Жидкость	Особенность строения	ρ , Ом · м	ϵ
Трансформаторное масло	Неполярная	$10^{10} \dots 10^{13}$	2,3
Совол	Полярная	$10^8 \dots 10^{10}$	4,5
Спирт	Сильнополярная	$10^4 \dots 10^5$	33
Вода	Сильнополярная	$10^3 \dots 10^4$	81

Сильно полярные жидкости (например, вода) отличаются настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной проводимостью.

Неполярные диэлектрики меньше подвержены диссоциации, у них меньше электропроводность.

Если в полярном диэлектрике содержится небольшое количество воды, то это приводит к увеличению степени диссоциации самого диэлектрика и сильному увеличению проводимости.

Удельная проводимость любой жидкости сильно зависит от температуры:

$$\gamma = A \exp(-a / T),$$

где A и a – постоянные, характеризующие данную жидкость.

Для более узкого интервала температур с достаточной степенью точности может быть применена формула

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\alpha t),$$

где γ_0 и α – постоянные величины для данной жидкости.

График зависимости удельной проводимости от температуры в логарифмическом масштабе близок к прямой (рис. 2.23). Обычно в тщательно очищенных жидкостях зависимость тока от напряженности аналогична газу (см. рис. 2.23) и имеет три участка.

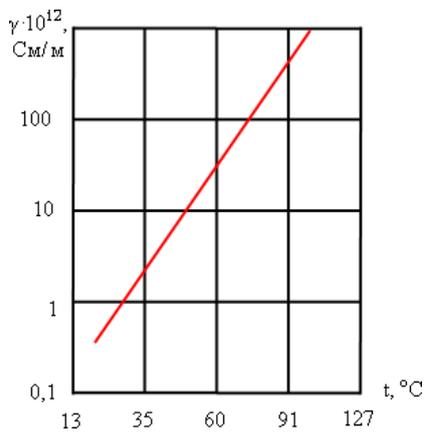


Рис. 2.23. Зависимость удельной проводимости маслоканифольного компаунда от температуры

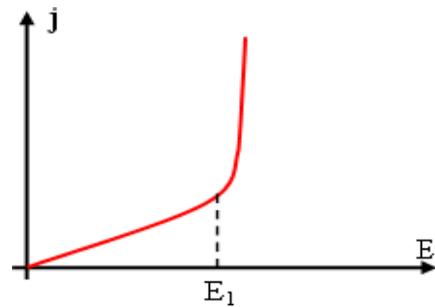


Рис. 2.24. Зависимость плотности тока в жидком диэлектрике от напряжения

Для технических жидкостей вследствие примесей повышение проводимости наблюдается уже при $E > 1$ кВ/мм, и участок насыщения обычно отсутствует (рис. 2.24). До напряжённости E_1 ток подчиняется закону Ома. При $E > 100 \dots 1000$ кВ/см закон Ома нарушается, начинается процесс ионизации.

В таблице 2.2 для сравнения представлены значения ϵ и ρ для некоторых жидких диэлектриков.

Электропроводность твёрдых диэлектриков

Для твёрдых диэлектриков различают объемную проводимость изоляции, численно определяющую проводимость через толщину изоляции, и поверхностную проводимость изоляции, характеризующую наличие слоя повышенной электропроводности на поверхности раздела твёрдой изоляции с окружающей газообразной (в большинстве случаев – воздухом) или жидкой средой; этот слой создается вследствие неизбежных загрязнении, увлажнения и т. п.

Соответственно вводятся понятия объемного тока утечки I и поверхностного тока утечки I_s (рис. 2.25), а также объемного сопротивления изоляции R и поверхностного сопротивления изоляции R_s . Очевидно, что сопротивления R и R_s включены параллельно друг другу между электродами, через которые подается напряжение на изоляцию.

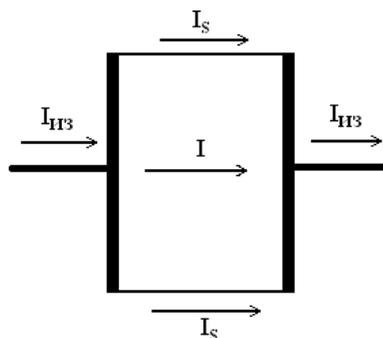


Рис. 2.25. Объемный и поверхностный токи утечки через участок изоляции (схематически)

Удельное объёмное сопротивление измеряется в ом-метрах ($\text{Ом} \cdot \text{м}$), а удельная объёмная проводимость – в сименсах на метр (См/м).

Величина γ , обратная величине ρ (удельная объёмная проводимость материала), измеряется в сименсах на метр (См/м):

$$\gamma = 1/\rho.$$

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s измеряется в омах, удельная поверхностная проводимость γ_s – в сименсах.

Полная проводимость твёрдого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению изоляции, складывается из объёмной и поверхностной проводимостей. Такое разделение вызвано тем, что поверхность диэлектрика, работающего в загрязнённой атмосфере промышленных предприятий, адсорбирует воду, пыль, газы и другие вещества, тем самым сильно снижая полное сопротивление диэлектрика.

Объёмная проводимость. Электропроводность твёрдых диэлектриков обуславливается передвижением как ионов самого диэлектрика, так и ионов примесей. Ионы примесей обычно занимают места временного закрепления и относительно слабо связаны с окружающими частицами. В результате тепловых колебаний они могут перемещаться в другое положение. В электрическом поле такие перемещения становятся направленными, ионы перемещаются к электродам. При высоких температурах освобождаются и некоторые ионы из узлов кристаллической решётки.

Температурная зависимость удельной проводимости твёрдого диэлектрика с примесями имеет вид

$$\gamma = A_1 \exp\left(-\frac{W_1}{k \cdot T}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{W_2}{k \cdot T}\right)$$

где A_1 и W_1 – параметры, характеризующие примесную проводимость; A_2 и W_2 – параметры, характеризующие собственную проводимость.

На рисунке 2.26 приведена зависимость плотности тока в твёрдом диэлектрике от напряжённости электрического поля.

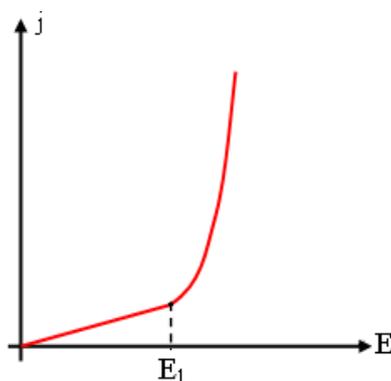


Рис. 2.26. Зависимость плотности тока в твёрдом диэлектрике от напряжения

В сравнительно слабых полях (до напряжённости E_1) проводимость не зависит от напряжённости электрического поля, соблюдается закон Ома. В сильных полях начинается ударная ионизация электронов, и проводимость резко возрастает.

У гигроскопичных материалов объёмная проводимость зависит от влажности. Наличие в них влаги даже в ничтожных количествах резко увеличивает проводимость (уменьшается сопротивление). У некоторых диэлектриков, не обладающих объёмной влагопоглощаемостью, проводимость не зависит от влажности (например, у керамики).

Поверхностная электропроводность определяется способностью поверхности диэлектрика адсорбировать загрязняющие компоненты. Особенно сильно на электропроводность влияет влага. Иногда достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности, чтобы существенно уменьшить удельное поверхностное сопротивление ρ_s .

Все твёрдые диэлектрики можно разделить на гидрофильные и гидрофобные. У гидрофобных материалов (парафин, полиэтилен, фторопласт-4, диэлектрики на основе кремнийорганических соединений) поверхность не смачивается водой. Влага на них распределяется отдельными «островками» и их поверхностное сопротивление мало зависит от влажности. У гидрофильных материалов влага распределяется тонким непрерывным слоем по всей поверхности, в ней растворяются другие загрязнения, и удельное поверхностное сопротивление резко снижается.

Удельное поверхностное сопротивление гигроскопичных диэлектриков весьма чувствительно к увлажнению.

Полярные диэлектрики характеризуются более низкими значениями удельного поверхностного сопротивления, заметно уменьшающимися во влажной среде. Особенно резкое понижение удельного поверхностного сопротивления можно наблюдать у полярных диэлектриков, частично растворимых в воде, у которых на поверхности образуется плёнка электролита. Кроме того, к поверхности полярных диэлектриков лучше прилипают различные загрязнения, также приводящие к снижению удельного поверхностного сопротивления.

Для увеличения удельного поверхностного сопротивления применяют следующие меры: очищают поверхность от грязи, полируют, промывают ее кипящей дистиллированной водой, пропитывают гидрофобными материалами (парафином, кремнийорганическими лаками), глазуриями и т. п.

2.2.4. Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающего нагрев диэлектрика.

Диэлектрические потери в диэлектрике можно характеризовать рассеиваемой мощностью, которая определяется по формуле

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2.3)$$

где ω – угловая частота ($\omega = 2\pi f$); C – ёмкость диэлектрика; U – напряжение, прикладываемое к диэлектрику; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Углом диэлектрических потерь называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи.

Угол δ покажем на параллельной эквивалентной схеме диэлектрика с потерями (рис. 2.27).

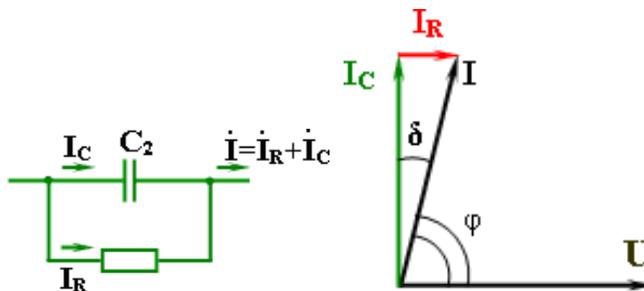


Рис. 2.27. Эквивалентная схема и векторная диаграмма диэлектрика с потерями

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры. Дадим краткую характеристику этим видам потерь.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией

Из всех видов поляризации с потерями наиболее часто в диэлектриках встречаются дипольная и ионно-релаксационная. У них есть общие закономерности:

- а) $\text{tg } \delta$ при определенной частоте f_1 имеет максимум (рис. 2.28, а);
- б) у $\text{tg } \delta$ наблюдается также максимум при некоторой температуре t_1 , характерной для данного диэлектрика (рис. 2.28, б).

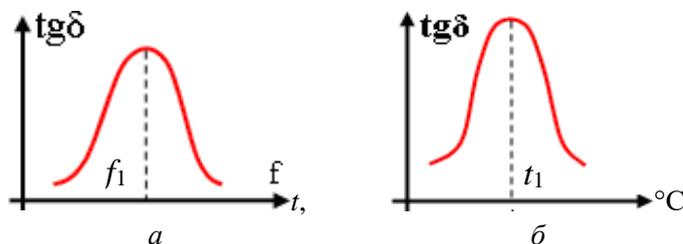


Рис. 2.28. Влияние частоты (а) и температуры (б) на $\text{tg } \delta$ диэлектрических потерь, обусловленных поляризацией

В схеме замещения диэлектрика (рис. 2.20) эти виды потерь хорошо описываются цепочкой из емкости C и сопротивления R_1 .

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью

Они возникают в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность. В схеме замещения эти потери учтены сопротивлением R и они не зависят от частоты: $P = U^2 / R$.

Так как сопротивление R зависит от температуры, то потери также зависят от нее. Эту зависимость можно оценить по формуле:

$$P = A \exp(-b / T), \quad (2.4)$$

или в узком диапазоне

$$P = P_0 \exp(\alpha t), \quad (2.5)$$

где A , b , α – постоянные материала; P_0 – потери при температуре 0°C .

Зависимость $\text{tg } \delta = f(t)$ изображена на рис. 2.29, а, если эту зависимость изобразить в логарифмической шкале, то получается почти прямая линия (рис. 2.29, б).

В этом случае $\text{tg } \delta$ может быть вычислен по формуле

$$\text{tg } \delta = \frac{1.8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon \cdot f \cdot \rho} \quad (2.6)$$

где f – частота напряжения, Гц; ρ – удельное сопротивление, Ом · м;

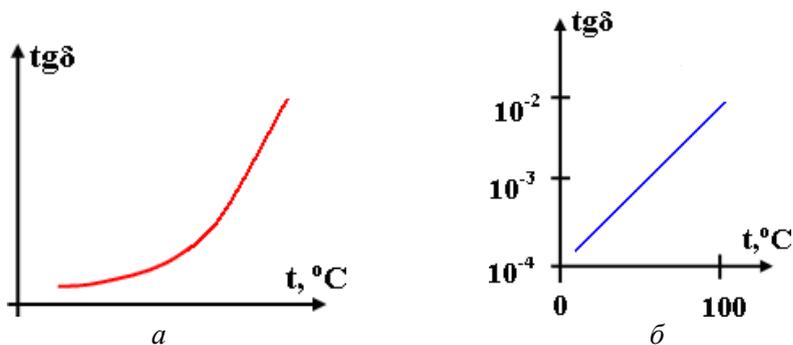


Рис. 2.29. Зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры для потерь, вызванных электропроводностью

Ионизационные диэлектрические потери

Эти потери свойственны газообразным диэлектрикам. Они появляются, если напряженность электрического поля превысит критическое значение $E_{\text{кр}}$, при котором чаще начинаются ионизационные процессы (рис. 2.30).

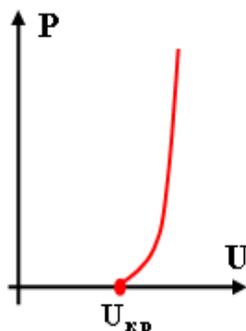


Рис. 2.30. Ионизационные потери

Ионизационные потери можно вычислить по формуле

$$P = A f (U - U_{кр})^3,$$

где A – постоянный коэффициент, $U_{кр}$ – критическое напряжение, при котором начинаются ионизационные процессы; f – частота поля.

Ионизационные потери также возникают в жидких и твердых диэлектриках в газовых пузырьках и включениях.

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры

Они наблюдаются в слоистых диэлектриках: бумаге, пропитанной маслом, в пористой керамике, текстолите, стеклотекстолите и т. д. Ввиду разнообразия структуры неоднородных диэлектриков общей формулы расчета диэлектрических потерь не существует. Потери, вызванные миграционной поляризацией можно оценить, используя эквивалентную схему, которая составлена для простейшего двухслойного конденсатора (рис. 2.31).

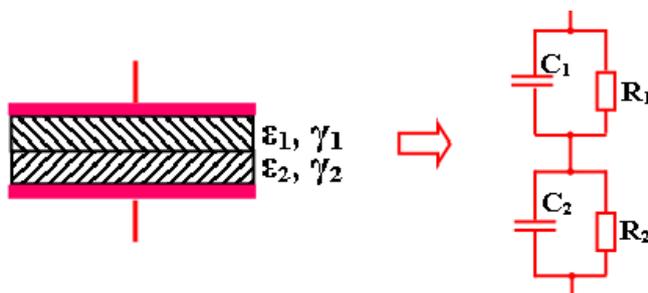


Рис. 2.31. Двухслойный конденсатор и его эквивалентная схема

Диэлектрические потери в газах

Диэлектрические потери в газах при напряженностях поля, лежащих ниже значения, необходимого для развития ударной ионизации молекул газа, очень малы. В этом случае газ можно практически рассматривать как идеальный диэлектрик. Источником диэлектрических потерь газа может быть только электропроводность, так как ориентация дипольных молекул газов при их поляризации из-за больших расстояний между молекулами не сопровождается диэлектрическими потерями.

Но так как у газов электропроводность очень мала, то угол диэлектрических потерь ничтожно мал. Величину $\text{tg } \delta$ можно определить по формуле $\text{tg } \delta = 1,8 \cdot 10^{10} / (\epsilon f \rho)$. Если принять для газа при частоте $f = 50$ Гц, $\rho = 10^{16}$ Ом · м и $\epsilon = 1$, то получим $\text{tg } \delta \approx 4 \cdot 10^{-8}$. При напряженностях поля больше $E_{кр}$ в газе начинается ионизация, и потери резко возрастают.

Так, на ЛЭП при неправильно выбранном сечении проводов возникают потери на ионизацию (потери на корону).

Диэлектрические потери в жидких диэлектриках

У жидких диэлектриков следует отдельно рассматривать *неполярные* и *полярные*.

В неполярных жидкостях диэлектрические потери обусловлены только электропроводностью. У чистых жидких диэлектриков электропроводность мала, поэтому малы и диэлектрические потери. Можно рассчитать $\operatorname{tg} \delta$ по следующей формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = 1,8 \cdot 10^{10} / (\varepsilon f \rho),$$

например, для нефтяного конденсаторного масла получим $\operatorname{tg} \delta \approx 0,001$.

Диэлектрические потери у неполярных диэлектриков зависят от температуры, так как с увеличением температуры уменьшается удельное сопротивление жидкого диэлектрика (см. рис. 2.29).

У неполярного диэлектрика $\operatorname{tg} \delta$ с ростом частоты уменьшается (смотри формулу (2.6): $\operatorname{tg} \delta \sim 1 / f$). Дело в том, что с ростом частоты увеличивается реактивный ток через ёмкость $I_p = \omega UC$, а активный ток остаётся постоянным, поэтому уменьшается $\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p$. А диэлектрические потери ($P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta$) не зависят от частоты: $P = U^2 / R$.

В полярных жидкостях потери обусловлены двумя причинами:

- электропроводностью;
- дипольной поляризацией.

Потери, вызванные электропроводностью, зависят только от температуры. Зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(t)$ изображена на рис. 2.29, а. Для дипольной поляризации $\operatorname{tg} \delta$ имеет максимум при некоторой температуре t_1 (см. рис. 2.28, б). Если теперь учесть оба вида потерь и просуммировать обе зависимости, то получим график, показанный на рисунке 2.32.

Рассмотрим влияние частоты f на $\operatorname{tg} \delta$ и рассеиваемую мощность. Увеличение частоты ведет к увеличению количества поворотов диполей, поэтому растут $\operatorname{tg} \delta$ и P (рис. 2.33). При частоте более f_1 диполи не успевают поворачиваться вслед за частотой, $\operatorname{tg} \delta$ начинает уменьшаться, а потери становятся постоянными, так как $\operatorname{tg} \delta \sim 1 / f$ ($P = U^2 \cdot 2\pi f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta$).

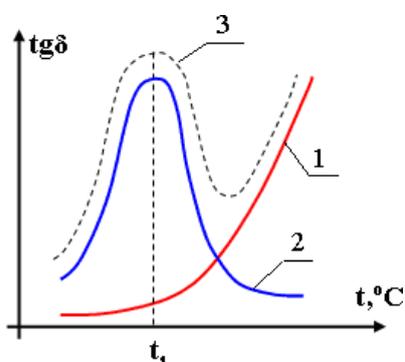


Рис. 2.32. Суммирование влияния температуры:

- 1 – потери, вызванные электропроводностью;
- 2 – потери, вызванные дипольной поляризацией;
- 3 – полные потери

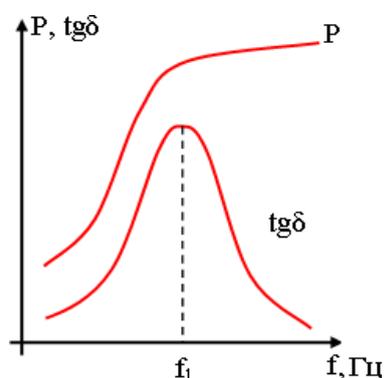


Рис. 2.33. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ и P от частоты для дипольной жидкости

Неполярные жидкости имеют, как правило, существенно меньший $\operatorname{tg} \delta$, чем полярные (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Диэлектрические потери в жидких диэлектриках

<i>Жидкий диэлектрик</i>	ε	$\operatorname{tg} \delta$
Трансформаторное масло	2,3	0,001
Совол	5,0	0,020

Диэлектрические потери в твёрдых диэлектриках

В твёрдых диэлектриках возможны все виды поляризации и потерь. Для выяснения общих закономерностей твёрдые диэлектрики разделим на следующие группы.

1. Диэлектрики молекулярной структуры: а) неполярные, б) полярные;
2. Диэлектрики ионной структуры: а) плотной упаковки, б) неплотной упаковки;
3. Сегнетоэлектрики;
4. Диэлектрики неоднородной структуры.

Диэлектрические потери в неполярных диэлектриках

К таким диэлектрикам относится парафин, полиэтилен, полистирол и т. д. Если в диэлектриках отсутствуют примеси (особенно вода), то они обладают ничтожно малыми диэлектрическими потерями и их применяют в качестве высокочастотных диэлектриков. Для них $\operatorname{tg} \delta$ можно рассчитать по формуле $\operatorname{tg} \delta = 1,8 \cdot 10^{10} / (\varepsilon f \rho)$.

Диэлектрические потери у неполярных диэлектриков не зависят от частоты. При увеличении температуры уменьшается удельное сопротивление диэлектрика, а это приводит к увеличению тангенса диэлектрических потерь. Зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(t)$ такая же, как и у жидких неполярных диэлектриков (см. рис. 2.29, а).

Диэлектрические потери в полярных диэлектриках

В них потери обусловлены двумя причинами: электропроводностью и дипольной поляризацией. Изменение $\operatorname{tg} \delta$ от температуры такое же, как и для жидкого полярного диэлектрика (см. рис. 2.32). На рисунке 2.34, а приведена для примера зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(t)$ для резины.

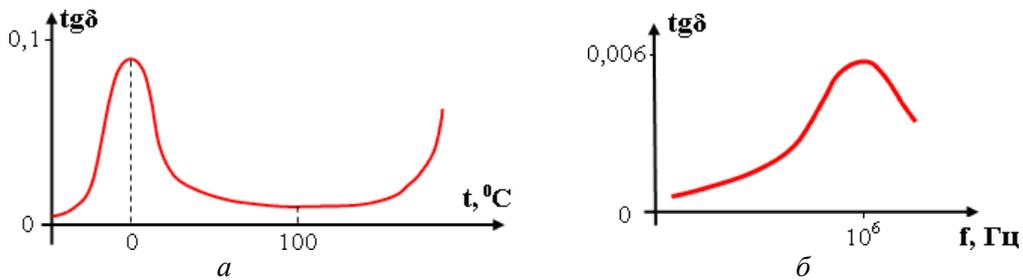


Рис. 2.34. Зависимости $\text{tg } \delta = f(t)$ для резины (а) и $\text{tg } \delta = \varphi(f)$ для полисульфона (б)

Изменение $\text{tg } \delta$ с изменением частоты для твёрдых полярных диэлектриков такое же, как и для жидких. Для примера на рисунке 2.34, б приведена зависимость для полярного диэлектрика полисульфона от частоты.

*Диэлектрические потери твёрдых веществ ионной структуры
с плотной упаковкой ионов*

В таких диэлектриках только два вида поляризации: электронная и ионная. В этих диэлектриках (при отсутствии примесей) диэлектрические потери весьма малы. При повышенных температурах в таких веществах появляются потери от сквозной электропроводности. На рисунке 2.35 приведена зависимость $\text{tg } \delta = f(t)$ для корунда (Al_2O_3), входящего в состав ультрафарфора.

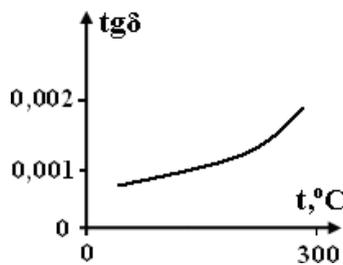


Рис. 2.35. Зависимость $\text{tg } \delta = f(t)$ для алюмин-оксида (корунда)
*Диэлектрические потери твёрдых веществ ионной структуры
с неплотной упаковкой ионов*

В таких диэлектриках не менее трёх видов поляризации:

- электронная,
- ионная,
- ионно-релаксационная.

В некоторых видах диэлектриков, например в некоторых стеклах, где имеет место значительная ионно-релаксационная поляризация, наблюдаются закономерности изменения $\text{tg } \delta$ от температуры и частоты, характерные для дипольной поляризации. На рисунке 2.36 для примера приведены температурная и частотная зависимости для ситалла.

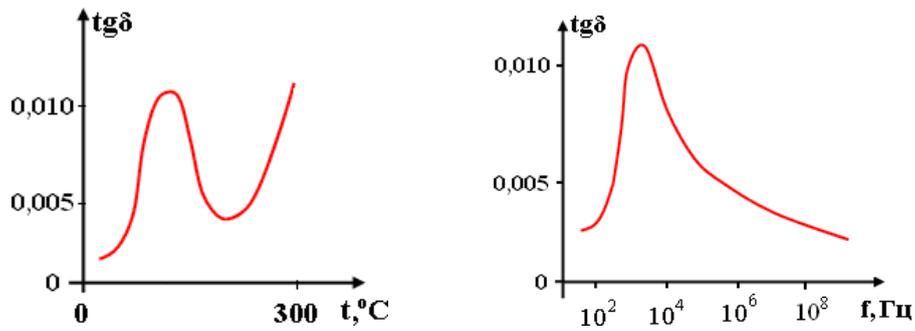


Рис. 2.36. Зависимости $\text{tg } \delta = f(t)$ и $\text{tg } \delta = \varphi(f)$ для ситалла

Для большинства видов электрокерамики количество ионов, участвующих в релаксационной поляризации, непрерывно возрастает с температурой, поэтому максимум $\text{tg } \delta$ отсутствует и температурная зависимость $\text{tg } \delta$ подобна зависимостям для неполярных диэлектриков и в первом приближении имеет экспоненциальный характер. На рисунке 2.37, *a* приведена зависимость $\text{tg } \delta = f(t)$ для титаносодержащей керамики в логарифмическом масштабе, а на рис. 2.37, *б* – для фарфора в равномерном масштабе.

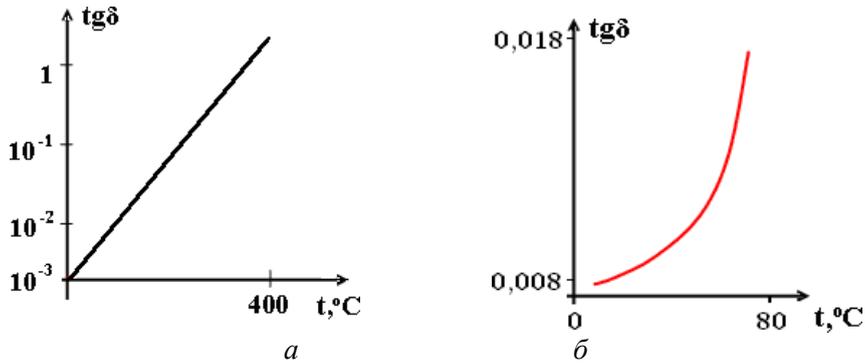


Рис. 2.37. Зависимости $\text{tg } \delta = f(t)$ для титаносодержащей керамики (*a*) и для фарфора (*б*)

Диэлектрические потери в сегнетоэлектриках

Диэлектрические потери у сегнетоэлектриков выше, чем у обычных диэлектриков. Особенностью сегнетоэлектриков является то, что в них самопроизвольная (спонтанная) поляризация проявляется в определённом температурном интервале, вплоть до точки Кюри. Диэлектрические потери в сегнетоэлектриках мало изменяются с температурой в области спонтанной поляризации и редко падают при температуре выше точки Кюри, когда доменная структура разрушается. На рисунке 2.38 представлены температурные зависимости $\text{tg } \delta$ и ϵ одного из видов керамического сегнетоэлектрика.

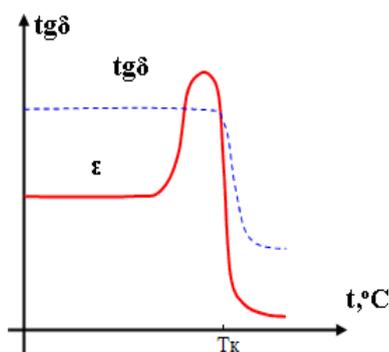


Рис. 2.38. Зависимости $\text{tg } \delta = f(t)$ и $\varepsilon = f(t)$ для сегнетоэлектрика

Диэлектрические потери в твёрдых веществах неоднородной структуры

К таким диэлектрикам относятся все материалы состоящие не менее чем из двух компонентов. В современной электроизоляционной технике применяется большое количество неоднородных диэлектриков. Например, широко используются волокнистые материалы (бумага, картон, стекло, ткани и т. д.) пропитанные искусственными или синтетическими соединениями. К неоднородным диэлектрикам относится керамика, в которой несколько компонентов механически смешаны друг с другом, а также бумага, пропитанная жидким диэлектриком, которая широко используется в качестве изоляции кабелей, трансформаторов, конденсаторов. На рисунке 2.39 представлена зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры для бумаги, пропитанной маслоканифольным компаундом.

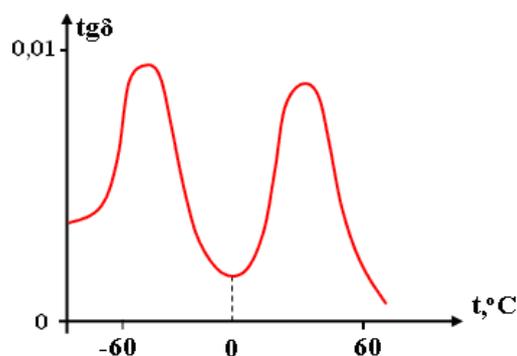


Рис. 2.39. Зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры для конденсаторной бумаги, пропитанной компаундом (80% канифоли и 20% трансформаторного масла)

Кривая имеет два максимума:

- первый (при низких температурах) характеризует дипольные потери в бумаге;
- второй (при более высокой температуре) обусловлен дипольными потерями в канифоли.

Зависимости могут быть и сложнее, если в состав диэлектрика входит большее количество составляющих.

2.2.5. Пробой диэлектриков

Общая характеристика явления пробоя

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства электроизоляционного материала, если напряжённость поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название *пробоя диэлектрика*. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется *пробивным напряжением* $U_{пр}$, а соответствующее значения напряженности поля – *электрической прочностью диэлектрика* $E_{пр}$.

Значение пробивного напряжения $U_{пр}$ обычно измеряется в киловольтах, а электрическая прочность $E_{пр}$ в киловольтах на сантиметр (кВ/см, кВ/м, МВ/м):

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h},$$

где h – толщина диэлектрика.

Основные виды пробоя следующие:

- 1) электрический пробой;
- 2) тепловой пробой;
- 3) электрохимический пробой (электрическое старение).

Электрический пробой вызывается ударной ионизацией электронами, возникающей в сильном электрическом поле и приводящей к резкому возрастанию плотности электрического тока.

Тепловой пробой обусловлен прогрессивно нарастающим выделением теплоты в диэлектрике под действием диэлектрических потерь или электропроводности и приводящим к термическому разрушению диэлектрика. *Электрохимический пробой* обусловлен медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, которые развиваются под действием электрического поля или частичных разрядов в диэлектрике, приводя к необратимому уменьшению сопротивления изоляции и пробоем её при напряжённостях значительно меньших чем электрическая прочность диэлектрика. Этот процесс также называется *электрическим старением* диэлектрика.

Пробой газов

В газах возникает только электрический пробой. Электрическая прочность у газов в сравнении с прочностью жидкостей и твердых диэлектриков невелика и сильно зависит от многих причин: вида газа, вида поля, плотности, от времени приложения напряжения и т. д.

Сначала рассмотрим влияние этих факторов на прочность газа. Начнем с *вида газа*. Обычно пробивные характеристики разных газов сопоставляют при нормальных условиях (давлении 760 мм рт. ст., температуре 20 °С); электродах, создающих однородное поле, площадью 1 см²; межэлектродном зазоре 1 см. Воздух при нормальных условиях имеет электрическую прочность $E_{пр} \approx 30$ кВ/см.

Коэффициент κ , показывающий отношение электрической прочности газа к электрической прочности воздуха для некоторых газов, используемых в технике, составляет: для водорода – 0,5; гелия – 0,2; азота – 2,9; фреона-12 – 2,4; для перфторированных углеводородных газов – 4...10.

Наиболее широко из газов применяется воздух. Он является внешней изоляцией во многих видах электротехнических конструкций: трансформаторах, выключателях, на линиях электропередач и т. д.

Одним из важнейших факторов, влияющих на пробивную напряжённость газа, является *вид поля*: однородное или неоднородное.

Однородное или слабонеоднородное поле возникает в промежутках плоскость – плоскость и шар – шар, если расстояние между шарами S меньше их радиуса ($S < 0,5D$) (рис. 2.40).

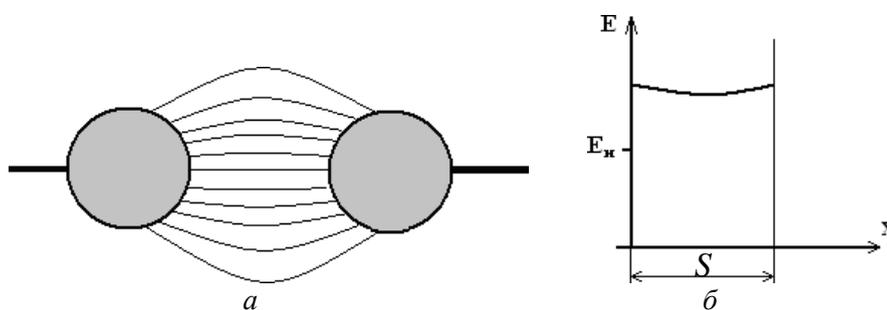


Рис. 2.40. Система шар – шар (а) и распределение напряжённости поля между шарами (б)

В промежутке шар – шар наибольшая напряжённость на поверхностях шаров, наименьшая – в середине промежутка, но она нигде не опускается ниже $E_{и}$, при которой идут ионизационные процессы в газе.

У системы плоскость – плоскость $E = \text{const}$, поэтому она имеет наибольшую прочность. В однородном поле электрическую прочность воздуха приближённо можно принять $E_{пр} \approx 30 \text{ кВ/см}$.

В неоднородном поле острière – острière (рис. 2.41, а) и острière – плоскость (рис. 2.41, б) поле резко неоднородно, причём часть промежутка имеет напряжённость меньшую напряжённости ионизации ($E < E_{и}$).

На рисунке 2.42 приведены зависимости пробивных напряжений от расстояния между электродами для трёх классических промежутков: острière – плоскость; острière – острière; шар – шар.

Электрическая прочность газа сильно зависит также от *плотности газа*, которая является функцией давления и температуры. На рисунке 2.43 приведена зависимость пробивной напряжённости $E_{пр}$ от давления P для однородного поля и постоянной температуры.

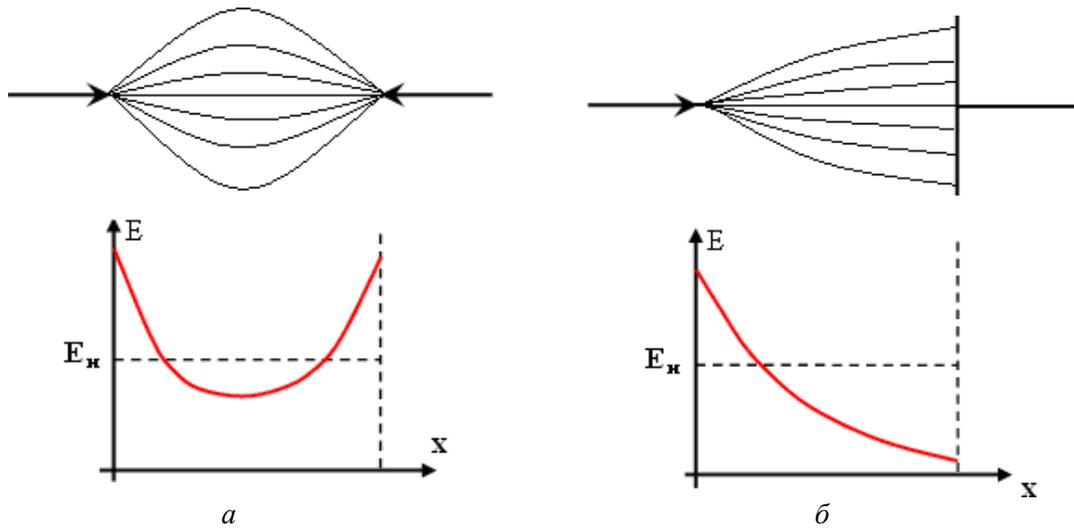


Рис. 2.41. Распределение напряжённости между электродами промежутков острйё – острйё (а) и острйё – плоскость (б)

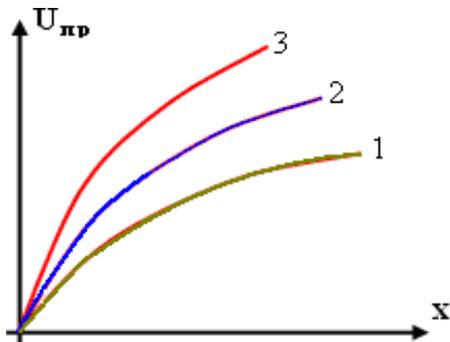


Рис. 2.42. Зависимость электрической прочности газа от расстояния между электродами (x):
1 – острйё – плоскость; 2 – острйё – острйё;
3 – шар – шар

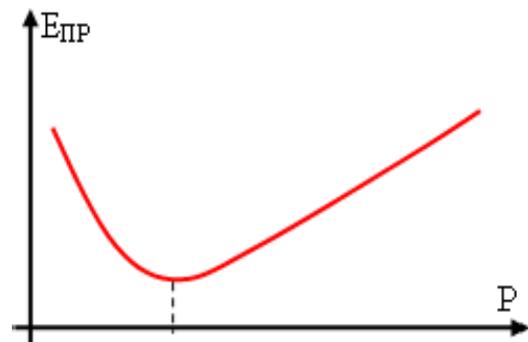


Рис. 2.43. Зависимость электрической прочности газа от давления

Зависимость имеет минимум при давлении P_1 . При давлениях больше P_1 расстояния между молекулами становятся меньше, а значит, меньше длина свободного пробега λ . Поэтому, для того чтобы электрон набрал необходимую энергию ($W = g E \lambda \geq \Delta W$), нужно увеличить напряжённость поля E .

При давлениях меньше P_1 напряжённость также увеличивается. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разряде и снижении вероятности столкновений электронов с молекулами. Для области, где $E_{пр}$ увеличивается с ростом давления, для расчета пробивного напряжения воздуха применяется следующая формула:

$$U_{пр} = U_{пр. 0} \cdot \delta,$$

где $U_{пр. 0}$ – пробивное напряжение при температуре 20 °С и давлении 0,1 МПа, δ – относительная плотность воздуха, рассчитанная по соотношению (при нормальных условиях $\delta < 1$)

$$\delta = 0,386 \frac{P}{t+273}.$$

Пробивное напряжение зависит также от времени *приложения напряжения*. Если время приложения напряжения слишком мало, то канал разряда в газе может не успеть сформироваться, и пробивное напряжение необходимо увеличивать. Такое увеличение характеризуется коэффициентом импульса:

$$K_{\text{имп}} = \frac{U_{\text{пр.имп}}}{U_{\text{пр.50}}}$$

где $U_{\text{пр. имп}}$ – пробивное импульсное напряжение; $U_{\text{пр. 50}}$ – пробивное напряжение при частоте 50 Гц.

Коэффициент импульса $K_{\text{имп}}$ в резко неоднородных электрических полях может достигать значения 1,5...1,8.

Пробой газов в настоящее время, в отличие от жидких и твёрдых диэлектриков, хорошо изучен. Подробно процесс пробоя газа и влияние разных факторов на пробивное напряжение будут рассмотрены в дисциплине «Техника высоких напряжений». Здесь для примера рассмотрим только один частный случай: пробой однородного поля в системе плоскость – плоскость при напряжённости больше или равной напряжённости ионизации ($E \geq E_{\text{и}}$).

В воздушном промежутке даже без внешнего поля всегда присутствует небольшое количество заряженных частиц $n \approx 650...750$ на 1 см^3 . Они возникают вследствие радиоактивного и космического излучения. Электроны нейтральных атомов воздуха захватывают эти частицы и становятся свободными, при этом образуются положительные ионы, так как у этих частиц $W_{\text{ф}} \geq \Delta W$ (ΔW – ширина запрещенной зоны, эВ). Однако образовавшиеся электроны претерпевают около 10^{11} столкновений в секунду с атомами газа и в среднем через 10^{-6} с захватываются нейтральными молекулами и образуют отрицательные ионы. В электрическом поле образовавшиеся электроны разгоняются электрическим полем и приобретают дополнительную энергию

$$W = g E \lambda,$$

где g – заряд электрона; E – напряженность поля; λ – средняя длина свободного пробега электрона до очередного соударения.

Если напряженность достаточна (то есть $E \geq E_{\text{и}}$), то дополнительная энергия W больше или равна ширине запрещенной зоны ($W \geq \Delta W$). И при очередном столкновении электрона с нейтральным атомом эту энергию может получить один из электронов на внешней орбите и также стать свободным. Однако при столкновении не обязательно возникает свободный электрон. Электрон может перейти на более удалённую орбиту, а потом возвратиться на место, испустив при возврате фотон света с энергией $W_{\text{ф}} \geq \Delta W$.

Вероятность возникновения свободного электрона при столкновении оценивается *коэффициентом ударной ионизации* α . Коэффициент тем больше, чем выше напряжённость поля и чем большую энергию приобретает электрон (рис. 2.44). Некоторые электроны могут столкнуться с положительными ионами, при этом происходит рекомбинация, т. е. возврат электрона на свою орбиту.

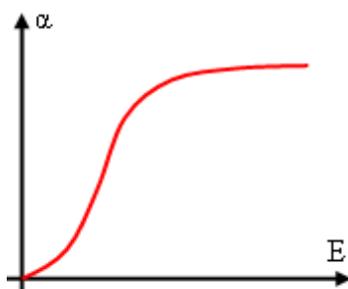


Рис. 2.44. Зависимость коэффициента ударной ионизации от напряжённости поля

Таким образом, в газе в электрическом поле одновременно идут следующие процессы: ионизация (образование электронов и положительных ионов), образование отрицательных ионов,

фотонов и рекомбинация. Интенсивность этих процессов зависит от напряжённости электрического поля. Образовавшиеся при столкновении электроны также будут разгоняться полем и ионизировать атомы. В результате общее число свободных электронов будет непрерывно возрастать.

Быстро нарастающий поток электронов называется *лавиной электронов*. В однородном поле число электронов в лавине можно оценить по следующей формуле: $N = e^{\alpha d}$. Скорость лавины $v_e \approx 10^5$ м/с. Одной лавины для пробоя недостаточно. При малых расстояниях между электродами ($\ell < 1$ м) разряд обычно происходит в стримерной форме.

Стример – это большое количество сдвинутых во времени и в пространстве лавин, образующих канал высокой проводимости с концентрацией заряженных частиц в канале стримера $N \approx 10^{13}$ на 1 см^3 . Скорость канала стримера $v_s \approx 10^6 \dots 10^7$ м/с. Поясним, почему скорость стримера существенно выше скорости лавины. Рассмотрим стример с отрицательного острья (рис. 2.45).

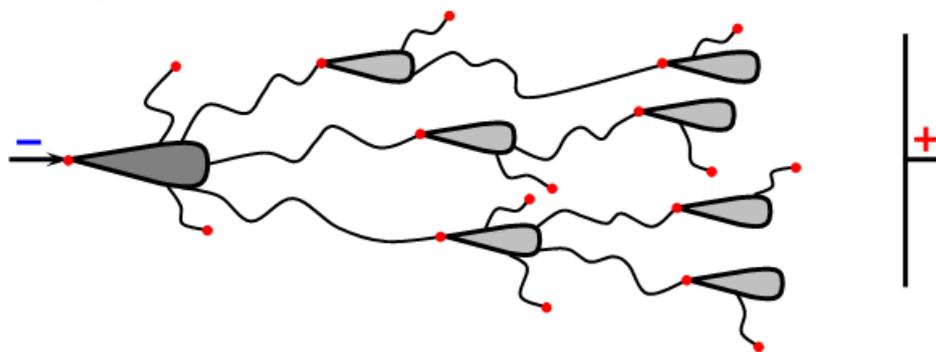


Рис. 2.45. Схематическое изображение образования стримера

Пусть с катода возникла первая лавина, она имеет скорость 10^5 м/с. При соударении электрона с нейтральным атомом (при $W \geq \Delta W$) возможно возникновение нового электрона или фотона с $W_{\phi} \geq \Delta W$. Каждая лавина сопровождается потоком фотонов, которые, двигаясь со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, обгоняют лавину, захватываются нейтральными атомами и образуют свободные электроны. А свободные электроны порождают новые лавины далеко впереди первой лавины. Отдельные лавины, нагоняя друг друга, сливаются, образуя

сплошной канал ионизированного газа. Стример может развиваться в область слабого поля, если $E \geq 10$ кВ/см, а в некоторых случаях и при более низких напряжённостях.

Если расстояние между электродами $\ell > 1$ м, то пробой обычно происходит в форме лидера.

Лидер – это большое количество сдвинутых во времени и в пространстве стримеров, образующих термоионизирующий канал с числом заряженных частиц $N \approx 10^{18}$ на 1 см³.

Рассмотрим промежуток остриё – плоскость с резко неоднородным полем (рис. 2.46).

В этом промежутке стример, возникший на острие, перемещается в область слабого поля только до напряжённости $E_{и}$. При этом часть канала стримера движущимися лавинами разогревается до температуры термоионизации, при которой молекулы газа распадаются на положительные и отрицательные ионы. Эта часть стримера становится как бы продолжением острия и с неё возникает новый стример, развивающийся по новому пути, так как здесь выше напряжённость. Часть нового стримера вновь разогревается до температуры термоионизации и так до тех пор, пока очередной стример не достигнет плоскости.

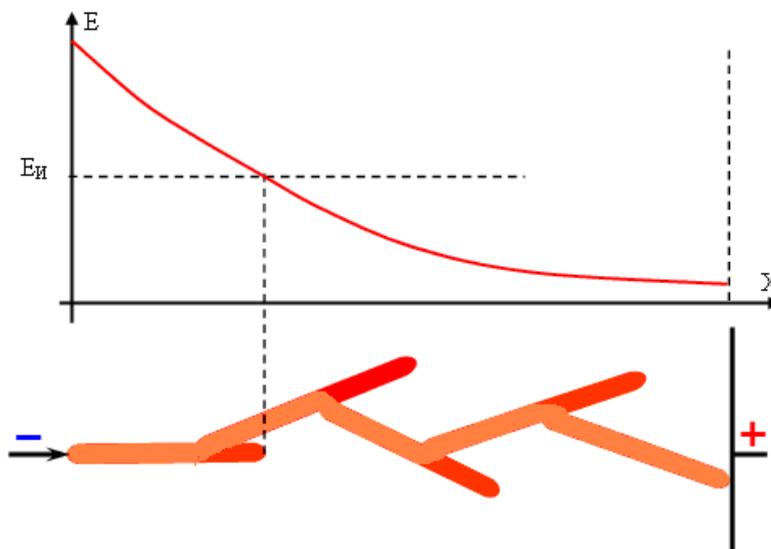


Рис. 2.46. Схематическое изображение образования лидера в промежутке остриё – плоскость

Скорость лидера $v_{л} \approx 10^4 \dots 10^5$ м/с. Такая скорость лидера объясняется тем, что нужно время для разогрева канала движущимися электронами до температуры термоионизации. Лидер может развиваться в область слабого поля, если $E \geq 5$ кВ/см (а при грозовых пробоях и при меньших напряжённостях).

После достижения каналом лидера плоскости в канал от источника подбрасывается отрицательный заряд, чтобы нейтрализовать положительный объёмный заряд между электродами. Эта стадия разряда называется главной стадией, так как ток достигает несколько килоампер, а при ударе молнии с облака на землю – до 200 кА.

Пробой жидких диэлектриков

«Электрическая прочность хорошо очищенных жидких диэлектриков значительно превышает прочность газов и приближается к прочности твердых диэлектриков» [7]. В таблице 2.4 приведены значения электрической прочности некоторых жидких диэлектриков. Пробивная напряженность жидкости растет с увеличением плотности.

Таблица 2.4

Электрическая прочность некоторых жидких диэлектриков

Диэлектрик	$E_{пр}$ (при 20 °С и 50 Гц), кВ/см
Трансформаторное масло	150...200
Конденсаторное масло	200...250
Совол	140...160
Кремнийорганическая жидкость	180...200

Пробой жидких диэлектриков представляет собой более сложное явление, чем пробой газов. В жидких диэлектриках возможны электрический и тепловой пробои.

На пробивное напряжение жидких диэлектриков влияют многие факторы: чистота жидкости, температура, время приложения напряжения и т. д. Наибольшее влияние на пробивное напряжение оказывает *чистота диэлектрика*.

Различают три степени чистоты жидкого диэлектрика:

- 1) особо тщательно очищенные диэлектрики – совершенно не содержат воды и механических загрязнений, а также хорошо дегазированы;
- 2) технически чистые диэлектрики – практически не содержат эмульсионной воды и механических загрязнений;
- 3) диэлектрики содержат эмульсионную воду и твердые механические загрязнения.

Особо тщательно очищенные жидкие диэлектрики получить чрезвычайно трудно, в них возникает только электрическая форма пробоя. Плотность жидкости существенно больше плотности газа, поэтому в них значительно меньше длина свободного пробега электронов λ , а значит, существенно выше пробивная напряженность. В связи с исключительно большими трудностями сохранения высокой чистоты жидких диэлектриков они не нашли промышленного применения.

В электроэнергетике обычно используются технически чистые жидкие диэлектрики, в которых в незначительных количествах возможны примеси. Из примесей наиболее сильно влияют на электрическую прочность полярные вещества, например влага, особенно в присутствии волокон целлюлозы. На рисунке 2.47 приведена зависимость электрической прочности трансформаторного масла от содержания воды. У чистого масла $E_{пр} \approx 200... 250$ кВ/см, а с водой уменьшается до $E_{пр} \approx 40$ кВ/см (для сравнения у воздуха в однородном поле $E_{пр} \approx 30$ кВ/см).

Растворимость воды в жидких диэлектриках зависит от *температуры*. Так, например, в минеральном масле при 20 °С может раствориться $40 \cdot 10^{-6}$ воды по объему, а при 80 °С – $400 \cdot 10^{-6}$. На рисунке 2.48 приведена зависимость электрической прочности трансформаторного масла, содержащего небольшое количество воды, от температуры [7].

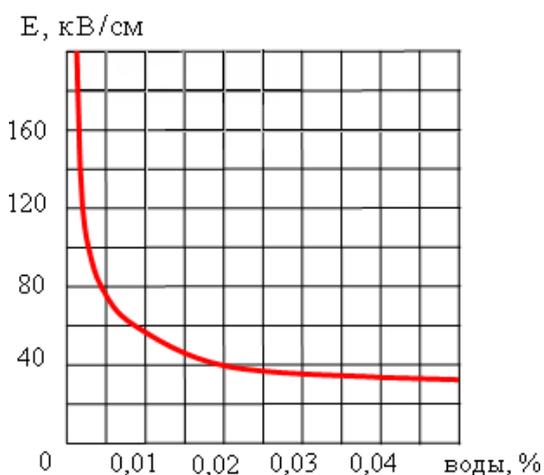


Рис. 2.47. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от содержания воды

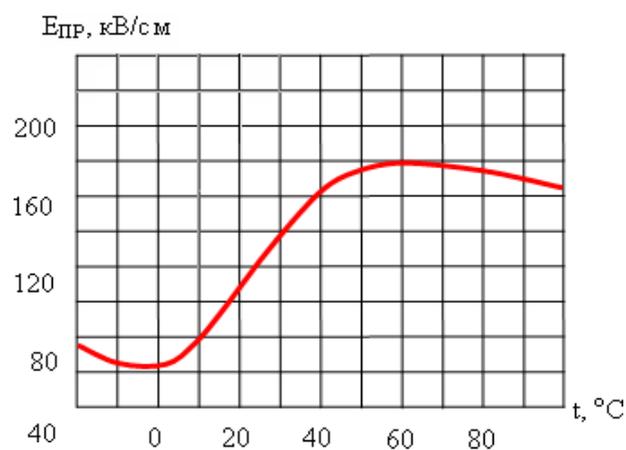


Рис. 2.48. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от температуры

При температурах, близких к нулю градусов по Цельсию, содержащаяся в масле вода находится в эмульсионном виде, и пробивная напряжённость имеет минимальное значение. С увеличением температуры вода переходит в растворенное состояние и уже в меньшей степени снижает напряжённость пробоя трансформаторного масла. При температуре больше 70 °C в трансформаторном масле начинается процесс кипения лёгких фракций и образования большого количества пузырьков газа, что также снижает напряжённость пробоя. Увеличение электрической прочности при низких температурах связано с увеличением вязкости масла и меньшими значениями диэлектрической проницаемости льда по сравнению с водой (у воды $\epsilon \approx 81$, у льда $\epsilon \approx 3$).

Вода в масло может попасть при его перевозке и хранении. В процессе эксплуатации в масле идут окислительные процессы с выделением воды. Пробой увлажнённых жидкостей происходит следующим образом. Капельки эмульсионной воды в электрическом поле поляризуются, втягиваются в пространство между электродами, деформируются и, сливаясь, образуют мостики с малым электрическим сопротивлением. По этим цепочкам проходит ток, разогревающий воду до кипения, в результате чего образуется газовый канал, по которому происходит пробой. Образование мостиков приводит к значительному снижению прочности масла. (Правда на образование мостика уходит обычно до 10^3 с и более, поэтому при импульсном напряжении мостики не успевают выстроиться и наличие воды сказывается меньше.)

В месте пробоя выделяется тепло, вследствие чего возникает конвекция жидкости, разрывающая, рассеивающая мостики, и электрическая прочность может восстановиться на некоторое время. Однако спустя несколько секунд или минут может образоваться новый мостик, новое замыкание и новый пробой. В силу изложенного электрическая прочность сильно увлажнённого жидкого диэлектрика является довольно неопределённой величиной, изменяющейся в широких пределах.

Аналогичный процесс образования путей пробоя может иметь место при наличии в жидкости ионизированных пузырьков газа или примесей с повышенной проводимостью.

Особенно вредно наличие во влажном масле различных *волокон*, которые впитывают воду и легко образуют сплошные мостики. Причем наиболее сильно влияет эмульгированная влага. Вследствие большой диэлектрической проницаемости частички влаги и волокна втягиваются в область наибольшей напряженности электрического поля, поляризуются и вытягиваются вдоль силовых линий поля.

При касании электродов частички заряжаются и движутся к противоположному электроду. Это приводит к образованию «мостиков» из цепочек частиц. При образовании неполного мостика или его нарушении возникают сильные местные напряженности в местах разрыва цепочек частиц, вследствие чего начинаются местные ионизационные процессы и может произойти пробой всего межэлектродного промежутка.

Пробой твёрдых диэлектриков

В твёрдых диэлектриках возможны все виды пробоя. Вид пробоя зависит от характера электрического поля (постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты), а также от наличия в диэлектрике примесей и дефектов.

Электрический пробой твёрдых диэлектриков

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. Электрический пробой протекает очень быстро за время, меньшее $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с, и по своей природе является чисто электронным процессом, т. е. происходит ударная ионизация атомов электронами и образование лавин. У твёрдых диэлектриков длина свободного пробега электронов ещё меньше, чем у жидких, поэтому для получения необходимой энергии ионизации ($W = g E \lambda \geq \Delta W$), нужно увеличить напряжённость поля. В таблице 2.5 приведена пробивная напряженность некоторых твёрдых диэлектриков.

Таблица 2.5

Электрическая прочность некоторых твёрдых диэлектриков

<i>Материал</i>	$E_{пр}$, кВ/см
Стекло	1000...3000
Слюда	1000...2000
Пропитанная бумага	1000...3000
Полистирол, фторопласт	1000...2000

«Тепловой пробой – разрушение диэлектрика за счет прогрессирующего локального энерговыделения при протекании тока в среде. Приложенное напряжение вызывает потери энергии в диэлектрике; при постоянном напряжении они определяются удельной проводимостью диэлектрика γ , а при переменном – тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$. Так как с повышением температуры величины γ , а в области повышенных температур и $\text{tg } \delta$, растут, то при некотором напряжении возможно возникновение неустойчивого теплового состояния диэлектрика. В этом случае увеличение γ или $\text{tg } \delta$ с повышением температуры, в свою очередь, приводит к увеличению выделяемых в диэлектрике потерь и к дальнейшему росту температуры; это заканчивается тепловым разрушением диэлектрика» [17].

«Рассмотрим методику упрощённого расчета пробивного напряжения при тепловом пробое твердого диэлектрика. Рассеиваемая в диэлектрике мощность будет определяться выражением:

$$P_a = U^2 \omega C \cdot \text{tg } \delta,$$

где P_a – активная мощность; U – приложенное напряжение; ω – угловая частота; C – ёмкость диэлектрика» [17].

В этой формуле $\text{tg } \delta$ имеет экспоненциальную зависимость от температуры. На рисунке 2.49 приведена зависимость $P_a = f(t)$ при напряжении U_1 .

Мощность, отводимую от диэлектрика, можно оценить по следующей формуле:

$$P_o = \gamma_r S (t - t_o),$$

где t_o – температура окружающей среды; t – температура нагретого диэлектрика; S – площадь диэлектрика; γ_r – суммарный коэффициент теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду, Вт/(м · град).

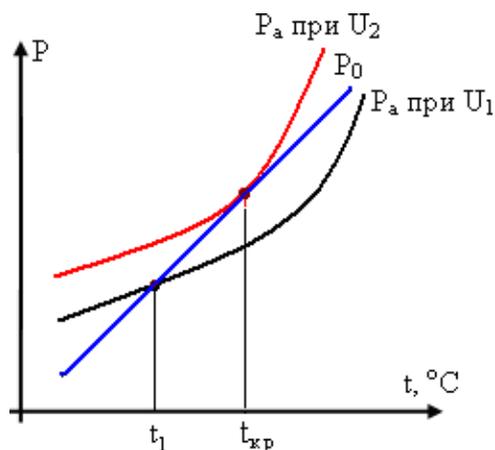


Рис. 2.49. Зависимость рассеиваемой мощности в диэлектрике P_a и отводимой мощности P_o от температуры

Зависимости $P_o = f(t)$ и $P_a = f(t)$ пересекаются при температуре t_1 (рис. 2.49), при которой наступает тепловое равновесие: мощность тепловыделения равна мощности, отводимой от диэлектрика. Напряжение на диэлектрике можно поднять только до U_2 , при котором обе

зависимости имеют только одну точку пересечения при $t_{кр}$. При дальнейшем увеличении напряжения зависимости не пересекаются, а значит, нет теплового равновесия, температура будет расти безгранично до разрушения диэлектрика.

Электрохимический пробой (электрическое старение)

Процесс электрохимического пробоя развивается в электрических полях с напряжённостью, значительно меньшей, чем электрическая прочность диэлектрика. Реальные диэлектрики отличаются от идеальных прежде всего наличием в теле диэлектрика микропор, в особенности на поверхности раздела «электрод – диэлектрик». Они возникают в процессе изготовления электроизоляционной конструкции, хотя в ряде случаев могут образоваться и в процессе эксплуатации, например в результате вибрации или механических напряжений. Наличие пор и связанное с ними возникновение ионизационных явлений служит одним из главных факторов ухудшения свойств электрической изоляции в процессе эксплуатации, так называемого «старения» диэлектриков.

Термин «старение» используется для обозначения ряда медленных процессов, возникающих в изоляции реальных конструкций в процессе эксплуатации. К этим процессам относится действие высоких напряженностей поля и температуры, развитие местных дефектов в результате ионизационных процессов. Сюда же относится снижение механической и электрической прочности из-за увлажнения, растрескивания, загрязнения и т. д. Основной механизм старения диэлектриков – воздействие частичных разрядов. Дело в том, что в энергетических установках и устройствах на диэлектрики действуют, как правило, переменные электрические поля.

При этом при действии переменного напряжения определенной амплитуды в газовых или воздушных порах возникают *частичные разряды*.

Частичный разряд – локальный лавинный разряд в газовой поре диэлектрика. Каждый разряд оказывает воздействие на диэлектрик за счет образования активных радикалов, излучения, повышенной температуры. Интенсивность частичного разряда (ЧР) зависит от напряженности поля. Поскольку разряды обычно возникают на каждом полупериоде синусоидального напряжения, с течением времени их действие нарастает. Это ведет к постепенному разложению материала, росту давления в поре, появлению проводящих частиц (обуглероживанию) и, в конце концов, к зарождению дендрита.

В качестве примера рассмотрим бумажно-масляную изоляцию трансформатора. Допустим, в изоляции после заливки масла остались газовые (воздушные) пузырьки. Распределение напряжённости между масляной изоляцией E_n и воздушными пузырьками E_b неравномерное:

$$\frac{E_b}{E_n} = \frac{\epsilon_n}{\epsilon_b},$$

т. е. к воздушному пузырьку прикладывается напряжённость примерно в 2,2 раза больше, чем к маслу, а прочность воздуха много меньше ($E_{пр(воз)} \approx 30$ кВ/см, $E_{пр(м)} \approx 200$ кВ/см). Это приводит к тому, что воздушный промежуток будет пробиваться несколько раз на каждой полуволне промышленной частоты (рис. 2.50). При каждом пробое происходит обугливание бумаги и разложение масла с увеличением воздушного пузыря.

Частичные разряды присутствуют во многих видах изоляции, при каждом пробое происходит незначительное снижение прочности изоляции, однако со временем идет накопление повреждения изоляции и снижение её прочности – старение изоляции (рис. 2.51).

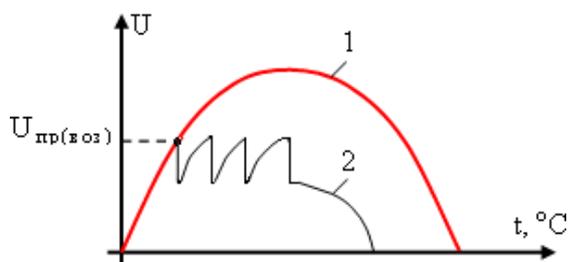


Рис. 2.50. Зависимость напряжений на изоляции (1) и на воздушном пузырьке (2)

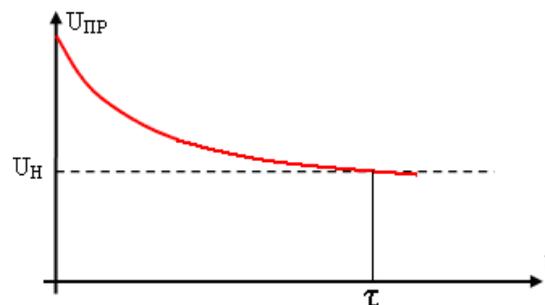


Рис. 2.51. Старение изоляции под действием частичных разрядов

В дальнейшем может произойти пробой изоляции при коммутационных перенапряжениях (во время включения или отключения электроустановок) или даже при номинальном напряжении. Изготовить слоистую изоляцию без частичных разрядов практически невозможно. Поэтому в слоистой изоляции допускается такой уровень частичных разрядов, который обеспечивал бы достаточно большой срок службы τ изоляции (время жизни диэлектрика) до 20 лет.

Многие электрохимические процессы, протекающие в изоляции, зависят от температуры. При нагревании (особенно органической изоляции) ухудшаются свойства изоляции – идет тепловое старение изоляции. Продолжительность старения τ связана с температурой старения T следующей зависимостью:

$$\ln \tau = B + A / T,$$

где A и B – величины, постоянные для данного материала и данных условий теплового старения.

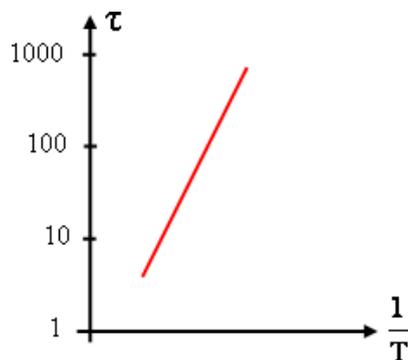


Рис. 2.52. Зависимость продолжительности старения τ изоляции от температуры

Зависимость τ (в логарифмическом масштабе) от величины, обратной температуре старения, выражается прямой линией (рис. 2.52).

В большинстве случаев наклон этих прямых таков, что уменьшение вдвое продолжительности старения τ соответствует повышению температуры старения в среднем на 10 градусов.

Такую зависимость имеет большинство изоляционных конструкций электрооборудования.

2.2.6. Физико-химические и механические свойства диэлектриков

В процессе эксплуатации диэлектрик испытывает нагрузки не только электрические, но тепловые, механические, ему приходится работать в условиях повышенной влажности, в химически агрессивных средах и т. д. Поэтому здесь кратко рассмотрены другие не менее важные свойства диэлектриков, необходимые при их выборе.

Влажностные свойства

Многим электроизоляционным материалам приходится работать в условиях повышенной влажности воздуха, и вода может попадать на них, если электрооборудование не имеет герметичного корпуса, такого как, например, у конденсатора.

Абсолютная влажность воздуха оценивается массой m водяного пара, содержащегося в единице объёма воздуха (в одном кубическом метре). Каждой температуре соответствует определенное значение абсолютной влажности при насыщении $m_{\text{нас}}$. Большого количества воды воздух содержать не может, так как она выпадает в виде росы.

Относительной влажностью воздуха называют выражаемое в процентах отношение

$$\varphi = \frac{m}{m_{\text{нас}}} \cdot 100\%.$$

За нормальную влажность воздуха в нашей стране принята относительная влажность $\varphi = 65\%$. В воздухе с нормальной влажностью при 20 °С содержание водяных паров $m = 11,25 \text{ г/см}^3$. Вода является сильно полярным диэлектриком с низким удельным сопротивлением ($\rho \approx 10^3 \dots 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), поэтому попадание её в поры твёрдых диэлектриков ведёт к резкому снижению их электрических свойств.

Для предохранения поверхности электроизоляционных деталей от действия влажности их покрывают лаками, не смачивающимися водой. Способность диэлектриков смачиваться водой характеризуется углом смачивания θ капли воды, нанесенной на плоскую поверхность тела. Чем меньше θ , тем сильнее смачивание. Для смачиваемых поверхностей $\theta < 90^\circ$ (рис. 2.53), для несмачиваемых $\theta > 90^\circ$.

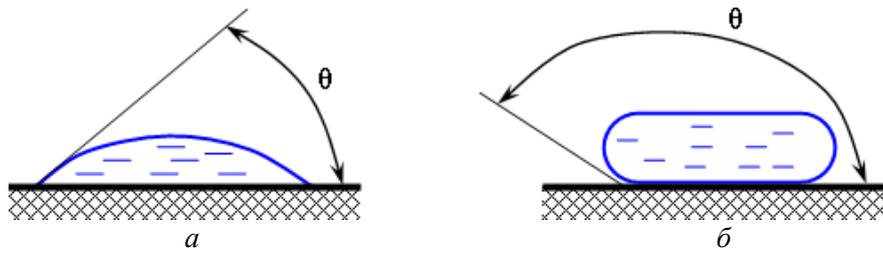


Рис. 2.53. Капля жидкости на смачиваемой поверхности диэлектрика (а) и на несмачиваемой поверхности (б)

При наличии в диэлектрике объёмной открытой пористости или при неплотной структуре влага попадает и внутрь диэлектрика.

Если сухой диэлектрик поместить во влажный воздух, то он начинает поглощать влагу из воздуха. Причём влажность материала ψ будет повышаться и асимптотически приближаться к равновесной влажности ψ_p , соответствующей данному значению влажности воздуха ψ (рис. 2.54).

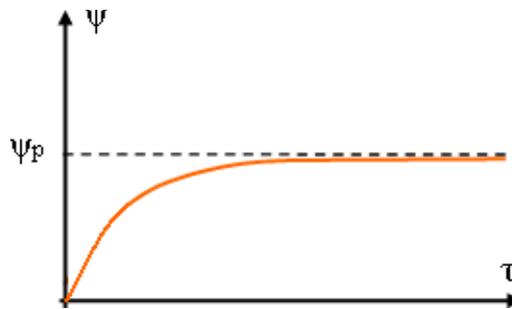


Рис. 2.54. Изменение влажности ψ образца материала при помещении во влажный воздух

Равновесная влажность ψ_p зависит от способности материала впитывать влагу. Она велика для пористых материалов и зависит от диаметра пор. Диаметр молекулы воды примерно равен $2,7 \text{ \AA}$ (1 ангстрем = 10^{-10} м), а капилляры в волокнах целлюлозы $10 \dots 1000 \text{ \AA}$. У бумаги при относительной влажности воздуха $\phi = 65\%$ равновесная влажность $\psi = 8\%$.

Наиболее чувствительным параметром влаги у диэлектриков является тангенс диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$, он заметно возрастает с увлажнением материала, изменяется и удельное сопротивление ρ .

Влагопроницаемость – это способность материалов пропускать сквозь себя пары воды. Эта характеристика чрезвычайно важна для оценки качества материалов, применяемых для защитных покровов (шланги кабелей, компаундные заливки, лаковые покрытия и т. д.). Благодаря наличию мельчайшей пористости большинство материалов обладает влагопроницаемостью. Только для стёкол, хорошо обожженной керамики и металлов влагопроницаемость практически равна нулю.

Количество влаги m , проходящее за время τ сквозь участок поверхности S слоя изоляционного материала толщиной h под действием разности давлений водяных паров P_1 и P_2 с двух сторон слоя, находим по следующему выражению:

$$m = \Pi \cdot (P_1 - P_2) \cdot S \tau / h,$$

где Π – влагопроницаемость данного материала (в системе СИ она измеряется в секундах).

Для различных материалов влагопроницаемость изменяется в широких пределах. Влагопроницаемость некоторых материалов приведена в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Влагопроницаемость некоторых диэлектриков

<i>Материал</i>	<i>Влагопроницаемость, с</i>
Парафин	$1,5 \cdot 10^{-16}$
Полистирол	$6,2 \cdot 10^{-15}$
Плѐнка из эфира (триацетат целлюлозы)	$2,1 \cdot 10^{-13}$

Для уменьшения гигроскопичности и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их пропитка. Необходимо иметь в виду, что пропитка волокнистых целлюлозных материалов и других органических диэлектриков лишь замедляет увлажнение материала, не влияя на объемное удельное сопротивление после длительного воздействия влажности. Дело в том, что молекулы пропиточных веществ больше по сравнению с размерами молекул воды и вода всё равно проникает между ними.

Тепловые свойства диэлектриков

К ним относится нагревостойкость, холодостойкость, теплопроводность и тепловое расширение.

Нагревостойкость – это способность диэлектрика выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, без недопустимого ухудшения его свойств. Нагревостойкость неорганических диэлектриков определяют, как правило, по началу существенного изменения электрических свойств, например по заметному росту $\operatorname{tg} \delta$ или снижению удельного электрического сопротивления. Нагревостойкость органических диэлектриков часто определяют по началу механических деформаций растяжения или изгиба, погружению иглы в материал под давлением при нагреве. При оценке нагревостойкости жидких диэлектриков (например, трансформаторного масла), а также растворителей, применяемых в производстве электроизоляционных лаков, учитывают температуру вспышки и температуру воспламенения.

Вопрос о наивысшей допустимой рабочей температуре решается на основании тщательного изучения кратковременной и длительной нагревостойкости материала с учетом коэффициента запаса, зависящего от условий эксплуатации, необходимой степени надежности и срока службы изоляции. При этом учитывают *тепловое старение* изоляции, которое приводит к необратимому ухудшению качества изоляции при длительном воздействии повышенной температуры вследствие медленно протекающих химических процессов.

Для оценки стойкости электрической к воздействию температуры принят новый межгосударственный стандарт ГОСТ 8865–93, в котором электроизоляционные материалы разделены на следующие классы нагревостойкости (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

<i>Классы нагревостойкости</i>	<i>Максимальная рабочая температура, °С</i>
У	90
А	105
Е	120
В	130
F	155
Н	180
200	200
220	220
250	250

К классу **У** относятся непропитанные и непогружённые в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и шёлка, а также органические диэлектрики: полистирол, полиэтилен и др. К классу **А** относятся пропитанные лаками либо компаундами или погружённые в жидкий электроизоляционный материал, т. е. защищены от непосредственного соприкосновения с кислородом воздуха (лакобумаги, лакоткани, бумага в масле).

К классу **Е** относятся пластмассы с органическим наполнителем и терморепактивным связующим – типа гетинакс, текстолит и др.

«Таким образом, к классам **У, А и Е** относятся в основном чисто органические диэлектрики.

В класс **В** входят материалы с большим содержанием неорганических компонентов (слюда, асбест, стекловолокно) в сочетании с органическими связующими и пропитывающими материалами (стеклолакоткани, стеклотекстолиты, миканиты, эпоксидные компаунды с неорганическими наполнителями)» [7].

К классу **F** относятся материалы на основе слюды, асбеста, стеклянных волокон, клеенных лаками повышенной нагревостойкости (полиуретановыми, эпоксидными и др.).

В класс **Н** входят материалы, состоящие из слюды, стеклянных волокон, асбеста, клеенных при помощи кремнийорганических смол и лаков, отличающихся повышенной стойкостью к теплу.

К классам **200, 220, 250** (в предыдущем стандарте это был класс **С**) относятся преимущественно диэлектрики неорганического происхождения (электрокерамика, стекло, микалекс, асбест и др.). Из органических высокополимерных диэлектриков в этот класс входит политетрафторэтилен (фторопласт-4).

Холодостойкость – это способность изоляции выдерживать воздействие низких температур (от –60 °С и ниже) без недопустимого ухудшения её свойств. При низких температурах, как правило, электрические свойства изоляционных материалов улучшаются. Однако многие материалы, гибкие и эластичные в нормальных условиях, при низких

температурах становятся весьма хрупкими и жёсткими, что создаёт затруднения для работы изоляции. Испытания электроизоляционных материалов и изделий из них на действие низких температур нередко проводятся при одновременном воздействии вибрации.

У многих электроизоляционных материалов морозостойкость определяют по степени снижения их эластичности и механической прочности. Так, у пленочных материалов морозостойкость определяют по появлению трещин при изгибании образцов (полосок) вокруг стального стержня диаметром 3 мм после выдержки их при низких температурах $-50 \dots -70$ °С. Существуют и другие способы определения морозостойкости диэлектриков.

Теплопроводность – это один из видов переноса теплоты от более нагретых частей к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры. Теплопроводность является важной теплофизической характеристикой, так как от нее в той или иной степени зависят многие другие свойства материала (механические, электрические, тепловые) при воздействии на него низких и высоких температур. Конструктивные особенности изделия из электроизоляционного материала и надежность его работы также зависят от теплопроводности. Важность термических испытаний связана также с тенденцией снижения толщины изоляции и расширением диапазона рабочих температур.

Согласно основному закону распространения тепла путем теплопроводности (закону Фурье), плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

где q – количество переданного тепла, отнесенное к единице площади сечения и к единице времени; dx – малое приращение толщины слоя испытуемого материала; dT / dx – температурный градиент; λ – теплопроводность, Вт/(м · К) (знак минус означает, что в направлении распространения тепла температура уменьшается).

Ориентировочные значения коэффициента теплопроводности ряда электроизоляционных материалов приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Теплопроводность некоторых материалов

<i>Материал</i>	λ , Вт/(м · К)
Воздух	0,05
Битум	0,07
Целлюлозная бумага	0,10
Фарфор	1,60
Стеатит	2,2
Диоксид титана TiO_2	6,5
Кристаллический кварц	12
Графит С	18

Тепловое расширение диэлектриков оценивают температурным коэффициентом линейного расширения TK_ℓ , измеряемым в K^{-1} :

$$TK_\ell = \alpha_\ell = \frac{1}{\ell} \cdot \frac{d\ell}{dT}.$$

Материалы, обладающие малыми значениями TK_ℓ , имеют, как правило, наиболее высокую нагревостойкость и наоборот. В качестве примера в табл. 2.9 приведены средние TK_ℓ некоторых изоляционных материалов в интервале температур 20...100 °С.

Таблица 2.9

Температурный коэффициент линейного расширения некоторых диэлектриков

<i>Материал</i>	$TK_\ell \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$
Полиэтилен	145
Полистирол	68
Эпоксидная смола	55
Слюда	37
Фарфор	3,5
Кварц	0,55

Как видно из таблицы, органические диэлектрики имеют резко повышенные TK_ℓ по сравнению с неорганическими диэлектриками.

2.2.7. Диэлектрические материалы

Классификации диэлектриков

Существует несколько классификаций диэлектриков. На рисунке 2.55 приведена классификация диэлектриков по назначению. Все диэлектрики делятся на две больших группы: *пассивные* и *активные* (управляемые), но в данной дисциплине управляемые диэлектрики не рассматриваются.



Рис. 2.55. Классификация диэлектриков

Большое практическое значение имеет также разделение электроизоляционных материалов в соответствии с их химической природой на органические, неорганические и элементоорганические.

Под *органическими* веществами подразумеваются соединения углерода; обычно они содержат также водород, кислород, азот, галогены или иные элементы. Прочие вещества считаются неорганическими; многие из них содержат кремний, алюминий и другие металлы, кислород и т. п. Многие органические электроизоляционные материалы обладают ценными

механическими свойствами, гибкостью, эластичностью, из них могут быть изготовлены волокна, пленки и изделия других разнообразных форм, поэтому они нашли весьма широкое применение. Однако органические электроизоляционные материалы за немногими исключениями имеют относительно низкую нагревостойкость.

Неорганические электроизоляционные материалы в большинстве случаев не обладают гибкостью и эластичностью, часто они хрупки; технология их обработки сравнительно сложна. Однако, как правило, неорганические электроизоляционные материалы обладают значительно более высокой нагревостойкостью, чем органические, а потому они с успехом применяются в тех случаях, когда требуется обеспечить высокую рабочую температуру изоляции.

Существуют и материалы со свойствами, промежуточными между свойствами органических и неорганических материалов: это *элементоорганические* материалы, в молекулы которых, помимо атомов углерода, входят атомы других элементов, обычно не входящих в состав органических веществ и более характерных для неорганических материалов: Si, Al, P и др. Электроизоляционные материалы подразделяются также по их *агрегатному состоянию* на газообразные, жидкие и твердые.

Рассмотрим подробнее диэлектрики в соответствии с классификацией по агрегатному состоянию.

Газообразные диэлектрики

В числе газообразных диэлектриков, прежде всего, должен быть упомянут воздух, который в силу своей всеобщей распространенности (даже помимо нашей воли), часто входит в состав электрических устройств и играет в них роль электрической изоляции, дополнительной к твердым или жидким электроизоляционным материалам. В отдельных частях электрических установок (например на участках воздушных линий электропередачи между опорами) воздух образует единственную изоляцию между голыми проводами линии.

Несмотря на его сравнительно низкую электрическую прочность всего $E_{пр} = 1...30$ кВ/см, воздушная изоляция имеет ряд достоинств, благодаря которым ее широко применяют в электроэнергетике:

- 1) простота конструкции и малая, по сравнению с другими диэлектриками, стоимость;
- 2) отсутствие старения, т. е. изменения электрических характеристик при длительной эксплуатации;
- 3) способность восстанавливать свои изолирующие свойства после погасания разряда.

Повышение давления газа является одним из путей увеличения его электрической прочности. При достаточно высоком давлении электрическая прочность газа выше прочности трансформаторного масла и электротехнического фарфора.

Особенно высокие разрядные характеристики имеют электроотрицательные газы, у которых большой коэффициент прилипания электронов. Наиболее широкое применение нашел *элегаз* (шестифтористая сера SF₆), поскольку он не горюч, обладает хорошей

теплопроводностью, хорошей дугогасительной способностью, относительно низкой температурой сжижения, не токсичен. Гексафторид серы (шестифтористая сера) имеет электрическую прочность примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха. Гексафторид серы был назван впервые исследовавшим этот газ советским ученым. Б.М. Гохбергом *элегазом* (сокращение от слов «электричество» и «газ»). В качестве изоляции элегаз при повышенном давлении находит применение как в электрофизических, так и в электроэнергетических установках. Все шире применяют, например, герметизированные распределительные устройства (ГРУ), которые имеют ряд важных преимуществ перед открытыми распределительными устройствами (ОРУ):

1. Все элементы, находящиеся под напряжением, расположены внутри заземленного корпуса, что повышает безопасность работы обслуживающего персонала и существенно уменьшает размеры распределительного устройства;

2. Герметизированные распределительные устройства могут быть установлены в подвалах зданий или специальных помещениях под землей, что особенно важно при строительстве или расширении распределительных устройств в черте города, поскольку в крупных городах трудно отыскать свободную площадь под открытую подстанцию. Кроме того, ОРУ нарушают архитектурный ансамбль города, создают повышенные радиопомехи, в то время как ГРУ работают практически бесшумно и не создают радиопомех;

3. Изоляция ГРУ непосредственно не контактирует с атмосферой и поэтому надежность ее работы не зависит от погодных условий и загрязненности атмосферы.

Жидкие диэлектрики

«Электрические свойства жидких диэлектриков в значительной мере зависят от степени их очистки. Даже небольшое содержание примеси заметно ухудшает их электрические характеристики. Особенно существенно на $E_{пр}$ жидких диэлектриков влияет нерастворенная полярная примесь, на пример вода.

Основное назначение жидких диэлектриков заключается в повышении электрической прочности твердой пористой изоляции, отводе тепла от обмоток трансформатора, гашении электрической дуги в масляных выключателях. В конденсаторах жидкие диэлектрики, пропитывая твердую изоляцию, повышают ее $E_{пр}$ и ε и тем самым $U_{ном}$ и емкость конденсатора» [7]. Наиболее распространенными жидкими диэлектриками являются:

- нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное и кабельное);
- синтетические жидкости (совол);
- кремнийорганические и фторорганические.

Нефтяные электроизоляционные масла

«Нефтяные масла получают путем ступенчатой перегонки нефти с выделением и последующей обработкой первой масляной фракции – солярового масла.

Нефтяные масла – это слабвязкие, практически неполярные жидкости, желтого цвета (от почти бесцветного до темного). Чем глубже очистка, тем светлее масло. С ростом содержания ароматических углеводородов и полярной примеси гигроскопичность масел увеличивается. Поэтому масла окисленные всегда более гигроскопичны и имеют пониженные электрические свойства. Химический состав, а следовательно, свойства и стабильность масла зависят от месторождения нефти.

Нефтяное трансформаторное масло

Нефтяное трансформаторное масло получило наиболее широкое применение в высоковольтных аппаратах: трансформаторах, масляных выключателях, высоковольтных вводах. В трансформаторах нефтяное масло выполняет две основные функции:

– во-первых, заполняя поры волокнистой изоляции и промежутки между проводами обмоток, а также токопроводящими частями и баком трансформатора, значительно повышает электрическую прочность изоляции;

– во-вторых, улучшает отвод тепла, выделяющегося за счет потерь мощности в обмотках и в сердечнике трансформатора. В масляных выключателях трансформаторное масло способствует еще и быстрому гашению электрической дуги.

Электрофизические свойства. Нефтяное трансформаторное масло является неполярным диэлектриком. Поэтому в чистом масле диэлектрические потери обусловлены в основном токами проводимости, величина которых мала, следовательно, малы и диэлектрические потери. Чистое масло имеет следующие основные свойства:

$E_{пр} = 100 \dots 280$ кВ/см; $\varepsilon = 2,2 \dots 2,3$; $\operatorname{tg} \delta = 0,001$; $\rho = 10^{10} \dots 10^{13}$ Ом · м;
температуру нагрева до 80 °С.

Нефтяное конденсаторное масло

Конденсаторное масло получают из трансформаторного путем его более глубокой очистки адсорбентами и обезгаживания в вакууме. Его электрические свойства лучше, чем у трансформаторного масла: $\varepsilon = 2,1 \dots 2,3$; $\operatorname{tg} \delta$ не более $2 \cdot 10^{-4}$; ρ не менее 10^{12} Ом · м при 20 °С, $E_{пр}$ не ниже 200 кВ/см, температура застывания –45 °С.

Конденсаторное масло используют для пропитки бумажных конденсаторов, в особенности силовых. При пропитке в результате заполнения пор бумаги маслом увеличивается диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность бумаги, а следовательно, возрастает емкость конденсатора и его рабочее напряжение или же при тех

же параметрах емкости и рабочего напряжения снижаются габариты, масса и стоимость конденсатора.

Нефтяное кабельное масло

Кабельное масло применяют для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей с рабочим напряжением до 35 кВ в свинцовой или алюминиевой оболочке, а также для заполнения металлических оболочек маслonaполненных кабелей на напряжение до 110 кВ и выше. Для повышения вязкости в масло добавляют канифоль или синтетический загуститель.

Для маслonaполненных кабелей высокого давления (до 1,5 МПа) на напряжение от 110 до 500 кВ используют особо тщательно очищенное нефтяное масло, имеющее значение $\operatorname{tg} \delta$ при 50 Гц и 100 °С не более 0,003, $E_{\text{пр}}$ при 50 Гц и 20 °С не менее 200 кВ/см; температура застывания должна быть не выше -30 °С, а температура вспышки не ниже +200 °С.

Синтетические жидкие диэлектрики

Нефтяные электроизоляционные масла являются наиболее доступными и недорогими жидкими диэлектриками, обладающими при хорошей очистке достаточно высокими электроизоляционными характеристиками – малой величиной $\operatorname{tg} \delta$ и высокой $E_{\text{пр}}$.

Недостатки нефтяных масел:

- пожаро- и взрывоопасность;
- невысокая стойкость к тепловому и электрическому старению;
- гигроскопичность (достаточно высокая у окисленных масел).

Для пропитки бумажных конденсаторов желательно иметь жидкий диэлектрик с более высоким значением ϵ .

У жидких синтетических диэлектриков некоторые свойства лучше, чем у нефтяных масел.

Наиболее широко распространенными из них являются:

- полихлордифенил (совол);
- кремнийорганические жидкости;
- фторорганические жидкости.

Полихлордифенил (совол) – хлорированный продукт дифенила $C_{12}H_{10}$ – представляет собой густую бесцветную токсичную жидкость, действующую раздражающе на кожу и слизистую оболочку. Его вязкость при 40 °С в четыре раза выше, чем у нефтяного трансформаторного масла, $T_{\text{заст}} = 5$ °С. Это полярный диэлектрик. Его электрические свойства при 20 °С и 1 кГц:

$$\epsilon = 5; \operatorname{tg} \delta = (5 \dots 10) \cdot 10^{-3}; \rho = 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{м}; E_{\text{пр}} = 150 \text{ кВ/см.}$$

Совол может применяться для пропитки бумажных силовых конденсаторов. Замена нефтяного масла при пропитке бумажных конденсаторов полихлордифенилом позволяет повысить их емкость на 50%. Полихлордифенил негорюч, пожаробезопасен, стоек к окислению.

Его недостатки:

- токсичен;
- под действием постоянного напряжения разлагается с выделением хлористого водорода, ухудшающего его электрические свойства;
- действует разрушающе на резину, краски, металлы и некоторые другие материалы;
- в 4–10 раз дороже нефтяных масел.

Из-за токсичности в ряде стран (Япония) они запрещены законом к использованию в электротехнике.

Кремнийорганические жидкости – вещества, молекулы которых состоят из чередующихся атомов кремния Si и кислорода O и имеют линейное строение. Кремнийорганические соединения устойчивы при высоких температурах (вплоть до 250 °C). Кремнийорганические жидкости бесцветны, растворимы в органических растворителях (например, бензоле), не растворимы в воде и спиртах. Нетоксичны, не вызывают коррозии металлов, обладают очень низкой гигроскопичностью и морозостойкостью (–70 °C). Их можно отнести к неполярным диэлектрикам. При 20 °C и 100 Гц имеют $\varepsilon = 2,4 \dots 2,8$; $\text{tg } \delta = (1 \dots 3) \cdot 10^{-4}$; $\rho = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $E_{\text{пр}} = 140 \dots 180 \text{ кВ/см}$. Используются для пропитки конденсаторов, работающих при повышенных температурах. Недостатки кремнийорганических жидкостей:

- сравнительно легко загораются (горят сильно коптящим пламенем);
- в несколько десятков и даже сотен раз дороже нефтяных масел.

Фторорганические жидкости – вещества, молекулы которых состоят из атомов углерода и фтора, при этом молекулярную цепь образуют атомы углерода.

Эти соединения пожаробезопасны (полностью негорючи), абсолютно негигроскопичны и имеют высокую нагревостойкость (до 300 °C).

Фторорганические жидкости – неполярный диэлектрик, при 20 °C и 100 Гц $\varepsilon = 2,2 \dots 2,5$; $\text{tg } \delta = (1 \dots 2) \cdot 10^{-4}$; $\rho = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $E_{\text{пр}} = 120 \dots 190 \text{ кВ/см}$. Они обеспечивают более интенсивный отвод тепла от охлаждаемых обмоток и магнитопроводов трансформатора, чем нефтяные масла и кремнийорганические соединения. Кроме того, их пары над жидкостью, в особенности при повышенном давлении, значительно увеличивают электрическую прочность газовой среды в аппарате и повышают $U_{\text{пр}}$.

Недостатки:

- токсичность некоторых видов фторорганических жидкостей;
- взаимодействие с резинами, оксидом железа (окалиной, ржавчиной), медью, что приводит к их загрязнению;
- более чем в 1000 раз дороже нефтяных масел» [7].

Твердые диэлектрики

Подробно рассмотреть все твердые диэлектрики невозможно, да и нет необходимости, так как в основном это материал описательный, поэтому он вынесен на **самостоятельное изучение** по учебникам:

- Богородицкий Н. П. и др. «Электротехнические материалы»;
- Колесов С. Н., Колесов И. С. «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

По одному из разделов студенты пишут реферат. Рассмотрим только основные группы твердых диэлектриков:

1. Волокнистые материалы (бумага, картон, хлопок, шелк, и синтетические);
2. Полимеры (полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид и т. д.);
3. Пластмассы и слоистые пластики;
4. Эластомеры (каучуки);
5. Стекла;
6. Керамика;
7. Слюда и слюдяные материалы;
8. Асбест и асбестовые материалы;
9. Лаки и компаунды.

10. Смолы, растительные масла, воскообразные диэлектрики и т. д. Из всего многообразия материалов, особое внимание следует лишь уделить следующим диэлектрикам:

11. Волокнистые материалы (бумага, картон, дерево). Бумага – это основная изоляция кабелей, трансформаторов, конденсаторов;
12. Слюда. Это основная изоляция электрических машин;
13. Полиэтилен. Это изоляция современных кабелей.

Общие сведения об этих материалах должен знать каждый студент.

Волокнистые материалы

«Волокнистые материалы» состоят из частиц удлиненной формы – волокон, отличающихся большой величиной отношения длины к диаметру. Их можно разделить на природные и синтетические. К природным волокнам относятся материалы растительного (хлопок, лен, пенька, джут, бумага, дерево), животного (шелк, шерсть) и минерального (асбест) происхождения. Синтетические волокна получают из полиамидов, полиэфиров (например, полиэтилентерефталата), полистирола и других полимеров путем вытягивания их из расплавов или растворов. К синтетическим волокнам относится также ацетатный шелк и стеклянные волокна.

К преимуществам многих волокнистых материалов можно отнести их достаточно высокую гибкость и механическую прочность, легкую обрабатываемость и дешевизну, к

недостаткам (из-за высокой пористости) – гигроскопичность и низкую электрическую прочность и теплопроводность. Особенно гигроскопичными являются целлюлозосодержащие материалы. Для улучшения свойств волокнистой электрической изоляции ее обычно пропитывают жидкими или воскообразными диэлектриками или лакируют. Когда требуются волокнистые материалы высокой нагревостойкости, используют стеклянные волокна и асбест» [7].

Электроизоляционные бумаги

Из древесины путем химической переработки получают техническую целлюлозу, которая и является сырьем для изготовления конденсаторной, кабельной и другой электроизоляционной бумаги.

«Конденсаторная бумага является наиболее тонкой и высококачественной электроизоляционной бумагой. В процессе ее изготовления волокна ориентируются в одном направлении, в результате чего прочность вдоль волокон выше, чем поперек. Для повышения ε и $E_{пр}$ бумагу пропитывают соответствующими диэлектрическими материалами. У непропитанной конденсаторной бумаги $E_{пр}$ составляет 35...40 кВ/мм (при $h = 0,01$ мм), после пропитки нефтяным конденсаторным маслом $E_{пр}$ возрастает до 250... 300 кВ/мм. Бумага, в том числе и пропитанная, подвержена электрическому старению при длительном воздействии электрического поля. При старении все электрические характеристики ухудшаются, и завершается процесс старения электрохимическим пробоем. Поэтому для конденсаторной бумаги следует брать большой (до 10 раз) запас электрической прочности, т. е. рабочая напряженность электрического поля должна быть в несколько раз меньше (до 10 раз), чем $E_{пр}$ бумаги, соответственно непропитанной или пропитанной.

Кабельную бумагу применяют для изоляции силовых кабелей и арматуры для них. Для изоляции силовых кабелей на напряжение до 35 кВ включительно и обмоточных проводов для трансформаторов на напряжение до 150 кВ используют кабельную бумагу. Недостатком бумажной изоляции силовых кабелей являются пустоты (зазоры) между отдельными слоями бумаги, оставшиеся после пропитки изоляции масляно-канифольным компаундом. В этих зазорах возникают частичные электрические разряды, которые, также, как и в конденсаторной бумаге, приводят к электрохимическому пробоем. Поэтому из-за электрического старения кабельной изоляции рабочую, длительную напряженность электрического поля бумажно-масляной изоляции принимают равной 3...4 кВ/мм (для масло- и газонаполненного кабеля до 10...12 кВ/мм) «[7].

Слюда

Слюда является важнейшим из природных минеральных электроизоляционных материалов. Она имеет следующие ценные качества: высокую электрическую прочность;

высокую нагревостойкость; влагостойкость; механическую прочность и гибкость. Благодаря ее исключительно ценным качествам слюду применяют в весьма ответственных случаях в частности для изоляции электрических машин высоких напряжений и больших мощностей (в том числе крупных турбогенераторов и гидрогенераторов, тяговых электродвигателей и т. п.) и в качестве диэлектрика в некоторых конструкциях конденсаторов.

Слюда встречается в природе в виде кристаллов, характерной особенностью которых является способность легко расщепляться на пластинки по параллельным друг другу плоскостям. Богатые месторождения слюд имеются в ряде районов России. По химическому составу различные виды слюд представляют собой водные алюмосиликаты. Важнейшие из них – *мусковит*, состав которого приблизительно может быть выражен формулой $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_2 \cdot 2H_2O$ и *флогопит* $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SO_2 \cdot 2H_2O$.

Мусковиты бывают бесцветными или имеют красноватый, зеленоватый и другие оттенки. Флогопиты чаще всего более темные: янтарные, золотистые, коричневые до почти черных, однако иногда встречаются флогопиты и весьма светлые. По электрическим свойствам мусковит лучше флогопита, кроме того, он более прочен механически, более тверд, гибок и упруг, чем флогопит.

Полиэтилен

Полиэтилен – это бесцветный прозрачный продукт полимеризации газообразного этилена, имеющий общую химическую формулу $(-CH_2-CH_2-)$. Полиэтилен имеет очень маленький $tg \delta = 0,0002 \dots 0,0004$. Из него научились делать методом экструзии (выдавливания) простую и надежную изоляцию кабеля с высокими электрическими характеристиками. Кабели с пластмассовой изоляцией в настоящее время изготавливаются на напряжение до 400 кВ. Полимеры делятся на две группы: *линейные* и *пространственные*.

«В *линейных полимерах* макромолекулы представляют собой цепочные последовательности повторяющихся звеньев. При этом отношение длины молекулы к поперечным размерам очень велико и может быть порядка 1000. Если молекулы мономера имеют только две свободные связи, способные соединяться с другими молекулами, то в результате получится линейный полимер – цепь, не имеющая никаких ответвлений (полиэтилен, полистирол). Такой полиэтилен имеет нагревостойкость до 80...90 °С» [11].

Молекулы *пространственных*, трехмерных полимеров, соединяются в пространстве в разных направлениях. Их образуют мономеры, имеющие три и более связей.

Между свойствами линейных и пространственных полимеров есть существенные различия. Линейные полимеры гибки и эластичны, большинство из них при большой температуре легко размягчается и расплавляется. Пространственные полимеры обладают большой жесткостью, расплавление происходит при высоких температурах, а многие просто сгорают и обугливаются.

Сшитый полиэтилен в сравнении с обычными полимерами обладает улучшенными механическими свойствами, химической и термической стойкостью. Процесс «поперечной

сшивки» – это процесс образования дополнительных химических связей между соседними молекулярными цепочками полимера. Сшитый полимер перестаёт быть термопластиком. Новоприобретенная «сшитая» структура полимера позволяет нагревать его выше температуры плавления, при этом он не теряет своей формы, не плавится и приобретает каучукоподобную консистенцию. В таком состоянии полимер можно подвергать изменению его геометрии (растяжению). После охлаждения полимер сохраняет новые размеры и приданную ему форму. Сшитый полиэтилен имеет нагревостойкость до 105 °С, а кратковременную до 200 °С [7].

2.3. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.3.1. Классификация проводников

Условно к проводникам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 10^{-5}$ Ом · м. С точки зрения зонной теории у проводников заполненная электронами зона вплотную прилегает к зоне проводимости или даже перекрывается ею ($\Delta W \leq 0$). Вследствие этого электроны из заполненной зоны свободно могут переходить на занятые уровни зоны проводимости под влиянием слабой напряженности электрического поля и вызывать протекание тока.

Проводниковые материалы можно разбить по агрегатному состоянию:

1. Газы и пары;
2. Жидкие проводники;
3. Твёрдые проводники.

Все *газы и пары*, в том числе и пары металлов, при низких напряжённостях электрического поля не являются проводниками. Однако если напряжённость электрического поля превзойдёт некоторое критическое значение $E_{кр}$, обеспечивающее начало ударной ионизации, то газ становится проводником с электронной и ионной проводимостью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объёма представляет особую проводящую среду, носящую название *плазмы*.

К *жидким проводникам* относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Правда, большинство металлов (за исключением ртути) имеют высокую температуру плавления, поэтому их трудно использовать в качестве проводников.

Среди твёрдых проводников наиболее часто в электротехнике применяются металлы и сплавы. У твердых металлических проводников высокая электро- и теплопроводность, характерный металлический блеск и высокая пластичность.

«Высокая электро- и теплопроводность металлических проводников обусловлена большой концентрацией n электронов проводимости. Удельное электрическое

сопротивление ρ металлических проводников изменяется в относительно узком интервале – от $1,6 \cdot 10^{-8}$ (Ag) до $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ Ом · м при нормальной температуре.

Твердые проводники подразделяются на следующие основные группы.

Металлы высокой проводимости – это металлы (Ag, Cu, Au, Al и др.) и их сплавы, имеющие при нормальной температуре ρ не более $5 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, использующиеся для изготовления проводов, кабелей, токопроводящих шин, обмоток трансформаторов, машин и т. п.

Сплавы высокого сопротивления – это сплавы (манганин, константан, нихромы и др.), образующие твердые растворы. Они имеют при нормальной температуре ρ не менее $30 \cdot 10^{-8}$ Ом · м и используются для изготовления электронагревательных элементов, реостатов, резисторов и т. п.

Металлы и сплавы различного назначения. К этой группе относятся:

– тугоплавкие металлы (W, Ta, Mo и др.), имеющие $T_{пл}$ выше, чем $T_{пл}$ железа (у Fe $T_{пл} = 1539$ °C);

– металлы со средним значением $T_{пл}$. Наибольшее применение из них получили металлы, обладающие ферромагнитными свойствами (Fe, Co, Ni);

– легкоплавкие металлы (Zn, Pb, Cd, Sn, Ga, Hg и др.) – это металлы, имеющие $T_{пл}$ ниже 500 °C;

– благородные металлы (Ag, Au, Pt и др.) с высокой химической стойкостью. Применение этих металлов и сплавов на их основе в электро- и радиотехнике самое разнообразное.

Контактные материалы – это определенные металлы, сплавы, угольные материалы, композиционные материалы и другие, используемые в скользящих и разрывных контактах в слабо- и сильноточных электрических цепях. **Сверхпроводники** – это материалы (чистые металлы, например Hg, Pb,

Al, сплавы, например Nb–Ti, V–Ga и др.), обладающие при температурах, близких к абсолютному нулю, ничтожно малым удельным сопротивлением. **Криопроводники** – это обычно металлы высокой проводимости (например, Cu, Al, Be), которые при криогенных температурах ($T < 100$ K) приобретают высокую удельную электропроводность. Провода и кабели с токопроводящими жилами из криопроводников эксплуатируются при температурах жидких водорода (20,4 K), неона (27,3 K) и азота (77,4 K).

В электроэнергетике в основном применяются металлические проводники, поэтому рассмотрим классическую электронную теорию металлов. Согласно этой теории, твердый проводник представляет систему, состоящую из положительно заряженных узлов кристаллической решетки внутри которой находится «электронный газ» из коллективизированных (свободных) электронов. В свободное состояние от каждого атома металла переходит от одного до двух электронов рисунке 2.56» [7].

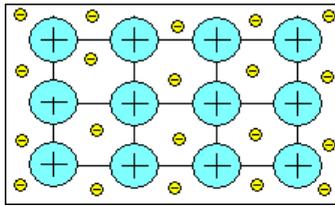


Рис. 2.56. Схема строения металлического проводника

При движении электронов по металлу они сталкиваются с узлами кристаллической решётки, передают ей энергию, накопленную при ускорении в электрическом поле, вследствие чего металл нагревается. Эта классическая теория объясняет не все закономерности, возникающие в металле, но этого нам достаточно.

2.3.2. Основные свойства проводниковых материалов

Сначала рассмотрим основные характеристики и экспериментальные зависимости для проводников.

Удельная электропроводность. Запишем дифференциальную форму закона Ома:

$$j = \gamma E,$$

где E – напряжённость электрического поля, В/м; j – плотность тока, А/м²; γ – удельная электропроводность, См/м.

Удельная электропроводность металлов не зависит от напряжённости электрического поля в весьма широких пределах.

Величина, обратная удельной электропроводности, называется удельным сопротивлением и измеряется в Ом · м.

$$\rho = 1 / \gamma$$

Диапазон значений удельных сопротивлений достаточно узок: у чистых металлов – серебра $1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, меди $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, алюминия $2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м, а у сплавов до $1000 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Причем чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решёткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления. Примеси, искажая решётку, приводят к увеличению удельного сопротивления.

Температурная зависимость удельного сопротивления проводников. С ростом температуры удельное сопротивление проводников увеличивается. Для примера на рисунке 2.57 приведена зависимость $\rho = f(t)$ для меди.

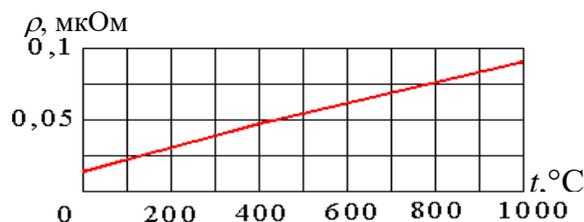


Рис. 2.57. Зависимость $\rho = f(t)$ для меди до плавления металла

Изменение удельного сопротивления можно характеризовать температурным коэффициентом:

$$TK_{\rho} = a_{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}$$

Согласно теоретическим положениям, значение температурного коэффициента для чистых металлов должно быть $a_{\rho} \approx 1 / T \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$. Большинство чистых металлов действительно имеют значения, близкие между собой, и составляют $a_{\rho} \approx (3...5) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. При изменении температуры в узких диапазонах допустима кусочно-линейная аппроксимация

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot [1 + a_{\rho} (T_2 - T_1)],$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления металла при температурах T_1 и T_2 , где $T_2 > T_1$.

При вычислении удельного сопротивления проводника необходимо учесть, что он при нагревании изменяется по двум причинам:

1. увеличивается амплитуда тепловых колебаний атомов, уменьшается средняя длина свободного пробега электронов и, как следствие, растёт удельное сопротивление. Этот процесс характеризуется температурным коэффициентом сопротивления

$$a_R = TK_R = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \approx \frac{1}{R_0} \cdot \frac{(R_1 - R_0)}{(T_1 - T_0)};$$

2. с ростом температуры проводник расширяется, в результате уменьшается его плотность, что приводит к дополнительному увеличению удельного сопротивления. Этот процесс характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения TK_{ℓ} :

$$a_{\ell} = TK_{\ell} = \frac{1}{\ell} \cdot \frac{d\ell}{dT} \approx \frac{1}{\ell_0} \cdot \frac{(\ell_1 - \ell_0)}{(T_1 - T_0)}.$$

Поэтому температурный коэффициент удельного сопротивления

$$TK_{\rho} \approx TK_R + TK_{\ell}.$$

У чистых металлов $TK_{\rho} \gg TK_{\ell}$, поэтому принимают $TK_{\rho} \approx TK_R$. Для примера в таблице 2.10 приведены значения температурных для некоторых металлов.

Таблица 2.10

Сравнение температурных коэффициентов чистых металлов

Материал	TK_{ρ}, K^{-1}	TK_{ℓ}, K^{-1}	TK_{ρ} / TK_{ℓ}
Медь	$4,33 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$	261
Алюминий	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	195
Серебро	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \cdot 10^{-5}$	220

Изменение удельного сопротивления металлов при плавлении. При переходе из твёрдого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение сопротивления (рис. 2.58).

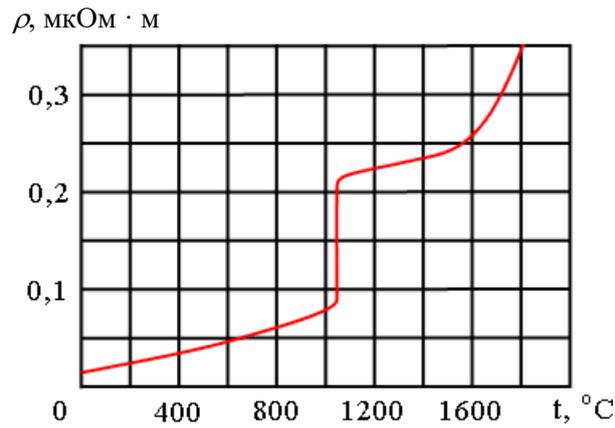


Рис. 2.58. Зависимость удельного сопротивления меди от температуры

Удельное сопротивление увеличивается при плавлении у тех металлов, которые при плавлении увеличивают объём, т. е. уменьшают плотность. У нескольких металлов (галлий, висмут, сурьма) при плавлении наоборот объём уменьшается и ρ падает.

Удельное сопротивление сплавов

Причинами увеличения сопротивления металла являются не только тепловые колебания узлов решетки, но и статические дефекты, которые также нарушают периодичность поля кристалла, например примеси. Следует заметить, что любая примесь, имеющая меньшее ρ , все равно приводит к повышению ρ (например, введение в медь примеси серебра увеличивает удельное сопротивление).

«Экспериментально установлено, что при малом содержании примесей удельное сопротивление возрастает пропорционально концентрации примесных атомов. На рисунке 2.59 приведены зависимости ρ меди от концентрации в долях процента различных химических элементов» [7].

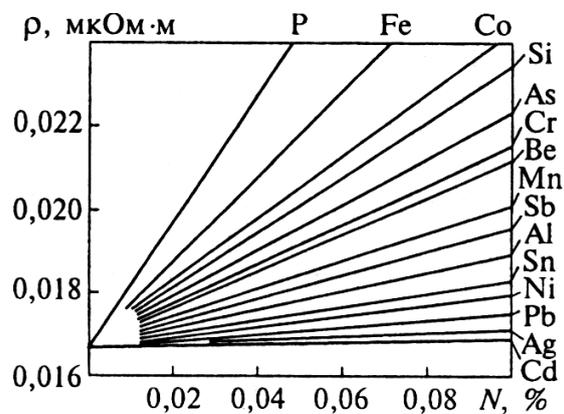


Рис. 2.59. Удельное сопротивление ρ меди в зависимости от концентрации N различной примеси в долях процента

Зависимость ρ от состава сплавов, образующих твердые растворы, проходит через максимум. Если сплавляемые металлы принадлежат к одной группе Периодической системы элементов Д. И. Менделеева (Au–Ag, Cu–Ag, Cu–Au, W–Mo и др.), то зависимость ρ от состава сплавов обычно имеет симметричный максимум.

Если оба сплавляемых металла принадлежат к разным группам периодической системы элементов, то максимум зависимости имеет несимметричную форму и сдвинут от середины диаграммы в сторону металла, удельное сопротивление которого при комнатной температуре больше (рис. 2.60).

Кривая ρ (рис. 2.60, а) имеет максимум при некотором сопротивлении компонентов. А вот у α_ρ (рис. 2.60, б) закономерность обратная: у чистых металлов высокие значения температурного коэффициента, а у сплавов α_ρ меньшие и даже могут приобретать небольшое отрицательное значение. Поэтому у сплавов коэффициенты TK_ρ и TK_ℓ имеют один порядок и пренебрегать коэффициентом TK_ℓ нельзя.

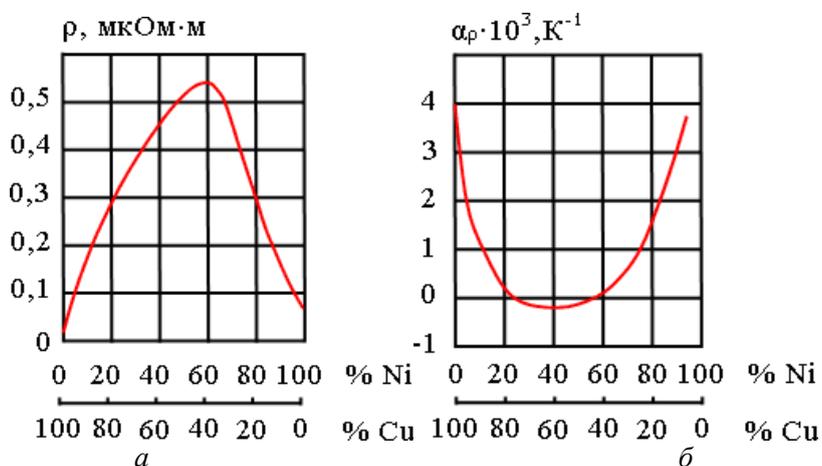


Рис. 2.60. Зависимость параметров сплавов медь – никель от состава: а – зависимость ρ от содержания примеси; б – зависимость α_ρ от содержания примеси

Теплопроводность металлов

От теплопроводности материала зависит, возможен ли тепловой пробой изоляции электрооборудования. Дело в том, что тепло, выделяющееся в изоляции вследствие диэлектрических потерь, необходимо отводить от изоляции. Для примера рассмотрим конденсатор. Мощность теплового потока от конденсатора определяется уравнением Фурье:

$$\Delta P_T = \lambda \frac{dT}{d\ell} S,$$

где $dT / d\ell$ – градиент температуры; S – площадь корпуса конденсатора; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К).

За передачу тепла через металл в основном ответственны свободные электроны. Поэтому теплопроводность λ металлов намного больше чем теплопроводность диэлектриков.

В таблице 2.11 приведены для сравнения значения теплопроводности диэлектриков и металлов.

Таблица 2.11

Значения теплопроводности некоторых материалов

<i>Материал</i>	λ , Вт/(м · К)
Бумага	0,1
Фарфор	1,6
Железо	73
Никель	95
Алюминий	209
Медь	390

Термоэлектродвижущая сила

Если спаять два разных металлических проводника, то между ними возникает контактная разность потенциалов U_{AB} (рис. 2.61).

Причины появления этой разности потенциалов две:

различие значений работы выхода электронов из разных металлов;

разная концентрация электронов в металлах.

Поэтому при соприкосновении двух металлов часть электронов проводимости перейдет от металла с меньшей работой выхода к металлу с большей работой выхода. «При этом первый металл зарядится положительно, а другой – отрицательно» [7].

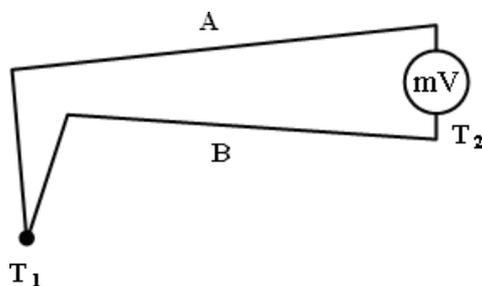


Рис. 2.61. Схема термопары

Если температура спаев одинакова, то сумма разностей потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. А если температура у спаев разная, то возникает термоэлектрическая движущая сила:

$$U = C (T_1 - T_2),$$

где C – постоянный для данной пары проводников коэффициент термоЭДС, измеряемый в микровольт на кельвин (мкВ/К).

Провод, составленный из двух изолированных, друг от друга проволок из различных металлов или сплавов (термопара), используется для измерения температур. В термопарах используются проводники, имеющие большой и стабильный коэффициент термоЭДС. Наоборот, для обмоток измерительных приборов и эталонных резисторов необходимо

применять проводниковые материалы и сплавы с возможно меньшим коэффициентом термоЭДС относительно меди, чтобы избежать появления в измерительных схемах паразитных термоЭДС, которые могли бы вызвать ошибки при точных измерениях.

Механические свойства проводников

Подробно механические свойства металлов будут рассмотрены в главе «Конструкционные материалы». Здесь приведем только пределы прочности некоторых проводников, применяемых в электроэнергетике (табл. 2.12).

Таблица 2.12

Пределы прочности некоторых проводников

Проводник	Медь (марка МТ)	Бронза (твердая)	Алюминий (марка АТ)	Альдрей	Сталь (мягкая)
Прочность, МПа	360...390	800...1200	160...170	350	700...750

2.3.3. Материалы высокой проводимости ($\rho < 5 \cdot 10^{-8}$ Ом · м)

К этим материалам относятся:

1. Серебро – $1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.
2. Медь – $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.
3. Золото – $2,4 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.
4. Алюминий – $2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.
5. Магний – $4,5 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.
6. Железо – $9,8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м.

В энергетике широкое применение нашли медь, алюминий и железо.

Медь

Достоинства:

1. Малое удельное сопротивление (меньше только у серебра).
2. Достаточно высокая механическая прочность (по сравнению с Al).
3. Стойкость к коррозии (по сравнению с Fe).
4. Хорошо обрабатывается (получают тонкую проволоку и лист).
5. Легко паяется и сваривается.

Недостатки:

1. Она редка, поэтому дорога.
2. В ряде случаев недостаточна механическая прочность.

3. Окисляется на воздухе (медные провода на воздухе в условиях близости моря подвергаются усиленной коррозии за счёт действия содержащихся в воздухе солей).

Для производства меди применяют медные руды (обычно сульфидные руды Cu_2S , CuS и т. д.). В них всего 1...6% содержания меди. В результате получают черновую медь (98,4...99,4% Cu). Затем её рафинируют, т. е. удаляют примеси. После рафинирования чистота меди достигает 99...99,5%.

После этого проводится электролитическая очистка.

Медь используется в качестве обмоточных проводов (в трансформаторах, двигателях и т. д.), жил кабелей, шин распределительных устройств. Кроме чистой меди, в энергетике широко используются ее сплавы: бронзы и латуни.

Бронза – сплав меди с оловом, добавляют кремний, фосфор, бериллий, хром, магний и кадмий. Это позволяет получить более высокие механические свойства. Предел прочности бронз 800...1200 МПа. Бронзы применяют для контактных проводов (так называемые троллеи), ножей рубильников, коллекторных пластин.

Латунь (сплав меди с цинком) имеет высокое относительное удлинение и повышенную прочность по сравнению с чистой медью. Латунь применяют в электротехнике для изготовления всевозможных токопроводящих деталей.

Алюминий

Алюминий является вторым по значению (после меди) проводниковым материалом.

Достоинства:

1. Алюминий в 3,5 раза легче меди. Если из алюминия и меди сделать провода равного сопротивления, то провод из алюминия хоть и будет иметь сечение в 1,63 раза больше, но всё равно будет в 2 раза легче медного.

2. Широко распространён в природе (его содержание в земной коре не меньше 7,5%).

3. Алюминий покрыт тонкой оксидной плёнкой, которая предохраняет его от дальнейшей коррозии (на него не действует водяной пар, пресная и морская вода).

4. Алюминий хорошо обрабатывается, из него можно получать тонкую фольгу (6...7 мкм).

Недостатки:

1. Алюминий имеет низкую механическую прочность (тонкую проволоку из него получить не удаётся).

2. Из-за плотной оксидной плёнки не паяется обычным способом, для этого нужны специальные припой и ультразвуковые паяльники.

3. Удельное сопротивление алюминия в 1,63 раза больше, чем у меди.

4. В месте контакта алюминия с другими металлами возникает большое переходное сопротивление и идёт усиленная коррозия, так как возникает гальваническая пара. Электрохимическая коррозия усиливается в присутствии влаги.

Алюминий применяется в следующих изделиях:

– провода ЛЭП (алюминиевые и сталеалюминевые, где механическую нагрузку несёт сталь);

– жилы кабеля;

– оболочки кабеля для замены свинца (защита от влаги);

– обкладки конденсаторов;

– обмотки некоторых трансформаторов и т. д.

Алюминий получают из руд: бокситы, каолины, алунины. Обычно получают из бокситов ($\text{Al}(\text{OH})_3$, AlOOH , Al_2O_3 и др.).

Для повышения механической прочности в алюминий добавляют примеси. Примером такого сплава является альдрей, содержащий 0,3...0,5% Mg, 0,4...0,7% Si и 0,2...0,3% Fe.

Другой выход повышения механической прочности алюминия найден при строительстве ЛЭП, здесь используют сталеалюминиевые провода (стальной провод посередине, алюминиевые провода поверх него – тип провода АС). Механическую нагрузку в них несет стальной сердечник, а электрическую – алюминиевые провода. Одновременно решается и вторая задача – увеличение диаметра провода из-за опасности возникновения короны (на 110 кВ минимальное сечение не менее АС-70).

Железо (сталь)

Как наиболее дешевый и доступный металл, обладающий высокой механической прочностью, железо представляет большой интерес для использования в качестве проводникового материала.

Достоинства:

1. Дешевый и широко распространён.

2. Высокая механическая прочность.

3. Неплохо паяется (хуже меди, но лучше, чем алюминий).

Недостатки:

1. Удельное сопротивление в 6–7 раз больше меди.

2. При переменном токе возникает поверхностный эффект, использует лишь часть сечения, поэтому увеличивается сопротивление.

3. При переменном токе возникают потери на гистерезис.

4. Имеют малую стойкость к коррозии, особенно в условиях повышенной влажности (для защиты покрывают цинком).

Применение:

– провода ЛЭП на низком напряжении (ток мал, сечение определяется механической прочностью);

– рельсы трамваев, железных дорог, метро;

– сталеалюминиевые провода.

2.3.4. Некоторые металлы, используемые в энергетике

В меньших объёмах в энергетике используются и другие металлы.

«**Вольфрам** имеет высокую температуру плавления 3380 °С, высокую прочность – 500...600 МПа, высокую износостойкость. Вольфрам дорог и трудно поддается обработке, поэтому его применяют только там, где нельзя заменить другим металлом: для изготовления нитей накаливания, контактов» [7].

Хром – один из самых распространенных металлов в земной коре. Он имеет температуру плавления 1900 °С, обладает высокой стойкостью к окислению, поэтому применяется в качестве защитного покрытия стали. Хром входит в состав нихромов.

Серебро имеет самое маленькое удельное сопротивление, стоек против окисления, неплохие механические свойства. Из него изготавливают тонкую проволоку на небольшие токи, контакты и обкладки конденсаторов.

Свинец имеет очень высокую коррозионную стойкость, низкую температуру плавления – 327 °С, сильно поглощает рентгеновское излучение. Нашел применение:

- для защиты от рентгеновского излучения (1 мм свинца равноценен 11,5 мм стали и 110 мм кирпича);
- изготовления оболочек кабелей (защита от влаги);
- изготовления плавких вставок предохранителей;
- изготовления пластин свинцовых аккумуляторов;
- изготовления мягких припоев.

Олово – мягкий металл, имеющий небольшую температуру плавления – 232 °С, стоек к окислению и воде. Олово применяют:

- для защитного покрытия металлов (лужение);
- при изготовлении мягких припоев;
- входит в состав бронз;
- в качестве обкладок в слюдяных конденсаторах.

Цинк имеет низкую температуру плавления – 420 °С, стоек к коррозии. Цинк применяется:

- в качестве защитных покрытий других металлов (например, стали);
- входит в состав латуни;
- входит в состав твёрдых припоев (медно-цинковых);
- в качестве обкладок в металлобумажных конденсаторах.

Ртуть – единственный металл, находящийся в жидком состоянии при нормальной температуре. Ртуть применяется:

- в качестве жидкого катода в ртутных выпрямителях, ртутных лампах и газоразрядных приборах;
- в лампах дневного света;
- в качестве ртутных контактов в реле.

Нашли также применение кобальт, палладий, платина, кадмий, индий и т. д.

2.3.5. Сплавы высокого сопротивления

К сплавам высокого сопротивления относятся сплавы, удельное сопротивление которых $\rho > 30 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Эти сплавы классифицируются по области применения:

1. Материалы для образцовых сопротивлений и электроизмерительных приборов.
2. Для резисторов.

3. Для нагревательных приборов и нагрузочных реостатов. К ним предъявляют следующие требования:

- большое удельное сопротивление;
- достаточная механическая прочность и технологичность, обеспечивающие возможность получения провода необходимого сечения;
- небольшая стоимость.

К материалам первой группы предъявляются дополнительные требования:

- стабильность сопротивления во времени (отсутствие старения);
- должен иметь небольшой температурный коэффициент ($\alpha_\rho = \min$);
- маленький коэффициент термоЭДС с медью.

Для третьей группы дополнительное требование – высокая температура нагрева.

Основным материалом *первой группы* является медно-марганцевый сплав **манганин** (название происходит от наличия в нём марганца – латинское *manganum*). Примерный состав его: Cu – 85%, Mn – 12%, Ni – 3%.

Основные параметры манганина:

- удельное сопротивление $\rho = (42...48) \cdot 10^{-8}$ Ом · м;
- температурный коэффициент мал $(6...50) \cdot 10^{-6}$ К⁻¹;
- коэффициент термоЭДС в паре с медью всего 1...2 мкВ/К;
- предел прочности $\sigma_p = 450...600$ МПа;
- предельная допустимая температура 200 °С.

Манганин выпускается в виде тонкой проволоки, на которую накладывают эмалево-волоконистую изоляцию.

Материалы *второй группы* имеют массовое применение. Для них допустим большой коэффициент термоЭДС, но повышены требования в отношении допустимой рабочей температуры. Основным материалом этой группы является медно-никелевый сплав **константан**. Его состав: 39...41% Ni, 1...2% Mn, остальное 56...59% Cu.

Название «константан» получил за постоянство удельного сопротивления ρ при изменении температуры $\alpha_\rho < 2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹.

Основные параметры константана:

- удельное сопротивление $(45...52) \cdot 10^{-8}$ Ом · м;
- температурный коэффициент $20 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹;
- термоЭДС в паре с медью 45...55 мкВ/К;
- предел прочности $\sigma_p = 450...650$ МПа;
- рабочая температура до 450 °С.

Константановые провода выпускаются также с изоляцией – обычно эмалево-волокнутой. Наличие в составе константана дорогого и дефицитного никеля удорожает и ограничивает его использование в изделиях массового производства.

Для электронагревательных приборов в основном применяются сплавы на основе железа: **нихром, фехраль, хромаль**.

Нихром – это сплав Fe – Ni – Cr, в нем 15...25% хрома, 55...78% никеля, 1,5% марганца.

Основные свойства нихрома:

- удельное сопротивление $(100...120) \cdot 10^{-8}$ Ом · м;
- температурный коэффициент $(100...200) \cdot 10^{-6}$ К⁻¹;
- рабочая температура до 1000...1100 °С.

Чем больше в сплаве железа, тем менее нагревостоек этот сплав. Хром наоборот придает высокую тугоплавкость окислам.

Хромоалюминиевые сплавы (фехраль, хромаль) намного дешевле нихромов, так как хром и алюминий дешевле. Но эти сплавы менее технологичны, хрупки, поэтому из них делают проволоку большого поперечного сечения.

Фехраль и **хромаль** – это сплавы Fe – Cr – Al. Они содержат 12...15% хрома, 3,5...5,5% алюминия, 0,7% марганца, а остальное – железо. Удельное сопротивление $\rho = (126...140) \cdot 10^{-8}$ Ом · м, предельная температура 750...1400 °С.

2.3.6. Припой

Припой – это специальный сплав, применяемый при пайке. Пайка осуществляется с целью создания механически прочного шва с малым переходным сопротивлением. Припой имеет температуру плавления меньшую, чем соединяемые металлы. Припой смачивает металл, растекается по нему и заполняет зазоры между соединяемыми деталями.

Припои делятся на две группы:

- а) мягкие (температура плавления до 400 °С),
- б) твёрдые (температура плавления выше 500 °С).

Мягкие припои имеют предел прочности на растяжение $\sigma_p = 50...70$ МПа, *твёрдые* – до 500 МПа. Мягкие припои в основном оловянно-свинцовые (марка ПОС) с содержанием олова от 18 до 90%, температура плавления 190...280 °С. Существуют также мягкие припои с добавками алюминия, серебра и т. д.

К числу наиболее широко применяемых твёрдых припоев относятся: медно-цинковые и серебряные.

Медно-цинковые припои (марка ПМЦ) содержат меди 36...54% (остальное цинк) и имеют температуру плавления 825...860 °С.

Припои медно-серебряно-цинковые (марка ПСр) содержат меди 26...40%, серебра 25...70%, цинка 4...35% и имеют температуру плавления 720...765 °С.

2.3.7. Сверхпроводники и криопродники

В 1911 г. голландский учёный Х. Камерлинг-Оннес обнаружил, что при охлаждении до температуры 4,2 К сопротивление кольца из замороженной ртути внезапно, резким скачком падает до нуля (рис. 2.62). Это явление получило название *сверхпроводимости*.

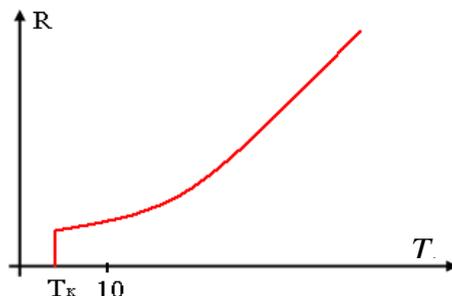


Рис. 2.62. Изменение сопротивления ртути при глубоком охлаждении ($T_k = 4,2$ К)

В дальнейшем, кроме ртути, были обнаружены многие другие материалы: чистые, сплавы и химические соединения. В настоящее время сверхпроводящее состояние получено у 39 химических элементов (из них у 33 металлов) и более 1000 сплавов и химических соединений. Но для многих проводниковых материалов, таких как серебро, медь, золото, платина, даже при очень низких температурах достичь сверхпроводящего состояния не удалось.

Явление сверхпроводимости характерно тем, что электрический ток, однажды наведённый в сверхпроводящем контуре, будет длительно (годами) циркулировать по этому контуру без заметного уменьшения своей силы, и притом без всякого подвода энергии извне (конечно, если не учитывать неизбежного расхода энергии на работу охлаждающего устройства, которое должно поддерживать температуру контура ниже значения T_k). Такой сверхпроводящий контур создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, подобное постоянному магниту.

Сверхпроводимость разрушается по двум причинам:

- при повышении температуры до значений выше T_k ;
- при возникновении на поверхности сверхпроводника магнитного поля с магнитной индукцией, превышающей индукцию перехода (безразлично, создаётся ли она током сверхпроводника или сторонним источником магнитного поля) (рис. 2.63).

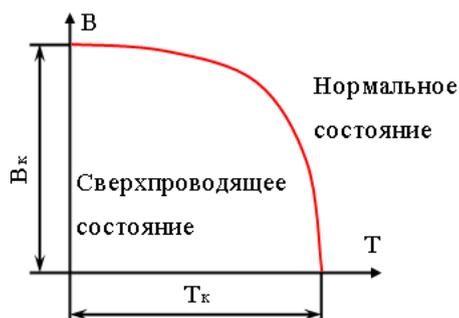


Рис. 2.63. Диаграмма состояния сверхпроводника

Поэтому первоначальные попытки изготовить практически природный сверхпроводниковый электромагнит неизменно заканчивались неудачей.

В дальнейшем удалось объяснить явление сверхпроводимости металлов. При температуре $T < T_k$ образуются *электронные пары*, названные *куперовскими* (от фамилии учёного Л. Купера). В куперовских парах электроны имеют противоположные спины и равные по величине, но противоположные по направлению импульсы, поэтому спин и полный импульс равны нулю. Пары не могут двигаться независимо друг от друга, каждая пара движется строго согласованно. Между одноименно заряженными электронами возникают связи большой энергии и обмена энергетическими импульсами между ними и решёткой нет.

При достижении критической температуры T_k все электронные пары распадаются, и состояние сверхпроводимости исчезает.

Все известные сверхпроводники можно разделить на следующие группы:

- сверхпроводники I рода;
- сверхпроводники II рода;
- сверхпроводники III рода.

Для *сверхпроводников I рода* характерен скачкообразный переход в сверхпроводниковое состояние (см. рис. 2.62). К ним относится большинство чистых металлов. Они имеют очень низкие температуры и малые критические магнитные индукции B_k , поэтому они не пригодны для практического использования явления сверхпроводимости.

У *сверхпроводников II рода* переход в сверхпроводящее состояние происходит не скачком, а на протяжении некоторого температурного диапазона. К ним в основном относятся сплавы и химические соединения.

У *сверхпроводников III рода* имеются крупные неоднородности (дефекты решетки и примеси), их еще называют «жесткими». К ним относится большая группа сплавов и химических соединений на основе ниобия Nb и ванадия V.

Большинство рассмотренных сверхпроводников имеет низкие критические значения точек Кюри T_k и индукций B_k и должны охлаждаться жидким гелием.

В 1986–1987 гг. ученые Швейцарии, СССР, США и других стран получили принципиально новый сверхпроводниковый материал – *керамику*. Это открытие вызвало большой интерес к явлению сверхпроводимости, так как благодаря высоким значениям точек Кюри (T_k) и особенно критическим магнитным индукциям (B_k) предоставляются широкие возможности его практического использования. В настоящее время известно уже несколько видов керамик, имеющих $T_k > 77$ К, и позволяющих использовать в установках жидкий азот (такая установка примерно в 30 раз дешевле гелиевой). Ртутная керамика (Hg – Ba – Ca – Cu – O), например, имеет уже $T_k = 135$ К.

Явления сверхпроводимости можно использовать:

- для получения сверхпроводниковых магнитов;
- создания электрических машин, трансформаторов малой массы и габаритов, но с высоким к.п.д.;

- передачи большой мощности на дальние расстояния по ЛЭП;
- волноводов с особо малым затуханием;
- магнитной подвески вагонов сверхскоростного железнодорожного транспорта и т. д.

В США висмутовая керамика ($T_k = 115$ К) используется в сверхпроводящей электросети длиной 120 м $U_{ном} = 24$ кВ на жидком азоте с передаваемой мощностью 100 МВ·А. В России первая сверхпроводящая линия (200 м) была введена в 2009 г.

Криопроводимость – это достижение некоторыми металлами весьма малой удельной проводимости при криогенных температурах (температурах выше температуры сверхпроводникового перехода, если он у него есть).

Для примера на рисунке 2.64 приведены зависимости удельного электрического сопротивления от температуры для алюминия, меди и бериллия.

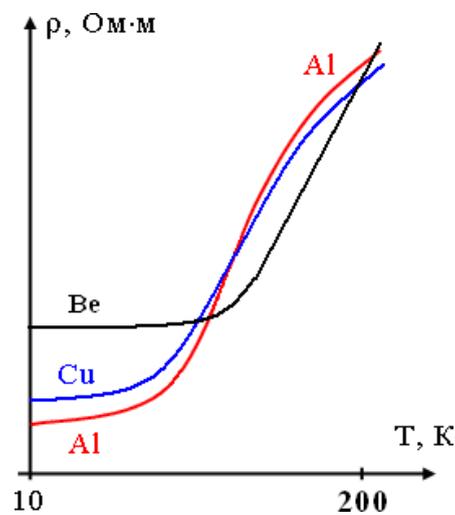


Рис. 2.64. Зависимость удельного электрического сопротивления алюминия, меди и бериллия от температуры

При нормальной температуре у алюминия удельное сопротивление составляет $28 \cdot 10^{-9}$ Ом · м, у меди $17 \cdot 10^{-9}$ Ом · м, а при криогенных температурах удельное сопротивление снижается до $0,05 \cdot 10^{-9}$ Ом · м. Причем у алюминия при температуре 1,2 К возникает сверхпроводимость, а у меди она не обнаружена.

Материалы, обладающие особо благоприятными свойствами для применения в качестве проводников в условиях криогенных температур (ниже -173 °С или 100 К), называются криопроводниками или гиперпроводниками. При низких температурах удельное сопротивление практически перестаёт зависеть от температуры и определяется остаточным сопротивлением $\rho_{ост}$, являющимся количественной мерой концентрации дефектов кристаллической решетки

$$\rho = \rho_{тепл} + \rho_{ост} \cdot$$

Весьма малое, но всё же конечное значение удельного сопротивления объясняется тем, что при низкой температуре оно обусловлено, как правило, наличием примесей и физическими дефектами решетки. Поэтому для криопроводников необходимо применять хорошо отожженный металл высокой чистоты.

Мерой качества криопроводникового материала служит относительное сопротивление R_T , определяемое как отношение удельного сопротивления металла при 20 °С (293 К) к удельному сопротивлению при криогенной температуре.

В качестве криогенного материала могут использоваться бериллий, медь, алюминий.

У отожженной проводниковой *меди* с содержанием примесей 0,03% относительное удельное сопротивление R_T может достигать при температурах жидкого водорода до $R_T \approx 190 \dots 200$, а у особо чистой (99,999%) меди до $R_T \approx 1430$. Для алюминия марки А999 относительное сопротивление достигает $R_T \approx 2\,400$.

Наиболее перспективно использование *алюминия* в качестве криопроводящего материала, так как он более доступен, дешевле и имеет удельное сопротивление $(1 \dots 2) \cdot 10^{-12}$ Ом · м при содержании примесей не более 0,001%.

Можно применить более дорогой, дефицитный, сложный в технологическом отношении и токсичный *бериллий*, но зато использовать в качестве хладагента более дешевый и легко доступный жидкий азот и тем самым уменьшить затраты мощности на охлаждение. При температурах жидкого азота (77,4 К) он имеет удельное сопротивление примерно в 10 раз ниже по сравнению со сверхчистыми медью и алюминием.

Применение криопроводников в электрических машинах, аппаратах, кабелях и т. п. имеет свои преимущества, притом весьма существенные.

1. В сверхпроводниковых устройствах в качестве охлаждающего агента применяется жидкий гелий. В криопроводниковых установках применяется более высококипящий и дешевый хладагент: жидкий водород или даже жидкий азот. Это значительно упрощает и удешевляет выполнение и эксплуатацию устройства.

2. В сверхпроводниковом устройстве, например в электромагните с большим током, накапливается большая энергия $LI^2 / 2$. Если из-за случайного повышения температуры или магнитной индукции в сверхпроводящем контуре разрушена сверхпроводимость, то внезапно освободится большое количество энергии, что может вызвать серьезную аварию. В случае же криопроводниковой цепи повышение температуры вызовет лишь постепенное возрастание сопротивления этой цепи без эффекта взрыва.

Криопроводники применяются в основном для изготовления токопроводящих жил кабелей и проводов, работающих при температурах жидкого водорода 20,4 К, неона 27,3 К и азота 77,4 К.

2.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.4.1. Общие сведения и классификация полупроводников

Ранее были рассмотрены диэлектрики и проводники. Существует большая группа веществ, удельное сопротивление ρ которых при температуре 20 °С лежит посередине: больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков. Согласно зонной теории

электропроводности, у диэлектриков ширина запрещенной зоны $\Delta W > 3$ эВ, у проводников $\Delta W \leq 0$. У большинства используемых в технике полупроводников ширина зоны $\Delta W = 0,05 \dots 3$ эВ.

В отличие от металлов полупроводники имеют в широком интервале температур отрицательный температурный коэффициент. С повышением температуры число свободных электронов в полупроводнике возрастает, а с понижением до абсолютного нуля – убывает, вплоть до нуля. Таким образом, электропроводность полупроводников сильно зависит от температуры.

Основной особенностью полупроводников является их способность изменять свои свойства под влиянием внешних воздействий. Благодаря сравнительно небольшой ширине запрещенной зоны под влиянием поглощения некоторого количества энергии отдельные возбужденные электроны могут быть переброшены через запрещенную зону в зону проводимости (передача энергии электронам может происходить посредством температуры, света, электрического поля, механических усилий и т. д.). На месте электронов, ушедших из заполненной зоны, остаются свободные места – «электронные дырки». Полупроводники можно разделить на собственные и примесные. В чистом (собственном) полупроводнике число электронов равно числу дырок. Место дырок могут занимать другие электроны из валентной зоны. Таким образом, дырка может перемещаться по полупроводнику. При приложении к полупроводнику внешнего электрического поля электроны перемещаются в одном направлении, а дырки – в другом. Поэтому электропроводность полупроводников складывается из двух составляющих:

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_d,$$

где γ_e – электронная электропроводность; γ_d – дырочная электропроводность.

Электропроводность чистых полупроводников носит в основном электронный характер; эффект дырочной электропроводности, эквивалентной электропроводности положительными зарядами, выражен слабо. Одна из причин этого – разная подвижность электронов и дырок из-за отличия в эффективных массах электронов m_n и дырок m_p .

Для полупроводников характерна еще одна *особенность* – исключительная чувствительность проводимости к различным примесям, которые сильно изменяют энергетическую диаграмму полупроводника. Например, при введении в химически чистый германий всего 0,001% мышьяка его удельная проводимость увеличится в 10 000 раз.

Используемые в практике полупроводниковые материалы могут быть подразделены на следующие группы:

1. Простые (собственные, чистые) полупроводники – это полупроводники, не содержащие примесей;
2. Примесные полупроводники. Их можно разделить на две подгруппы: а) примеси замещения, б) примеси внедрения;
3. Полупроводниковые химические соединения.

Среди них наибольшее распространение получили двойные (бинарные) соединения вида A^mB^n , где А и В – химические элементы, а m и n – группы по Периодической системе Д.И. Менделеева;

4. Полупроводниковые комплексы – материалы, содержащие более двух элементов.

2.4.2. Собственные и примесные полупроводники

Собственными называются полупроводники, не содержащие примесей. Простых полупроводников существует всего девять, они приведены в табл. 2.13. В современной технике приобрели особое значение кремний, германий и частично селен (в некоторых модификациях свойствами полупроводников обладают еще олово (серое), сурьма и углерод).

Таблица 2.13

Простые полупроводники

Элемент	Группа	ΔW , эВ
Бор (В)	III	1,10
Кремний (Si)	IV	1,12
Германий (Ge)	IV	0,72
Фосфор (P)	V	1,50
Мышьяк (As)	V	1,20
Сера (S)	VI	2,50
Селен (Se)	VI	1,70
Теллур (Te)	VI	0,36
Йод (I)	VII	1,25

Для наиболее широко используемых собственных полупроводников ширина запрещенной зоны составляет 0,5...2,5 эВ. В собственных полупроводниках число электронов равно числу дырок.

Электрон из валентной зоны в зоне проводимости, преодолев запрещенную зону ΔW , может оказаться за счет энергии тепловых колебаний решётки или энергии внешнего воздействия на полупроводник.

Число электронов в зоне проводимости, перешедших за счет тепловых колебаний, можно оценить по формуле

$$n = 2N_c \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right),$$

где N_c – число энергетических уровней в зоне проводимости.

Коэффициент 2 показывает, что на каждом уровне могут находиться два электрона.

Так как при комнатной температуре тепловая энергия $kT \approx 0,026$ эВ, то число электронов не может быть большим. Поэтому для большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники.

Примесные полупроводники

У примесных полупроводников в рабочем интервале температур поставщиками свободных носителей заряда являются примеси. Ощутимая концентрация собственных носителей появляется при возможно более высокой температуре, чем рабочий интервал температур. Чаще других в качестве основного полупроводника применяют элементы IV группы: кремний ($\Delta W = 1,12$ эВ) и германий ($\Delta W = 0,72$ эВ).

Примеси бывают замещения и внедрения.

В **примесях замещения** атомы примесей находятся в узлах кристаллической решётки. Примеси замещения можно разделить на доноры и акцепторы. Рассмотрим разницу в их влиянии на основной полупроводник на примере основного полупроводника – германия.

Германий (Ge) относится к IV группе, т. е. у него на внешней оболочке четыре валентных электрона. Он образует в кристалле четыре ковалентные связи с соседними атомами. В каждой ковалентной связи по одному электрону от атома.

Вместо трёхмерной решётки изобразим схематически ковалентные связи в виде сетки (рис. 2.65, а).

Если к германию добавить примесь мышьяка, который относится к V группе и имеет на внешней орбите пять валентных электронов, то пятый электрон в ковалентной связи не участвует. Со своим атомом он связан только силой кулоновского взаимодействия, энергия этой связи $W \approx 0,01 \dots 0,1$ эВ. Такая примесь называется донорной (дающей), она создает дополнительную энергетическую зону рядом с зоной проводимости, в результате облегчается переход с дополнительной зоны в зону проводимости (см. рис. 2.65, б). Полупроводник с такой примесью имеет концентрацию электронов, большую концентрации дырок. Эти полупроводники называются *полупроводниками n-типа*.

Если к германию добавить примесь индия, который относится к III группе и имеет на внешней орбите три валентных электрона, то в одной из ковалентных связей появится вакантное место – дырка (рис. 2.66, а). Такая примесь называется акцепторной, она создаёт дополнительную энергетическую зону рядом с заполненной зоной (рис. 2.66, б).

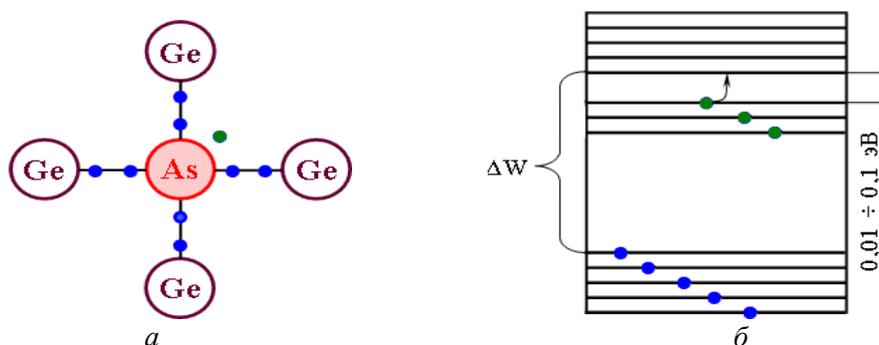


Рис. 2.65. Схематическое изображение кристаллической решётки германия с примесью мышьяка (а) и его энергетической диаграммы (донорная примесь) (б)

Электроны, получившие дополнительную энергию, будут в первую очередь переходить в эту дополнительную энергетическую зону. Эти электроны (в виду разобоченности атомов

примеси) не участвуют в электрическом токе. Такой полупроводник будет иметь концентрацию дырок, большую, чем концентрация электронов, перешедших из валентной зоны в зону проводимости. Эти полупроводники относятся к *полупроводникам p-типа*.

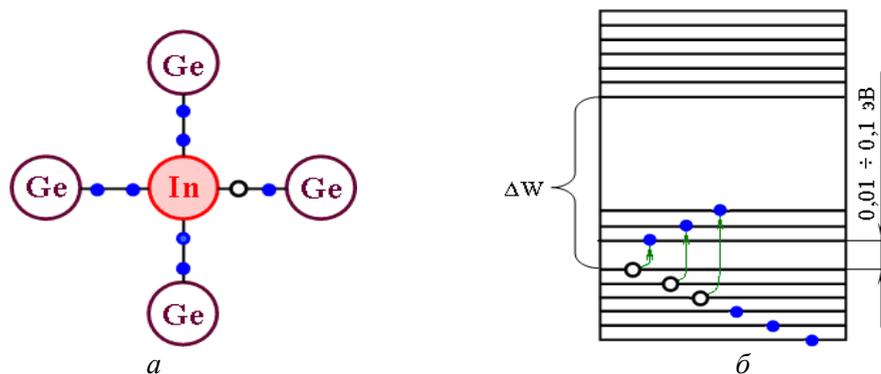


Рис. 2.66. Схематическое изображение кристаллической решётки германия с примесью индия (а) и его энергетической диаграммы (акцепторная примесь) (б)

Основные и неосновные носители заряда

Те носители, концентрация которых в данном полупроводнике больше, носят название *основных*, а те, концентрация которых меньше, – *неосновных*. Так в полупроводнике n-типа электроны являются основными носителями, а дырки – неосновными. В полупроводнике p-типа основные носители – дырки, а неосновные – электроны.

Примесная электропроводность для своего появления требует меньших энергетических воздействий (сотые или десятые доли электрон-вольта), чем собственная, поэтому она обнаруживается при более низкой температуре, чем собственная электропроводность полупроводника.

Примеси внедрения

Примеси внедрения располагаются не в узлах, вместо основного элемента, а в межузловых пространствах. Тип электропроводности в этом случае зависит от размеров примесных атомов.

Если внедрять в тесные межузловые пространства решётки германия большой по размерам атом лития (рис. 2.67), то это оказывается возможным только после отрыва у него единственного электрона с внешней орбиты. Образовавшийся меньший по размеру ион лития помещается в межузловое пространство, а освободившийся электрон обуславливает электропроводность n-типа.

А внедрение в межузловое пространство атома кислорода, имеющего сравнительно небольшие размеры и шесть электронов на внешней орбите, приводит наоборот к захвату

атомом кислорода двух электронов (до восьми) из атомов полупроводника, вследствие чего возникает электропроводность р-типа.

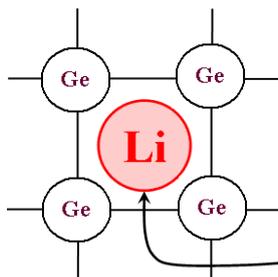


Рис. 2.67. Схематическое изображение внедрения атома лития в межузловое пространство кристаллической решётки германия

2.4.3. Воздействие внешних факторов на электропроводность полупроводников

У полупроводников есть хоть и узкая, но запрещенная зона. Чтобы увеличить электропроводность полупроводника, нужно подвести энергию извне. Рассмотрим основные способы подведения энергии.

Влияние температуры на электропроводность полупроводников

Рассмотрим полупроводник с примесями. Для полупроводников с одним носителем заряда удельная электропроводность γ определяется выражением

$$\gamma = n \cdot q \cdot \mu,$$

где n – концентрация свободных носителей заряда, м^{-3} ; q – величина заряда каждого из них; μ – подвижность носителей заряда, равная средней скорости v носителя заряда к напряженности E поля: $\mu = v / E$, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

На рисунке 2.68 представлена температурная зависимость концентрации носителей. В области низких температур участок зависимости между точками a и b характеризует только концентрацию носителей, обусловленную примесями. С увеличением температуры число носителей, поставляемых примесями, возрастает, пока не истощатся электронные ресурсы примесных атомов (точка b). На участке b - $в$ примеси уже истощены, а перехода электронов основного полупроводника через запрещенную зону еще не обнаруживается. Участок кривой с постоянной концентрацией носителей заряда называют областью истощения примесей. В дальнейшем температура настолько велика, что начинается быстрый рост концентрации носителей вследствие перехода электронов через запрещенную зону (участок $в$ - $г$). Наклон этого участка характеризует ширину запрещенной зоны полупроводника (тангенс угла наклона α даёт значение ΔW). Наклон участка a - b зависит от энергии ионизации примесей $\Delta W_{\text{п}}$.

На рисунке 2.69 представлена температурная зависимость подвижности носителей заряда для полупроводника.

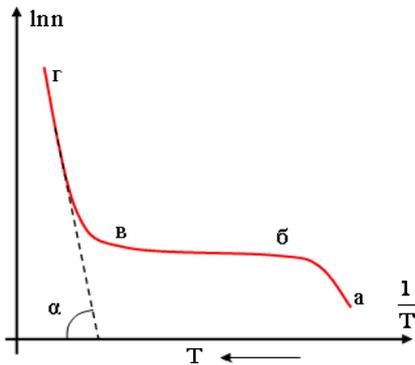


Рис. 2.68. Типичная зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике от температуры

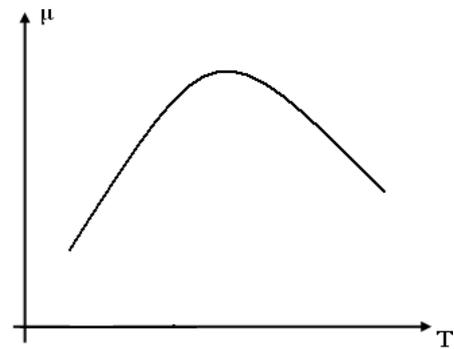


Рис. 2.69. Температурная зависимость подвижности носителей заряда в полупроводнике

Увеличение подвижности свободных носителей заряда с повышением температуры объясняется тем, что чем выше температура, тем больше тепловая скорость движения свободного носителя v . Однако при дальнейшем увеличении температуры усиливаются тепловые колебания решетки, носители заряда начинают все чаще с ней сталкиваться, и подвижность падает.

На рисунке 2.70 представлена температурная зависимость удельной электропроводности для полупроводника. Эта зависимость сложнее, так как электропроводность зависит от подвижности и числа носителей:

$$\gamma = n \cdot q \cdot \mu.$$

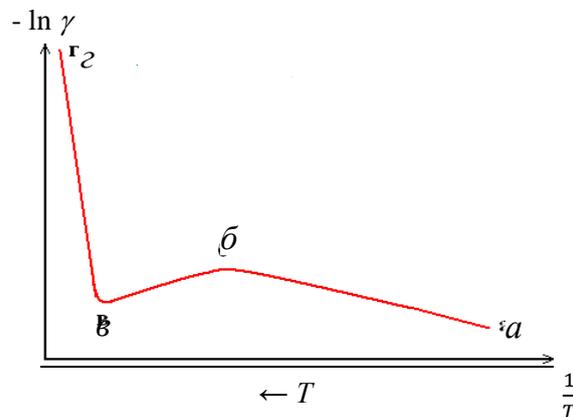


Рис. 2.70. Температурная зависимость удельной электропроводности для полупроводника

На участке $a-b$ рост удельной электропроводности с увеличением температуры обусловлен примесью (по наклону прямой на этом участке определяют энергию активации примесей $W_{п}$). На участке $b-в$ наступает насыщение и число носителей не растет, а проводимость падает из-за уменьшения подвижности носителей заряда. На участке $в-г$ рост проводимости обусловлен увеличением числа электронов основного полупроводника, преодолевших запрещенную зону. По наклону прямой на этом участке определяют ширину запрещенной зоны основного полупроводника.

Для примесного полупроводника электропроводность

$$\gamma = \gamma_1 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right) + \gamma_2 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W_1}{kT}\right),$$

где γ – удельная электрическая проводимость, См/м; ΔW – ширина запрещенной зоны собственного полупроводника, эВ; ΔW_1 – энергия ионизации примесей; T – абсолютная температура, К; k – постоянная Больцмана;

γ_1 и γ_2 – множители, не зависящие от температуры, они равны проводимости γ при $T = \infty$, т. е. когда все валентные электроны перешли в зону проводимости.

Терморезисторы – это полупроводниковые резисторы, значительно изменяющие свое сопротивление при изменении температуры.

Воздействие света на электропроводность полупроводников

Фотопроводимость – это свойство полупроводников увеличивать электропроводность под воздействием электромагнитного излучения. Электропроводность полупроводника увеличивается под воздействием потока фотонов. Энергия фотона (в электрон-вольтах)

$$W_\phi = 1,23 / \lambda,$$

где λ – длина волны, мкм.

Поэтому существует граничная длина волны, для которой выполняется условие $W_\phi < \Delta W$.

На рисунке 2.71 показана проводимость германия в зависимости от длины волны падающего излучения. Ширина запрещенной зоны германия 0,72 эВ, пороговая длина волны $\lambda = 1,8$ мкм, она лежит в инфракрасной области спектра.

Левее максимума кривой наблюдается спад проводимости, это объясняется быстрым увеличением коэффициента поглощения с ростом частоты и уменьшением глубины проникновения падающей на полупроводник энергии.

Полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых изменяется под воздействием лучистой энергии, называют фоторезисторами.

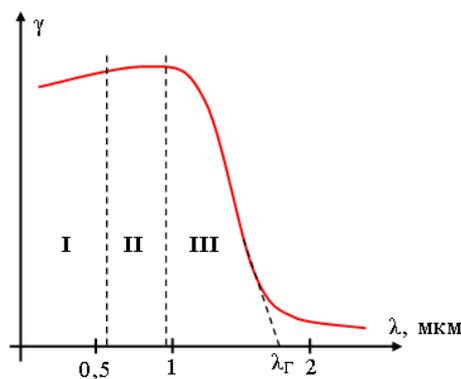


Рис. 2.71. Проводимость германия в зависимости от длины волны:
I – видимая область спектра; II – красная; III – инфракрасная

Влияние сильных электрических полей на электропроводность полупроводников

Электропроводность полупроводников зависит от напряжённости электрического поля. На рисунке 2.72 показана зависимость удельной проводимости от напряжённости электрического поля.

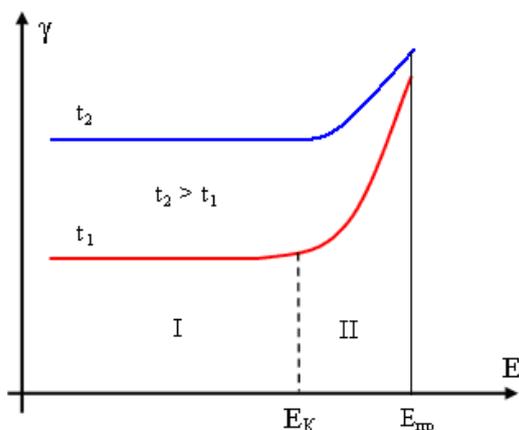


Рис. 2.72. Зависимость удельной проводимости полупроводника от напряжённости электрического поля E при различных температурах (t) для слабых (I) и сильных (II) полей

До напряженности электрического поля, называемой критической E_k и равной $10^4 \dots 10^6$ В/м, удельная электропроводность γ не зависит от напряженности поля, т. е. соблюдается закон Ома

$$i = \gamma \cdot E.$$

При напряженностях электрического поля $E > E_k$ в полупроводниках начинают появляться избыточные носители заряда, и удельная электропроводность его возрастает.

Ударная ионизация возникает при напряженностях $E > 10^7$ В/м, когда на длине свободного пробега электрон может накопить энергию, достаточную при соударении для заброса электрона из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому концентрация электронов начинает лавинообразно нарастать, резко возрастает ток и при $E_{пр}$ произойдет электрический пробой.

Влияние механических усилий на электропроводность полупроводников

Электропроводность полупроводников изменяется вследствие увеличения или уменьшения межуатомных расстояний (рис. 2.73). Ширина запрещенной зоны может как увеличиваться, так и уменьшаться при сближении атомов, и у разных полупроводников одна и та же деформация может вызывать как увеличение, так и уменьшение удельной проводимости.

На данном принципе основаны тензодатчики, они фиксируют деформацию.

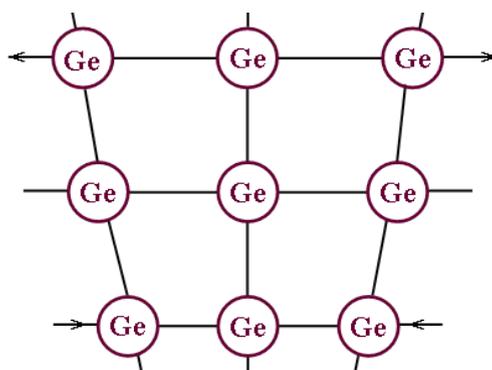


Рис. 2.73. Деформация полупроводника при механическом воздействии проводимости

2.4.4. Простые полупроводники

Из девяти элементов, обладающих свойствами полупроводников, перечисленных в таблице 2.12, рассмотрим те, которые получили наибольшее применение в технике: германий и кремний.

Германий – один из наиболее тщательно изученных полупроводников, и многие явления, характерные для полупроводников, впервые экспериментально были обнаружены на этом материале.

Содержание германия в земной коре невелико, около $7 \cdot 10^{-4}\%$. В результате химической переработки исходного сырья образуется тетрахлорид германия GeCl_4 , а из него в процессе дальнейшей переработки получают слитки германия. В германии в небольших концентрациях обычно присутствуют никель (Ni), кальций (Ca), медь (Cu), марганец (Mn), мышьяк (As), железо (Fe), кремний (Si). Для полупроводников необходим тщательно очищенный германий. Один из способов очистки – метод зонной плавки. Данный метод заключается в том, что большинство примесей обладает большей растворимостью в жидкой фазе германия, чем в твердой, и уносятся с расплавленной зоной.

По этому методу очистки (рис. 2.74) слиток германия 3 помещают в графитовую лодочку 4, заключенную в кварцевую трубку 1, по которой непрерывно проходит инертный газ. Высокочастотный контур 2 имеет несколько витков, каждый виток даёт узкую зону плавления 6, которая медленно перемещается вдоль очищаемого образца, так как витки двигаются вместе с кареткой 5. В результате такой очистки примеси концентрируются у одного конца слитка, от которого затем отрезается загрязненная часть длиной 20...25 мм.

Германий применяется для изготовления выпрямителей, транзисторов, фоторезисторов, фототранзисторов и т. д. Германиевые приборы должны быть защищены от действия влажности, они имеют узкий рабочий диапазон температур $-600...+70$ °С.

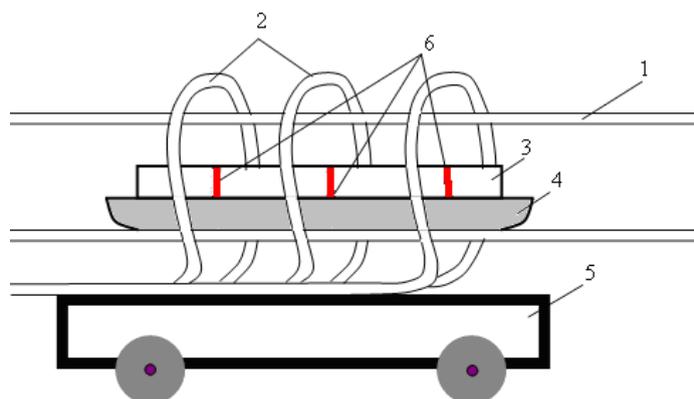


Рис. 2.74. Схема устройства для зонной плавки: 1 – кварцевая труба; 2 – витки контура высокочастотного генератора; 3 – слиток очищаемого германия; 4 – графитовая лодочка; 5 – перемещающаяся каретка, на которой укреплены витки; 6 – зоны плавления (выделены) в плоскости витков

Кремний, как и германий, относится к IV группе Периодической системы элементов Д.И. Менделеева. Он является одним из самых распространенных элементов в земной коре, его содержание в ней примерно 29%. Однако в свободном состоянии в природе он не встречается.

Технический кремний (около одного процента примесей), получаемый восстановлением из диоксида SiO_2 в электрической дуге между графитовыми электродами, широко применяется в черной металлургии как легирующий элемент (например, в электротехнической стали). Технический кремний как полупроводник использован быть не может. Он является исходным сырьем для производства кремния полупроводниковой чистоты, содержание примесей в котором должно быть менее $10^{-6}\%$.

Технология получения кремния полупроводниковой чистоты очень сложна, она включает несколько этапов. Конечная очистка кремния может выполняться методом зонной плавки, при этом возникает ряд трудностей. Температура плавления кремния значительно выше температуры плавления германия и близка к температуре размягчения трубок, изготовленных из кварцевого стекла. Из этих трубок в стержень может попасть кислород и другие примеси. Кроме того, кремний взаимодействует с углеродом, поэтому зонную плавку кремния приходится вести без графитовой лодочки и не в кварцевых трубках, а в камерах из тугоплавких металлов.

Кремний поэтому лучше очищать методом бестигельной зонной плавки (рис. 2.75).

В этом случае слиток закрепляется в вертикальном положении, а расплавленную зону, образовавшуюся под витком высокочастотного индуктора, перемещают вдоль слитка вниз и вверх, концентрируя примеси в одном из концов слитка. Образовавшаяся узкая расплавленная зона удерживает между собой твердые части слитка за счет сил поверхностного натяжения.

Основные свойства германия и кремния приведены в таблице 2.14.

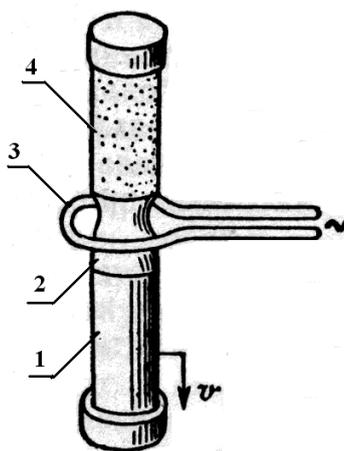


Рис. 2.75. Схема бестигельной зонной плавки:

1 – монокристалл; 2 – расплавленная зона; 3 – индуктор; 4 – полукристаллический стержень

Таблица 2.14

Основные свойства германия и кремния

<i>Основные свойства</i>	<i>Германий</i>	<i>Кремний</i>
Атомный номер	32	14
Атомная масса	72,60	28,06
Температура плавления, °С	936	1414
Собственное удельное сопротивление при температуре 20 °С, Ом · м	0,47	2000
Ширина запрещенной зоны при температуре 20 °С, эВ	0,72	1,12

В настоящее время кремний является основным материалом для изготовления полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, стабилитронов, тиристоров и т. д. У кремния верхний предел рабочей температуры приборов может составлять в зависимости от степени очистки материалов 120...200 °С, что значительно выше, чем для германия.

2.4.5. Полупроводниковые химические соединения (бинарные соединения)

Полупроводниковыми свойствами обладают не только простые полупроводники (германий, кремний), но и целый ряд химических соединений. Среди них наибольшее распространение получили двойные (бинарные) соединения $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{IV}$ и др.

Соединения $A^{III}B^V$

Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$ являются ближайшими аналогами кремния и германия. Они образуются в результате взаимодействия элементов III подгруппы таблицы Менделеева (бор, алюминий, галлий, индий) с элементами V подгруппы (азот, фосфор, мышьяк, сурьма), которые соответственно называются нитриды, фосфиды, арсениды и антимониды. Наиболее исследованными и технологически не очень сложными из них являются фосфиды, арсениды и антимониды.

Некоторые параметры этих соединений приведены в таблице 2.15.

Таблица 2.15

Некоторые параметры соединений A^{III}B^V

<i>Соединение</i>	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\Delta W, \text{эВ (при } 20^\circ\text{C)}$
GaP	1450...1500	2,25
InP	1062	1,25
GaAs	1237	1,43
InAs	942	0,36
InSb	525	0,17
GaSb	712	0,67

Среди соединений A^{III}B^V особое положение занимает арсенид галлия (GaAs). У него ширина запрещенной зоны превышает ширину запрещенной зоны германия и кремния, но ещё не очень велика (1,43 эВ).

Полупроводниковые приборы из арсенида галлия по частотному пределу превосходят германиевые, а по максимальной рабочей температуре (до 450 °С) – кремниевые.

Соединения A^{II}B^{VI}

Они образуются в результате взаимодействия элементов II подгруппы (цинк, кадмий, ртуть, медь) с элементами VI подгруппы (сера, селен, теллур, кислород), которые соответственно называются сульфиды, селениды, теллуриды и оксиды.

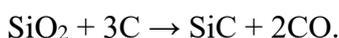
Технология изготовления полупроводниковых соединений A^{II}B^{VI} разработана гораздо менее полно. Это связано с тем, что они обладают высокими температурами плавления. Обычно их выращивают в запаянных кварцевых ампулах.

К этой же группе относится оксид цинка ZnO, имеющий $\Delta W = 3,2$ эВ, который широко используется в ограничителях перенапряжения. Но о нём подробнее будет рассказано в п. «Керамические полупроводники».

Карбид кремния (SiC)

Карбид кремния является единственным бинарным соединением, образованным элементами IV подгруппы (A^{IV}B^{IV}) и относящимся к полупроводникам. Этот полупроводниковый материал с большой шириной запрещённой зоны (2,8...3,1 эВ) применяется для изготовления полупроводниковых приборов, работающих при высоких температурах (до 700 °С).

Технически карбид кремния изготавливают в электрических печах при восстановлении диоксида кремния (кварцевого песка) углеродом:



В печи образуются сросшиеся пакеты кристаллов SiC, называемые *друзами*, которые после размола дают порошки с остроконечными зубчатыми зёрнами разной крупности, средний размер зёрен от 40 до 300 мкм.

Карбид кремния применяется для серийного выпуска варисторов (нелинейных резисторов). Кристаллы карбида кремния полупроводниковой чистоты получают методом возгонки в печах с графитовыми нагревателями и экранами. Процесс кристаллизации проводят в атмосфере аргона при температуре 2400...2600 °С. Получаемые кристаллы обычно имеют пластинчатую форму с размером в поперечнике примерно 1 см.

Карбид кремния является одним из наиболее твердых веществ, он устойчив к окислению до температуры свыше 1400 °С. Поэтому из него изготавливают полупроводниковые приборы, способные работать в химически агрессивных средах при высоких температурах (до 700 °С).

2.4.6. Полупроводниковые материалы сложного состава (полупроводниковые комплексы)

К таким материалам относятся, например, тройные сплавы: Bi–Sb–Zn (висмут-сурьма-цинк), Bi–Te–Se (висмут-теллур-селен) и т. д.

К этой же группе относятся керамические полупроводники, которые нашли применение в качестве резисторов вентильных разрядников и ограничителей перенапряжений. Их рассмотрим подробнее.

Керамические полупроводники

Вентильные разрядники используются для защиты изоляции электрооборудования подстанций от волн бегущих с линий. При ударе молнии в линию электропередач по линии на подстанцию бегут волны, опасные для изоляции трансформаторов. Поэтому если к подстанции подходит линия электропередач, то перед трансформатором должен стоять вентильный разрядник (рис. 2.76).

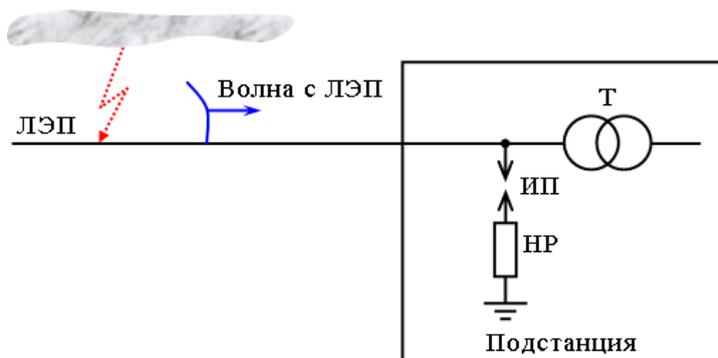


Рис. 2.76. Защита вентильным разрядником электрооборудования подстанции от волны, бегущей с ЛЭП

Основными элементами вентильного разрядника является искровой промежуток (ИП) и резистор с нелинейной вольт-амперной характеристикой (НР). При набегании на разрядник грозовой волны и увеличении на нём напряжения до $U_{\text{имп}}$ пробивается искровой промежуток и через разрядник проходит импульсный ток, создающий падение напряжения на сопротивлении резистора (рис. 2.77). Сопротивление резистора нелинейно, поэтому напряжение на нём ($U_{\text{ост}}$) мало изменяется в широком диапазоне импульсных токов.

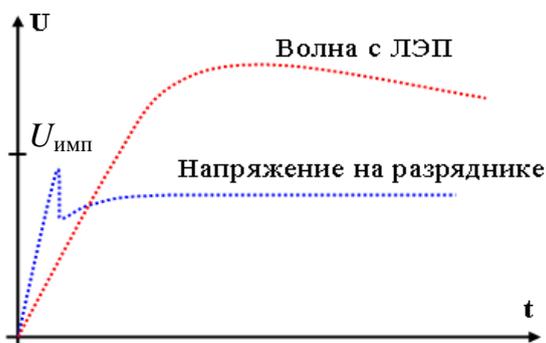


Рис. 2.77. Срабатывание вентильного разрядника при набегании грозовой волны

Основу нелинейного резистора вентильного разрядника составляет порошок из зёрен карборунда (SiC). Удельное сопротивление карборунда невелико, но на поверхности зёрен имеется тонкий слой из окиси кремния, который обладает также нелинейными свойствами. Если зёрна карбида кремния спрессовать и сделать из них варистор, то он будет иметь нелинейную вольтамперную характеристику. Однако варисторы, изготовленные из несвязанных зёрен карбида кремния, нестабильны: боятся тряски, ударов и легко изменяют свои характеристики. Поэтому зёрна SiC в разрядниках скрепляют связующим материалом. В качестве связующего материала используется глина, эмульсия мела, жидкое стекло и т. д.

Вольт-амперная характеристика нелинейного резистора в логарифмических координатах хорошо аппроксимируется двумя отрезками прямых (рис. 2.78).

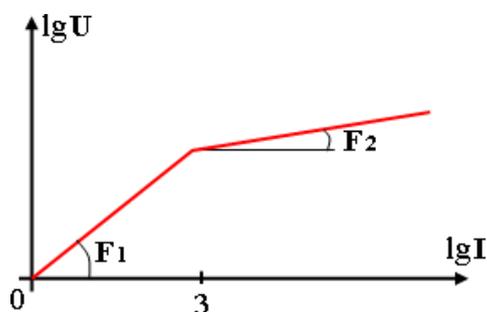


Рис. 2.78. Вольт-амперная характеристика разрядника в логарифмических координатах

Для каждого отрезка действительна зависимость

$$\lg U = \lg A + \alpha \lg I,$$

где A – постоянная; α – коэффициент нелинейности ($\alpha = \text{tg } F$).

Чем меньше коэффициент α_2 , тем шире диапазон токов, для которых на вентильном разряднике напряжение безопасно для трансформатора.

В вентильных разрядниках нелинейные резисторы изготавливают из вилита и тервита. Вилит получают из зёрен карборунда и эмульсии мела в жидком стекле путем обжига при температуре 380 °С. Коэффициенты нелинейности вилита $\alpha_1 = 0,28...0,30$ и $\alpha_2 = 0,11...0,20$. Тервит получают из карборунда и эмульсии глинозёма в жидком стекле путём обжига при температуре 1280...1300 °С, при этом часть оксида кремния выгорает, что повышает пропускную способность по сравнению с вилитом (от 300 до 1500 А), но уменьшается степень нелинейности (у тервита $\alpha_1 = 0,35...0,38$ и $\alpha_2 = 0,15...0,25$).

Разработанные в 70-е годы в СССР и за рубежом резисторы на основе оксида цинка (ZnO) обладают значительно большей нелинейностью, чем резисторы на основе карборунда. На рис. 2.79 для сравнения приведены вольт-амперные характеристики резисторов вентильного разрядника (РВ) и ограничителя перенапряжений (ОПН) на 10 кВ.

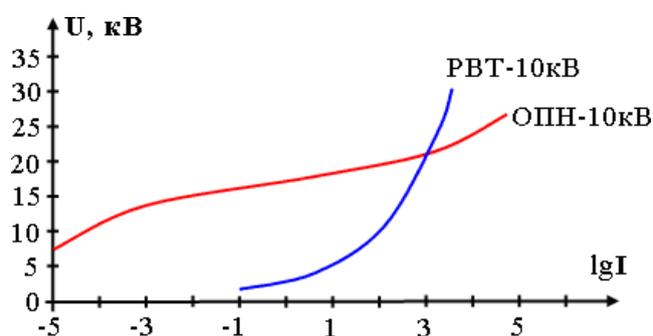


Рис. 2.79. Вольт-амперные характеристики ОПН – 10 кВ и РВТ – 10 кВ

Оксидно-цинковая (металлооксидная) керамика – это нелинейный материал, получаемый в результате высокотемпературного обжига (до 1300 °С) смеси, состоящей из оксида цинка (ZnO) и некоторого количества оксида другого металла: висмута, сурьмы, кобальта, марганца и т. п. (масса самой весомой из добавок составляет менее 4% массы оксида цинка). Коэффициент нелинейности оксидно-цинковой керамики составляет $\alpha = 0,02...0,1$ и зависит от сочетания добавок к оксиду цинка и от температуры обжига материала.

Такая высокая нелинейность обуславливает прохождение при рабочем напряжении через нелинейные резисторы тока порядка доли миллиампера, что позволило исключить искровой промежуток и подключить резистор ОПН непосредственно к сети.

2.5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.5.1. Основные свойства магнитных материалов

Общие сведения о магнитных свойствах и классификация магнитных материалов

Атом представляет собой сложную магнитную систему, магнитный момент которой является результирующей всех магнитных моментов электронов, протонов и нейтронов. Так как магнитные моменты протонов и нейтронов существенно меньше, чем магнитные моменты электронов, магнитные свойства атомов по существу определяются магнитными моментами электронов.

Магнитный момент атомного ядра приблизительно в тысячу раз меньше магнитного момента электронной оболочки атома.

Вращательное движение электронов вокруг ядер атомов аналогично действию некоторого контура электрического тока и создает магнитное поле, которое на достаточном расстоянии представляется как поле магнитного диполя с магнитным моментом, значение которого определяется произведением тока и площади контура, который ток обтекает. Магнитный момент является векторной величиной и направлен от южного полюса к северному. Такой магнитный момент, называется орбитальным.

Сам электрон имеет магнитный момент, который называется спиновым магнитным моментом.

Таким образом, магнитные свойства атома в основном определяются:

- орбитальным вращением электронов в атомах;
- вращением электронов вокруг собственных осей (электронные спины (рис. 2.80)).

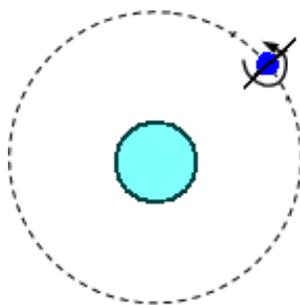


Рис. 2.80. Вращение электронов в атоме вокруг ядра и собственных осей

Результирующий магнитный момент атома при этом определяется векторной суммой орбитальных и спиновых магнитных моментов отдельных электронов в электронной оболочке атомов. Эти два вида магнитных моментов могут быть частично или полностью взаимно скомпенсированы. Поэтому любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает магнитный момент. Возьмём катушку (рис. 2.81) и будем помещать в неё сердечники из разных материалов. Магнитное поле, возникающее внутри сердечника, будет усиливать или ослаблять внешнее поле.

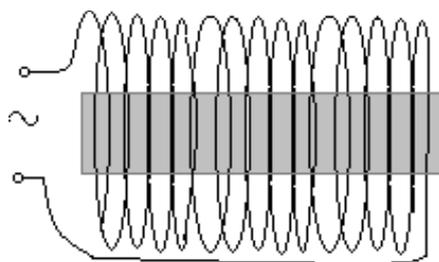


Рис. 2.81. Определение магнитных свойств материала

Магнитная индукция в веществе определяется суммой индукции внешнего и собственного магнитных полей:

$$B = B_0 + B_{\text{вн}} = \mu \cdot B_0,$$

где B – магнитная индукция (Тл); μ – относительная магнитная проницаемость.

«Относительная магнитная проницаемость характеризует способность материала намагничиваться и показывает во сколько раз магнитная индукция поля, созданного в данном материале, больше чем в вакууме» [7].

По магнитным свойствам все материалы можно разделить на две группы:

- 1) слабо магнитные ($\mu \approx 1$);
- 2) сильно магнитные ($\mu \gg 1$).

Сначала рассмотрим слабо магнитные материалы. У них $\mu = \text{const}$, т. е. она не зависит от напряжённости внешнего поля. Слабо магнитные материалы можно разделить:

- а) на диамагнетики ($\mu < 1$);
- б) парамагнетики ($\mu > 1$).

Диамагнетизм проявляется в намагничивании вещества навстречу направлению действующего на него внешнего магнитного поля. Диамагнетизм свойствен всем веществам. При внесении какого-либо тела в магнитное поле в электронной оболочке каждого его атома, в силу закона электромагнитной индукции, возникают индуцированные круговые токи, т. е. добавочное круговое движение электронов вокруг направления магнитного поля. Эти токи создают в каждом атоме индуцированный магнитный момент, направленный, согласно правилу Ленца, навстречу внешнему магнитному полю (независимо от того, имелся ли первоначально у атома собственный магнитный момент или нет и как он был ориентирован). У чисто диамагнитных веществ электронные оболочки атомов (молекул) не обладают постоянным магнитным моментом. Магнитные моменты, создаваемые отдельными электронами в таких атомах, в отсутствие внешнего магнитного поля взаимно скомпенсированы. В частности, это имеет место в атомах, ионах и молекулах с целиком заполненными электронными оболочками в атомах инертных газов, в молекулах водорода, азота.

Диамагнетики при помещении их в магнитное поле намагничиваются противоположно направлению внешнего поля и ослабляют его ($\mu < 1$). Магнитная проницаемость μ не зависит от напряжённости внешнего магнитного поля H . После снятия внешнего поля

индуцированный момент исчезает. К диамагнетикам относится ряд металлов: медь, серебро, золото, цинк.

В атомах пара-, ферро- и ферромагнетиков имеется один или несколько неспаренных электронов, поэтому они обладают магнитным моментом, который обусловлен нескомпенсированным спиновым магнитным моментом неспаренных электронов (или иначе спиновым магнитным моментом атома). Парамагнетики намагничиваются в направлении внешнего поля и усиливают его ($\mu > 1$). Магнитная проницаемость μ не зависит от напряжённости магнитного поля H . К парамагнетикам относится кислород, щелочные металлы, алюминий, платина и т. д.

Слабо магнитные материалы в технике применяются редко, поэтому их рассматривать не будем.

У сильно магнитных материалов $\mu \gg 1$ и зависит от напряжённости внешнего поля. Эти материалы используются в энергетике в качестве магнитных материалов. К ним относится железо, никель, кобальт, их сплавы, ферриты.

Сильно магнитные материалы можно разделить на две группы:

- а) ферромагнитные (железо, никель, кобальт и их сплавы);
- б) ферромагнитные (ферриты – магнитная керамика, оксиды металлов).

Магнитные свойства ферромагнитных материалов

К ферромагнетикам относятся три металла (Fe, Co, Ni), имеющие недостроенную 3d-электронную оболочку, и сплавы на их основе (а также 6 редкоземельных элементов, имеющих недостроенную 4f-электронную оболочку, но они применяются редко). В ферромагнитных материалах образуются самопроизвольно намагниченные области – домены, в которых магнитные моменты электронов направлены параллельно друг другу.

«В атомах ферромагнетиков имеется несколько неспаренных электронов, поэтому они обладают магнитным моментом, который обусловлен нескомпенсированным спиновым магнитным моментом неспаренных электронов. Магнитный момент, например, атома железа определяется алгебраической суммой спинов незаполненной оболочки (в незаполненном 3d-слое железа имеется 6 электронов, спины пяти направлены параллельно друг другу, а одного – антипараллельно, т. е. у железа 4 неспаренных электрона). У кобальта 3 неспаренных электрона, а у никеля – 2» [7].

Магнитные моменты отдельных доменов расположены неупорядоченно, вследствие чего суммарная намагниченность их равна нулю (рис. 2.82).

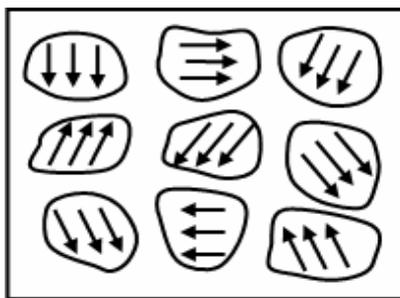


Рис. 2.82. Ориентация доменов в ферромагнетике

Спонтанное деление объема ферромагнетика на множество доменов объясняется тем, что многодоменная структура ферромагнетика наиболее устойчива и ей соответствует минимум полной свободной энергии системы.

Если приложить внешнее поле, то начинается рост доменов, намагниченность которых совпадает с направлением внешнего поля или близка к его направлению, и одновременное сокращение числа доменов, намагниченность которых сильно не совпадает с направлением внешнего поля. В сильных полях завершается рост доменов и повороты их векторов намагниченности, вследствие чего дальнейший рост внутреннего магнитного поля прекращается и наступает насыщение.

Рассмотрим зависимости $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$, характеризующие процесс намагничивания (рис. 2.83).

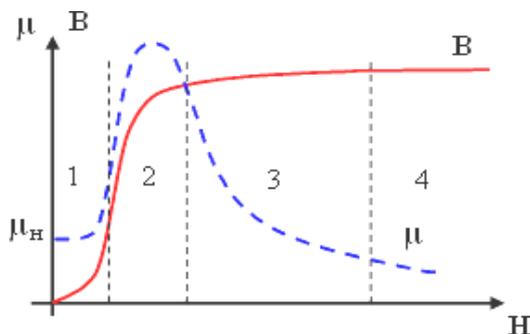


Рис. 2.83. Процесс намагничивания ферромагнетика: 1 – область очень слабых полей; 2 – область слабых полей; 3 – область средних полей; 4 – область сильных полей

В области очень слабых магнитных полей (участок 1) магнитная индукция растёт линейно с ростом напряжённости, магнитная проницаемость остаётся постоянной ($\mu_n \approx \text{const}$); это так называемая начальная относительная магнитная проницаемость. Эта область намагниченности используется в технике слабых токов (нелинейная зависимость между магнитной индукцией и напряжённостью поля приводит к искажению передаваемых сигналов).

В области слабых полей (участок 2) магнитная проницаемость резко возрастает и проходит через максимум. В первой части этого участка рост магнитной индукции происходит очень круто.

В области средних полей (участок 3) происходит лишь слабое увеличение магнитной индукции.

В области сильных полей (участок 4) рост магнитной индукции происходит очень замедленно (наступает насыщение).

Если ферромагнетик включить под переменное напряжение, то кривая $B = f(H)$ примет форму замкнутой кривой – петли гистерезиса (рис. 2.84).

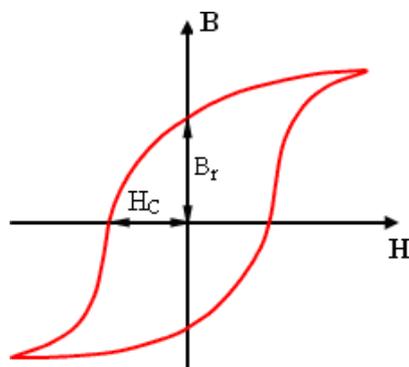


Рис. 2.84. Петля гистерезиса

Для всех кривых характерны следующие особенности:

– при снижении напряжённости магнитного поля от $+H$ до 0 магнитная индукция не равна нулю, она имеет остаточное значение B_r (остаточная индукция);

– для доведения остаточной индукции до нуля необходимо приложить магнитное поле противоположной полярности $-H_c$ к ферромагнетику. Величина H_c называется *коэрцитивной силой*.

– циклическое перемагничивание материала происходит с определённой потерей энергии, выделяющейся внутри ферромагнетика в виде тепла. По величине коэрцитивной силы все магнитные материалы можно разделить на две группы: магнитомягкие и магнитотвёрдые.

Граница этого раздела по значению H_c условная. Материалы, у которых $H_c < 4$ кА/м, относят к мягким, а у которых $H_c > 4$ кА/м – к магнитотвёрдым.

Магнитомягкие материалы легко перемагничиваются и их используют в переменных полях для сердечников. Они имеют большое значение магнитной проницаемости μ в слабых и средних полях. *Магнитотвёрдые материалы* не следует использовать в переменных полях, они применяются для постоянных магнитов.

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от температуры (рис. 2.85).

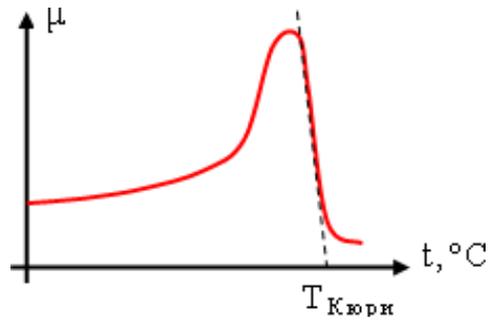


Рис. 2.85. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от температуры

При увеличении температуры облегчается переориентация доменов по полю, и магнитная проницаемость растёт, но при температуре выше определённого значения, называемого точкой Кюри, происходит разрушение доменной структуры, и магнитные материалы теряют свои ферромагнитные свойства. Для чистого железа точка Кюри составляет 768 °С, для никеля 358 °С, для кобальта 1131 °С.

Для характеристики изменения магнитной проницаемости с температурой пользуются температурным коэффициентом магнитной проницаемости, K^{-1} :

$$TK_{\mu} = a_{\mu} = \frac{1}{\mu_t} \cdot \frac{d\mu}{dt}.$$

«Монокристаллы ферромагнетиков обладают *анизотропией магнитных свойств*. В них существуют кристаллографические направления легкого и трудного намагничивания. Для намагничивания монокристалла до технического насыщения вдоль кристаллографического направления легкого намагничивания затрачивается энергии меньше (насыщение достигается при меньших значениях напряженности магнитного поля H), чем для такого же намагничивания вдоль направлений трудного намагничивания» [7].

Магнитные потери

Процесс перемагничивания магнитных материалов в переменном магнитном поле связан с тепловыми потерями энергии магнитного поля, что внешне проявляется в нагревании материала. Можно выделить два вида потерь: потери на перемагничивание и динамические (потери на вихревые токи и потери, вызванные магнитным последствием).

Потери на перемагничивание пропорциональны площади петли гистерезиса S и пропорциональны частоте f : $P \sim f \cdot S$.

Чтобы уменьшить эти потери, используют магнитные материалы с возможно меньшей коэрцитивной силой (узкой петлей гистерезиса).

Потери на вихревые токи вызваны возникновением токов, которые индуцируют в материале магнитный поток. Эти потери пропорциональны квадрату частоты и обратно пропорциональны удельному электрическому сопротивлению:

$$P \sim f^2 / \rho.$$

При высоких частотах в сердечниках приходится учитывать в первую очередь потери на вихревые токи. Уменьшить их можно путём увеличения удельного сопротивления ρ . Для этого сердечник делают из тонких листов ферромагнетика, разделённых лаком, тонкой

бумагой и т. д. На высокой частоте целесообразнее использовать ферриты, у которых удельное сопротивление в $10^6 \dots 10^{11}$ раз больше железа.

Магнитные материалы по назначению можно разбить на следующие основные группы:

- 1) магнитомягкие (низкочастотные и высокочастотные);
- 2) магнитотвердые;
- 3) для специализированного назначения.

2.5.2. Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы, обладая высокой магнитной проницаемостью, небольшой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис, используются в качестве сердечников трансформаторов, в электромагнитах, в измерительных приборах и везде, где необходимо при наименьших затратах достигнуть наибольшей индукции.

Низкочастотные магнитомягкие материалы

«В постоянных и низкочастотных магнитных полях, включая звуковые частоты, применяют магнитомягкие материалы сопротивлением порядка 10^{-7} Ом · м; их называют низкочастотными» [7].

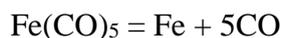
В настоящее время выпускается много разновидностей низкочастотных магнитомягких материалов. Мы рассмотрим следующие:

- особо чистое железо;
- технически чистое железо;
- электротехническая сталь;
- пермаллой.

Особо чистое железо, содержащее примесей менее 0,03%, может быть получено двумя сложными путями:

а) электролитическое железо получают электролизом соли железа (серноокислого или хлористого железа);

б) карбонильное железо получают термическим разложением пентакарбонила железа:



Магнитные свойства этих материалов приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16

Магнитные свойства железа

Материал	Магнитная проницаемость		Коэрцитивная сила H_c , А/м
	начальная $\mu_{\text{нач}}$	максимальная $\mu_{\text{макс}}$	
Электротехническое железо	600	15 000	28,0
Карбонильное железо	3300	21 000	6,4
Технически чистое железо	250	7000	64,0

Технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь) содержит небольшое количество примесей (не более 0,04% углерода, не более 0,6% других примесей), ухудшающих его магнитные свойства. Достоинства чистого железа – высокая индукция насыщения (2,18 Тл), пластичность, низкая цена и высокая технологичность. Недостатки – низкое удельное сопротивление ($0,1 \cdot 10^{-6}$ Ом · м) и, как следствие, большие потери на вихревые токи. Чистое железо используется довольно редко (в основном для магнитопроводов в постоянных и низкочастотных магнитных полях) и в магнитодиэлектриках.

Кремнистая электротехническая сталь является основным магнитомягким материалом массового использования. Если в железо добавить кремний, то изменяются следующие свойства:

а) увеличивается удельное сопротивление (следовательно, снижаются потери на вихревые токи). Удельное сопротивление при увеличении кремния до 5% увеличивается от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $0,6 \cdot 10^{-6}$ Ом · м;

б) увеличивается начальная магнитная проницаемость $\mu_{нач}$ (при $H = 0$) и максимальная магнитная проницаемость $\mu_{макс}$;

в) уменьшается коэрцитивная сила (следовательно, уменьшаются потери на гистерезис);

г) ухудшаются механические свойства, увеличивается хрупкость (при содержании кремния выше 5% она становится непригодной для штамповки).

Электротехническая сталь делится на марки, например: Э-1312, Э-2011 и т. д. Эти марки расшифровываются следующим образом:

– буква Э – электротехническая сталь;

– первая цифра:

1 – горячекатаная изотропная,

2 – холоднокатаная изотропная,

3 – холоднокатаная анизотропная;

– вторая цифра – содержание кремния:

0 – до 0,4% ($\rho \approx 0,14 \cdot 10^{-6}$ Ом · м),

1 – от 0,4 до 0,8% ($\rho \approx 0,17 \cdot 10^{-6}$ Ом · м),

2 – от 0,8 до 1,8% ($\rho \approx 0,25 \cdot 10^{-6}$ Ом · м),

3 – от 1,8 до 2,8% ($\rho \approx 0,40 \cdot 10^{-6}$ Ом · м),

4 – от 2,8 до 3,8% ($\rho \approx 0,50 \cdot 10^{-6}$ Ом · м),

5 – от 3,8 до 4,8% ($\rho \approx 0,60 \cdot 10^{-6}$ Ом · м);

– третья цифра – характеризует сталь по некоторым электрическим и магнитным свойствам (гарантируется значение в определенном диапазоне);

– четвертая цифра – порядковый номер стали.

Как было отмечено ранее, ферромагнитные материалы характеризуются магнитной анизотропией, выражающейся в различной легкости намагничивания вдоль различных осей. Анизотропия может усиливаться во время обработки стали. У электротехнической стали

различают горячекатаную и холоднокатаную обработку. При горячей прокатке происходит лишь слабая ориентация зёрен в направлении проката, сталь имеет незначительную анизотропию.

При прокатке в холодном состоянии магнитные свойства в направлении проката улучшаются, но ухудшаются в поперечном направлении.

Отличия холоднокатаной стали от горячекатаной:

1. У холоднокатаной стали выше индукция ($B_x = 1,8$ Тл, $B_T = 1,46$ Тл);

2. У холоднокатаной стали меньше потери (Э-3412 (0,35 мм)

$$P = 0,7 \text{ Вт/кг}; \text{ Э-1412 (0,35мм)} P = 1,4 \text{ Вт/кг};$$

3. У холоднокатаной стали несколько меньше удельное сопротивление

$$(\rho_x = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м}, \rho_T = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{ м});$$

4. У холоднокатаной стали более гладкая поверхность (выше коэффициент заполнения:

$$k_T = 0,9 \dots 0,93, k_x \text{ до } 0,98);$$

5. У холоднокатаной стали выше цена (примерно на 30%).

В настоящее время холоднокатаная сталь используется больше чем горячекатаная сталь. Для электрических машин, турбо- и гидрогенераторов большой мощности с массивными магнитопроводами основным магнитным материалом остаётся горячекатаная сталь марок 1511–1514.

Пермаллои – это железоникелевые сплавы, обладающие большой начальной магнитной проницаемостью в области слабых полей (рис. 2.86) и узким гистерезисным циклом. Пермаллои используются для изготовления сердечников дросселей, реле, измерительных трансформаторов и т. д.

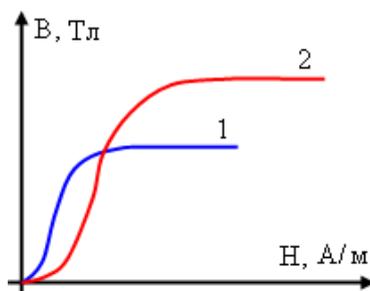


Рис. 2.86. Кривые намагничивания пермаллоя (1) и электротехнической стали (2)

Различают высоконикелевые (72...80% Ni) и низконикелевые (40...50% Ni) пермаллои. В сплавы, кроме железа и никеля, также входят добавки молибдена, хрома, меди, марганца, кремния и т. д.

Содержание никеля зависит от того, для каких целей будет использоваться пермаллой.

Если сердечник предназначен для работы на высоких частотах, то предпочтительнее использовать низконикелевые пермаллои, так как у них удельное сопротивление почти в три раза больше, чем у высоконикелевых пермаллоев. На рисунке 2.87, а показана зависимость удельного сопротивления сплавов от содержания никеля.

У высоконикелевых пермаллоев выше значения магнитной проницаемости $\mu_{нач}$ и $\mu_{макс}$ (рис. 2.87, б). Они применяются для сердечников малогабаритных трансформаторов и реле. Стоимость высоконикелевых пермаллоев больше, чем низконикелевых, поскольку никель дорог.

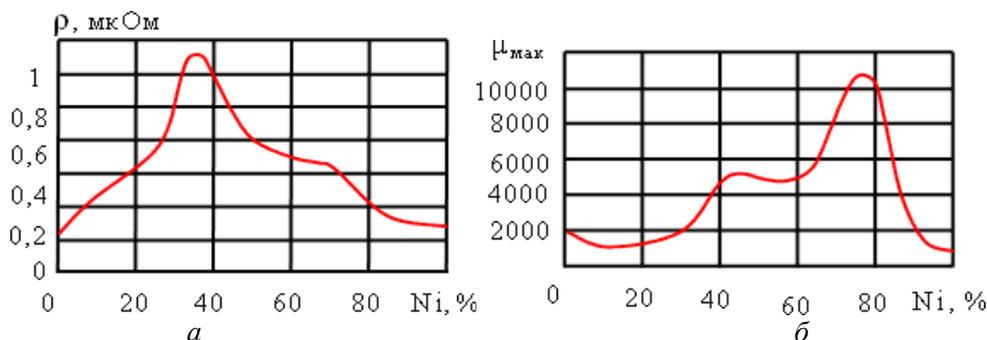
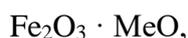


Рис. 2.87. Зависимости удельного сопротивления сплавов (а) и магнитных свойств (б) сплавов Fe–Ni от содержания Ni

Высокочастотные магнитомягкие материалы

С увеличением частоты от звуковых частот до СВЧ потери на вихревые токи настолько возрастают, что применение вышеперечисленных магнитомягких материалов из-за низкого удельного сопротивления становится нецелесообразным. Материалами, обладающими высоким удельным сопротивлением являются ферриты и магнитодиэлектрики.

Ферриты представляют собой системы из оксидов железа и оксидов двухвалентных и реже одновалентных металлов, соответствующие общей формуле



где Me – символ двухвалентного металла (никель, цинк, марганец, кобальт, барий и т. д., иногда одновалентный литий).

Ферриты имеют кубическую кристаллическую решетку, подобную решетке шпинели, встречающейся в природе: $MgO \cdot Al_2O_3$. Большинство соединений указанного типа обладают магнитными свойствами, как и природный магнитный железняк $Fe_2O_3 \cdot FeO$. Однако соединения $Fe_2O_3 \cdot ZnO$ и $Fe_2O_3 \cdot CdO$ являются немагнитными. Исследования показали, что наличие или отсутствие магнитных свойств определяется кристаллической структурой этих материалов, и в частности расположением ионов двухвалентных металлов и железа между ионами кислорода. В случае структуры обычной шпинели, когда в центре кислородных тетраэдров расположены ионы Zn^{++} или Cd^{++} , магнитные свойства отсутствуют. При структуре так называемой обращенной шпинели, когда в центре кислородных тетраэдров расположены ионы Fe^{++} , материал обладает магнитными свойствами.

К ферритам применимы все рассмотренные выше характеристики ферромагнитных материалов (точка Кюри, доменная структура, петля гистерезиса и т. д.). У них есть существенные отличия от ферромагнетиков. Рассмотрим основные отличия.

1. Это не металлические соединения, это оксидные материалы (ферриты).

2. В доменах ферритов не все спины расположены параллельно друг другу, часть их антипараллельны, с некоторым преобладанием одного направления.

3. У ферритов большое удельное сопротивление ρ (в $10^6 \dots 10^{11}$ раз больше, чем у железа).

4. У них меньшая индукция насыщения (приблизительно 0,3 Тл у ферритов и 1,2...1,6 Тл у ферромагнетиков).

Технология изготовления ферритов оказывает существенное влияние на свойства готовых изделий. В промышленности в основном используют метод смешивания оксидов металлов. Исходные оксиды взвешивают, тонко измельчают и тщательно перемешивают в шаровых или вибрационных мельницах. Затем осуществляют предварительный обжиг при температуре ниже температуры окончательного обжига. После этого следует второй помол окончательного обжига. Для улучшения пластичности в порошок добавляют пластификаторы (поливиниловый спирт, парафин и др.). Из полученной массы прессуют под большим давлением изделия требуемой формы и обжигают при температуре 1100...1400 °С в окислительной среде (обычно в воздухе). При этом происходит спекание и образование твёрдых растворов ферритов. Усадка ферритов при обжиге может достигать 20%. Ферритовые изделия отличаются высокой твердостью и хрупкостью.

Их можно шлифовать и полировать, резать можно только инструментами из синтетических алмазов.

Магнитомягкие ферриты. На рисунке 2.88 для никель-цинкового феррита приведена зависимость $B = f(H)$. Максимальная индукция составляет 0,3 Тл, поэтому в сильных магнитных полях их применять нецелесообразно. Но у магнитомягких ферритов большое магнитное сопротивление (в $10^6 \dots 10^{11}$ раз больше стали), поэтому они нашли широкое применение при повышенных и высоких частотах. Они используются для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, статоров и роторов высокочастотных электродвигателей и т. д.

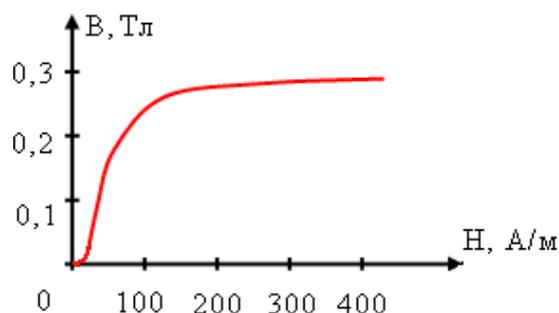


Рис. 2.88. Зависимость $B = f(H)$ для никель-цинкового феррита

В настоящее время основное применение нашли следующие группы смешанных ферритов: марганец-цинковые, никель-цинковые, литий-цинковые.

Обозначение ферритов:

– первая цифра означает численное значение начальной магнитной проницаемости $\mu_{н1}$;

– первые буквы: Н – ферриты для низких частот (от 0,2 до 20 МГц), В – ферриты для высоких частот (от 20 до 300 МГц);

– следующие буквы в маркировке обозначают состав материала: М – марганец-цинковые, Н – никель-цинковые и т. д.

Примеры обозначения: 1000НН, 6000НМ, 150В.

Ферриты как и сталь имеют точку Кюри, при которой разрушается доменная структура. Точка Кюри для магнитомягких ферритов лежит в диапазоне 70...400 °С, а у высокочастотных ферритов – в диапазоне 400...500 °С. «*Магнитодиэлектрики* – это фактически высокочастотные магнитные пластмассы, в которых наполнителем является ферромагнетик, а связующим – электроизоляционный материал: органический (например, фенолоформальдегидная смола, полистирол) или неорганический (например, жидкое стекло).

В магнитодиэлектриках частицы ферромагнетика разделены друг от друга сплошной пленкой из электроизоляционного материала, образующего непрерывную фазу-матрицу с высоким электрическим сопротивлением, являющуюся одновременно механическим связующим. Благодаря тому, что частицы ферромагнетика (их размер $d = 10^{-4} \dots 10^{-6}$ м) электроизолированы друг от друга, потери на вихревые токи и на гистерезис малы» [7].

2.5.3. Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов – источников постоянных магнитных полей, которые во многих случаях выгоднее электрических.

Магнитотвердые материалы по составу и способу получения подразделяются на следующие группы:

- 1) легированные мартенситные стали;
- 2) литые магнитотвердые сплавы;
- 3) магниты из порошков;
- 4) магнитотвердые ферриты и др.

Характеристиками материалов для постоянных магнитов служат коэрцитивная сила H_c ; остаточная индукция B_r и максимальная энергия, отдаваемая магнитом во внешнее пространство.

Величины коэрцитивной силы H_c с остаточной индукцией B_r определяются на петле гистерезиса (см. рис. 2.84). Поясним, что такое максимальная энергия $W_{\text{макс}}$.

Если магнит изготовлен в виде кольцевого сердечника, то магнитная энергия находится внутри его. Если убрать внешнее поле, то остаточная индукция в магните будет равна B_r . Возьмём кольцевой сердечник, намагнитим его, после этого выпилим из него кусок длиной d (рис. 2.89). Такого вида сердечники используют в приборах и в реле.

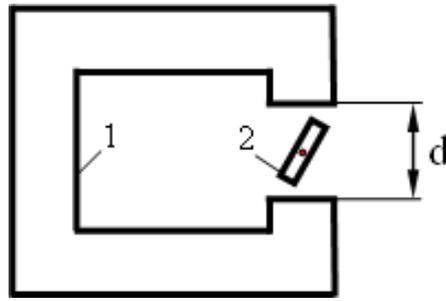


Рис. 2.89. Сердечник с воздушным зазором d : 1 – сердечник; 2 – рамка с током

В результате объём магнитного материала уменьшился, следовательно, уменьшится и магнитный поток. Индукция внутри магнита снизится до величины B_d , которая меньше B_r (рис. 2.90) (индукция в магните и в воздухе одинакова и составляет значение B_d , но напряжённость магнитного поля H в воздухе больше в $1/\mu_0$ раз).

Удельная магнитная энергия поля, создаваемая в воздушном зазоре магнита, Дж/м³:

$$W_{\text{макс}} = B_d H_d / 2,$$

где H_d – напряжённость поля, соответствующая индукции B_d , А/м (рис. 2.90).

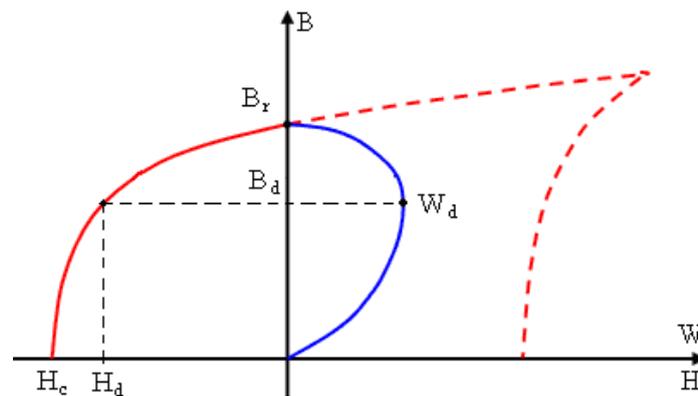


Рис. 2.90. Кривая магнитной энергии в воздушном зазоре

Зазор нужно взять оптимальным, чтобы энергия в воздушном зазоре была максимальной $W_{\text{макс}}$. На рисунке 2.90 приведена кривая, характеризующая изменение магнитной энергии в воздушном зазоре. Величина $W_{\text{макс}}$ является важнейшей при оценке качества материала. Нередко для характеристики материала пользуются произведением $B_d \cdot H_d$, опуская множитель 0,5.

Легированные мартенситные стали

Эти стали являются наиболее простыми и доступными для изготовления постоянных магнитов. Мартенситные стали начали применять для производства постоянных магнитов раньше всех других материалов. Используются легированные стали со следующими добавками: хрома до 3%, вольфрама до 8%, кобальта до 15%. Значение $W_{\text{макс}}$ для них низкое – 1...4 кДж/м³. В настоящее время они имеют ограниченное применение ввиду их невысоких

магнитных свойств, но полностью от них не отказываются, так как они дешёвы и допускают механическую обработку на металлорежущих станках.

Наличие добавок в стали можно определить по марке стали (например, сталь ЕХ легирована хромом; другие добавки обозначаются следующими буквами: вольфрам – В, молибден – М, кобальт – К).

Цифры указывают процентное содержание элемента (например, ЕХ3 – 3% хрома). Магнитные свойства стали ЕХ и ЕХ3 приведены в таблице 2.17.

Таблица 2.17

Магнитные свойства мартенситных сталей

Марка стали	Магнитные свойства	
	B_r , Тл	H_c , кА/м
ЕХ	0,90	4,6
ЕХ3	0,95	4,8

Литые магнитотвердые стали

Наибольшее распространение получили тройные сплавы: железо-никель-алюминий (Fe – Ni – Al). Они имеют большую магнитную энергию, чем мартенситные стали.

Для улучшения магнитных свойств эти сплавы легируют кобальтом (2...40%), медью (2...8%), титаном (0...9%), ниобием, кремнием.

Марки стали обозначаются буквами: Ю – алюминий, Н – никель, Б – ниобий, Д – медь, К – кобальт, Т – титан.

Цифры указывают процентное содержание элемента (например, ЮНКД15 – 15% меди). Магнитные свойства некоторых сплавов приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.18

Магнитные свойства литых магнитотвёрдых сталей

Марка	B_r , Тл	H_c , кА/м	$W_{\text{макс}}$, кДж/м ³
ЮНД4	0,50	40	3,6
ЮНДК15	0,75	48	6,0

Магнитная энергия лучших сплавов достигает $W_{\text{макс}} = 40$ кДж/м³. Изделия из этих сплавов получают в основном методом литья, недостатками сплавов являются особая хрупкость и высокая твёрдость, поэтому обработка на металлорежущих станках затруднена. В основном их обрабатывают шлифовкой.

Магниты из порошков

Невозможность получить особенно мелкие изделия со строго выдержанными размерами из литых сплавов обусловила использование методов порошковой металлургии

для производства постоянных магнитов. Среди них мы рассмотрим следующие виды магнитов:

- а) металлокерамические (получены из измельченных сплавов типа Al–Ni–Fe);
- б) металлопластические (получены из сплавов типа Al–Ni–Fe и связующего материала);
- в) магнитотвёрдые ферриты.

Металлокерамические магниты изготавливают из измельченных порошков сплавов Cu–Ni–Fe, Cu–Ni–Co, Fe–Co–Ni–Al (типа ЮНДК) путем прессования и дальнейшего спекания при высоких температурах. Такой способ выгодно применять для производства мелких магнитов и магнитов сложной конфигурации, так как при такой технологии получают достаточно точные размеры и дальнейшая обработка не требуется. Металлокерамические магниты обычно имеют пористость 3...5%, а запасенная магнитная энергия и остаточная индукция у них на 10...20% ниже, чем у литых магнитов из соответствующего сплава. Но по механической прочности они превосходят литые магниты в 3–6 раз (табл. 2.18).

Металлопластические магниты как и металлокерамические получают из металлического порошка сплавов ЮНД или ЮНДК, смешанных с порошком диэлектрика (например, феноло-формальдегидной смолы). Процесс изготовления магнитов подобен процессу прессования пластмасс и заключается в прессовании смеси под давлением 500 МПа, нагревании заготовок до температуры 120...180 °С для полимеризации диэлектрика. Магнитные свойства металлопластических магнитов довольно низкие. Коэрцитивная сила по сравнению с литыми магнитами из соответствующего сплава ниже на 10...15%, остаточная индукция на 35...50%, а запасенная магнитная энергия на 40...60% (табл. 2.19).

Понижение магнитных свойств объясняется большим содержанием (до 30%) немагнитного связующего вещества. Однако они обладают большим электрическим сопротивлением, малой плотностью и меньшей стоимостью. Благодаря высокому электрическому сопротивлению их можно применять в аппаратуре для переменного магнитного поля повышенной частоты. Металлопорошковые магниты экономически выгодны при массовом автоматизированном производстве, сложной конфигурации и небольших размерах магнитов.

Таблица 2.19

Основные свойства магнитов из порошков

<i>Материал</i>	B_r , Тл	H_c , кА/м	$W_{\text{макс}}$, кДж/м ³
ЮНДК 24(магнико)	1,23	44	16,0
Металлокерамический (на основе сплава магнико)	1,00	50	11,7
ЮНД 4	0,5	40	3,60
Металлопластический (на основе сплава ЮНД 4)	0,3	38	1,62

Магнитотвёрдые ферриты

Магнитотвердые ферриты применяются для магнитов в электродинамических громкоговорителях, для микродвигателей и измерительных приборов. Известны кобальтовые и бариевые ферриты.

Кобальтовые ферриты применяются ограниченно из-за дефицитности и дороговизны кобальта, а также недостаточно высоких магнитных свойств по сравнению с более дешёвыми бариевыми ферритами.

Бариевые магниты устойчивы к действию внешних размагничивающих полей, но они отличаются большой хрупкостью и не способны к обычным видам механической обработки. Кроме того, они имеют необратимое изменение магнитных свойств после охлаждения их от комнатной до низких температур ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) и нагрева до первоначальной температуры.

В настоящее время промышленность выпускает два вида бариевых магнитов: БА – бариевые анизотропные, БИ – бариевые изотропные.

В таблице 2.20 приведены магнитные свойства некоторых магнитотвёрдых ферритов.

Таблица 2.20

Марка	B_r , Тл	H_c , кА/м	$W_{\text{макс}}$, кДж/м ³
1 БИ	0,19	128	3,2
2,4 БА	0,33	224	9,6
2 КА	0,28	128	7,2

2.5.4. Аморфные магнитомягкие сплавы

Все твердые тела по структуре можно разделить на кристаллические и аморфные.

Кристаллическая решетка – регулярное расположение в кристаллах частиц (атомов, ионов, молекул), характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях. Кристаллические тела могут существовать в виде отдельных крупных кристаллов (монокристаллы) или же состоять из отдельных зерен (поликристаллы). Аморфные тела характеризуются случайным (хаотическим) расположением частиц (атомов, ионов или молекул).

Аморфные тела – это затвердевшие жидкости, которые образуются с понижением температуры при сравнительно быстром повышении вязкости, затрудняющем перемещение молекул, необходимом для формирования и роста кристаллов. К аморфным веществам относятся стекла и многие пластики.

Внедрение новых материалов в значительной степени определяет научно-технический прогресс. Именно с применением аморфных магнитомягких сплавов (АММС) связывают будущее магнитных материалов в электротехнике и электронике. Пока не найдено других материалов, которые имели бы столь хорошие магнитные характеристики, обладали бы также и высоким сопротивлением, твердостью, износостойкостью, коррозионной и радиационной стойкостью.

Эти уникальные физико-механические и химические свойства определяются прежде всего тем, что у аморфных материалов, в отличие от кристаллических, отсутствует дальний порядок в расположении атомов, они не имеют дефектов, повышающих сопротивление движению границ доменов, в них отсутствует кристаллографическая анизотропия. Именно поэтому АММС характеризуются:

- высокой магнитной проницаемостью;
- довольно высокой индукцией насыщения;
- малым значением H_c (мало зависящей от f в отличие от кристаллических сплавов).

Основной характерной особенностью АММС является то, что их удельные потери при перемагничивании вплоть до десятков килогерц крайне малы из-за высокого значения удельного сопротивления, малых значений H_c и толщины ленты.

Наиболее распространенным и имеющим наибольшее практическое значение методом получения аморфных материалов в большом количестве и виде, пригодном для непосредственного использования в технике, например в виде ленты (толщиной 10...50 мкм и шириной от 1 до 150 мм), является метод закалки расплава на поверхности быстро вращающегося охлаждаемого изнутри цилиндра. Цилиндр вращается с линейной скоростью от 20 до 30 м/с и происходит быстрое затвердевание (со скоростью $\sim 10^6$ °С в секунду) плоской струи расплава. При таком процессе затвердевания расплава не успевает происходить кристаллизация металлической ленты, и она имеет структуру металлического стекла.

В таблица 2.21 приведены некоторые свойства аморфного сплава.

Таблица 2.21

<i>Материал</i>	B_r , Тл	H_c , А/м	ρ , Ом · м
Электротехническая сталь	2,0	28	$(0,5...0,6) \cdot 10^{-6}$
Аморфные стали	1,6	15	$(1,2...1,3) \cdot 10^6$

В 2008 г. в мире уже работало около 2 тысяч силовых трансформаторов на основе аморфной стали. Нагрузочные потери в них при нормальном токе уменьшены на 80...90%.

3. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Конструкционные материалы – это твердые материалы, предназначенные для изготовления изделий, подвергаемых механическому нагружению.

Конструкционные материалы можно разбить на следующие типы:

1. Металлы и сплавы (стали, чугуны, цветные металлы и т. д.);
2. Неметаллические материалы (полимеры, пластмассы, древесные материалы, резины и т. д.);
3. Композиционные материалы. Это материалы, объединенные разными способами в монолит и сохраняющие при этом индивидуальные особенности.

Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. Компонент, который обладает непрерывностью по всему объему называется *матрицей* (связующим). Матрицы могут быть полимерными, металлическими и т. д.

Компонент же прерывный, разделенный в объеме композиционного материала, считается *армирующим* или упрочняющим. Эти компоненты, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью и по этим показателям значительно превосходят матрицу.

Прообразом современных композиционных материалов считается железобетон. Несмотря на достигнутые успехи в создании и использовании неметаллических материалов (пластмассы, полимеры и др.) основными конструкционными материалами еще долгое время будут оставаться металлы и сплавы.

3.2. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

3.2.1. Основные типы кристаллических решеток

Металлы являются телами кристаллическими. Кристаллическая решетка – регулярное расположение в кристаллах частиц (атомов, ионов), характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях. Если соединить атомы воображаемыми линиями в трех взаимно перпендикулярных направлениях, то получится пространственная кристаллическая решетка. Ее наименьшим структурным образованием является элементарная ячейка, контур которой представляет геометрическое тело, например куб или шестигранную призму.

Ещё в 1890–1891 гг. русский минеролог Е. С. Федоров систематизировал все известные кристаллы и выделил 230 пространственных групп [4].

Металлы имеют кристаллические решетки различных типов, наиболее типичными из которых являются [2]:

- объемно-центрированная кубическая (ОЦК) (рис. 3.1, а);

- гранецентрированная кубическая (ГЦК) (рис. 3.1, б);
- гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рис. 3.1, в).

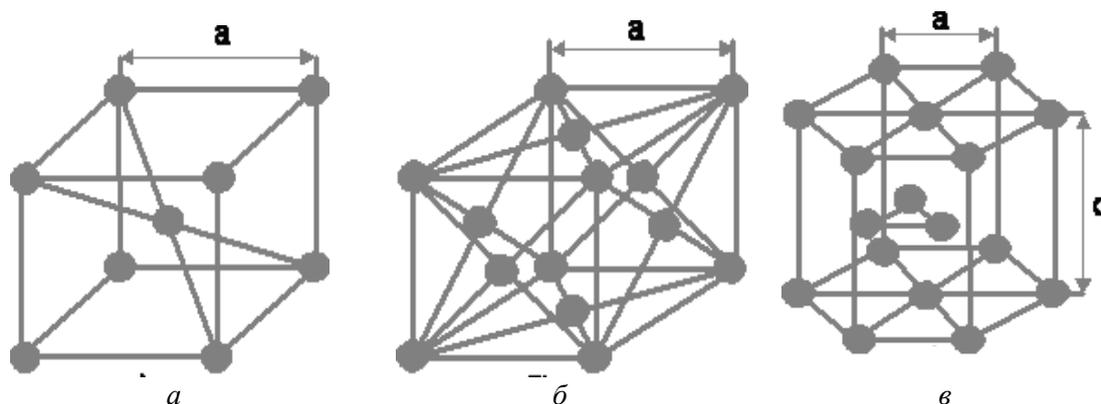


Рис. 3.1. Основные типы кристаллических решеток металлов:
 a – ОЦК; b – ГЦК; c – ГПУ

В объемно-центрированной кубической решетке восемь атомов располагаются в вершине куба и один в центре куба (на пересечении диагоналей) (рис. 3.1, a). Характерным линейным размером этой решетки является расстояние a между двумя атомами, расположенными вдоль одного ребра. Этот линейный размер называется параметром решетки. Значение параметра решетки a для различных металлов от 0,2 до 0,7 нм (1 нм = 10^{-9} м). ОЦК решетку имеет железо (при низких температурах), ванадий, вольфрам, молибден, хром и другие металлы.

В гранецентрированной кубической решетке атомы расположены в вершинах куба и в центрах шести граней (рис. 3.1, b) (в центре куба атома нет). ГЦК решетку имеет алюминий, медь, никель, свинец, серебро и другие металлы.

Гексагональная плотноупакованная решетка представляет собой шестигранную призму, в основании которой расположены правильные шестиугольники (рис. 3.1, c). Атомы расположены в вершинах и центрах этих шестиугольников. Еще три атома расположены в вершинах правильного треугольника, находящегося посередине между основаниями. Для ГПУ решетки характерны параметры a и c . ГПУ решетку имеет магний, цинк, титан, цирконий и другие металлы.

Кроме перечисленных, металлы могут иметь и другие типы кристаллических решеток.

Способность металла изменять тип своей кристаллической решетки в зависимости от температуры называется *аллотропией* или *полиморфизмом*, а переходы от одного кристаллического строения к другому называется *аллотропическими* или *полиморфными*. Основной причиной аллотропии является стремление любого вещества обладать минимальным запасом свободной энергии F , которая является функцией абсолютной температуры: $F = f(T)$.

Некоторые металлы, например железо, титан, олово и другие, способны изменять свое кристаллическое строение, перестраивая тип элементарной ячейки. Так, железо до температуры 911 °С имеет ОЦК решетку, а при превышении этой температуры

перестраивается в ГЦК решетку, которая сохраняется до температуры 1392 °С. После чего решетка вновь перестраивается и приобретает ОЦК строение, сохраняя его вплоть до температуры плавления 1539 °С.

Именно благодаря полиморфизму сплавы на основе железа, титана и других металлов можно подвергать термической обработке для целенаправленного изменения их свойств.

В кристаллической решетке по различным направлениям находится разное число атомов. Из-за различной плотности расположения атомов в разных плоскостях некоторые свойства кристалла зависят от направления. Зависимость свойств от направления в кристалле называется *анизотропией*. Если свойства тела не зависят от направления, то такие тела называют *изотропными*.

Однако анизотропия может проявляться в пределах одного кристалла или монокристалла. Реальные металлы являются телами поликристаллическими. Так, в 1 см³ стального проката содержатся десятки тысяч кристаллов, которые произвольно ориентированы друг к другу своими кристаллографическими направлениями. Поэтому реальные металлы имеют примерно одинаковые свойства по всем направлениям.

3.2.2. Дефекты кристаллической решетки

«У реальных кристаллических веществ есть одна важная особенность строения – это структурные неоднородности, обычно называемые *дефектами*. К дефектам относятся любые нарушения периодичности строения кристаллической решетки. Все дефекты можно подразделить на следующие виды: точечные, линейные, поверхностные и объемные.

Точечные дефекты (рис. 3.2) могут быть в виде [7]:

- 1) *вакансий* (свободные узлы) – (рис. 3.2, а, 1);
- 2) *смещения* атома (иона) из узла решетки в междоузлие (рис. 3.2, а, 2);
- 3) *замещения* атома в узле решетки атомом примеси (рис. 3.2, б);
- 4) *внедрения* чужеродного атома в междоузлие решетки (рис. 3.2, в).

Кристаллическая решетка в местах нахождения вакансий и особенно чужеродных атомов, внедренных в узлы или междоузлия решетки, искажена, деформирована, что приводит к возникновению местных внутренних напряжений и изменению всего комплекса физико-химических свойств. Все эти дефекты приводят к существенному изменению электрических, магнитных и механических свойств. При внедрении атомов в междоузлие, особенно чужеродных атомов, решетка деформируется сильнее, чем при наличии вакансий, и тем сильнее, чем больше разница между размерами атома внедрения и атома данной решетки» [7].

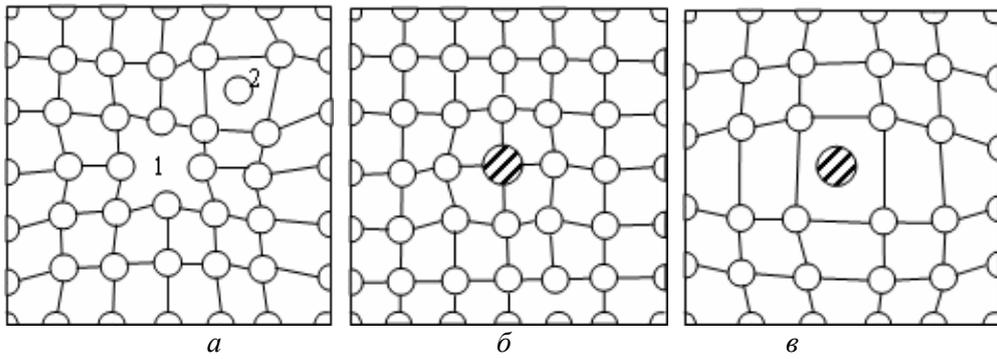


Рис. 3.2. Точечные дефекты

Линейные (одномерные) дефекты кристаллической решетки называют *дислокациями* (*dislocation* – смещение).

«Простейшие виды дислокации – краевая и винтовая. Их можно представить следующим образом: надрезем идеальный кристалл и внутрь образовавшейся щели вставим (или удалим из нее) «лишнюю» атомную плоскость (экстраплоскость). Это приведет к образованию *краевой дислокации* (рис. 3.3, *а*). Если края надреза сдвинем параллельно плоскости надреза на величину, кратную периоду решетки, получим *винтовую дислокацию* (рис. 3.3, *б*) «[7].

Важной характеристикой дислокаций является их плотность – число выходов дислокаций на единицу площади (см^{-2}). В реальном металле плотность дислокаций огромна и составляет $10^4 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

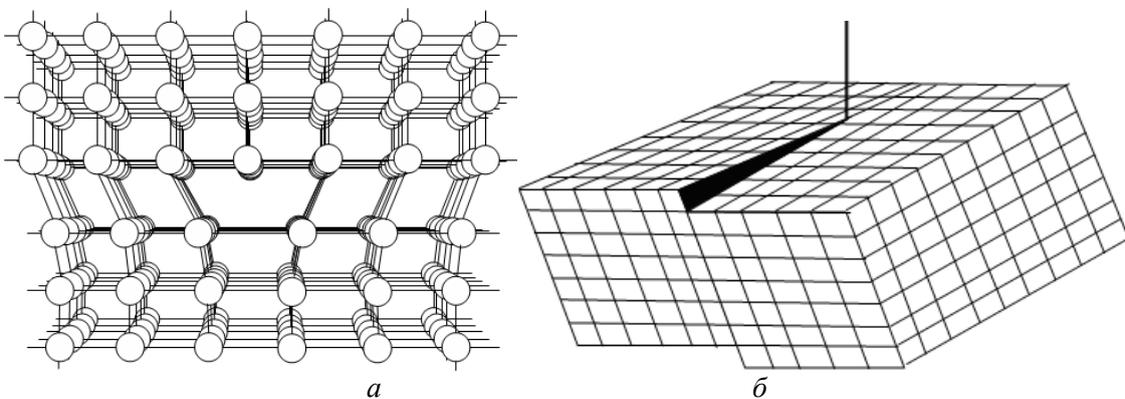


Рис. 3.3. Линейный дефект: краевая (*а*) и винтовая (*б*) дислокации

Поверхностные (двумерные) дефекты дислоцированы на границе кристаллических зерен и образующих их блоков. На границе кристаллических зерен атомы менее правильно расположены, чем в объеме зерна. Граница имеет ширину 5...10 межатомных единиц и представляет переходную область из одной кристаллографической ориентации в другую. Кристаллические зерна разориентированы, повернуты друг относительно друга на несколько градусов (рис. 3.4).

«Объемные (трехмерные) дефекты имеют сравнительно большие размеры во всех трех измерениях. К этому виду дефектов относятся пустоты (поры и трещины), инородные

включения (в твердом или жидком состоянии), включения иной кристаллографической модификации или с другим стехиометрическим составом и т. п.» [7].



Рис. 3.4. Строение поликристаллического тела

Каждый дефект (вакансия, дислокация) деформирует решетку. Число дефектов с повышением температуры и пластической деформации резко возрастает. Атомные (точечные) дефекты сильно влияют на электрические свойства кристалла, например, тысячные доли процента некоторых примесей увеличивают электропроводность полупроводников в $10^5 \dots 10^6$ раз.

3.2.3. Влияние дефектов строения металлов на их прочность [7]

«В предыдущем параграфе рассматривались основные виды дефектов кристаллической решетки. Было отмечено, что на механические свойства материалов, и в частности металлов, основное решающее влияние оказывают поверхностные дефекты, дислоцированные по границам кристаллических зерен и блоков. На границах зерен металлов скапливаются легкоплавкие неметаллические примеси (например, сульфиды и фосфиды (FeS , Fe_3P) оксиды, мелкие поры и т. д.), которые резко ухудшают механические свойства.

Наличие в реальных кристаллах большого количества дислокаций и вакансий приводит к значительному снижению механической прочности. Характеристикой, непосредственно влияющей на сопротивление сплава пластической деформации, является *плотность дислокаций*, т. е. их суммарная длина, приходящаяся на единицу объема металла. Плотность дислокаций принято выражать в см^{-2} ($\text{см}/\text{см}^3$) «[7].

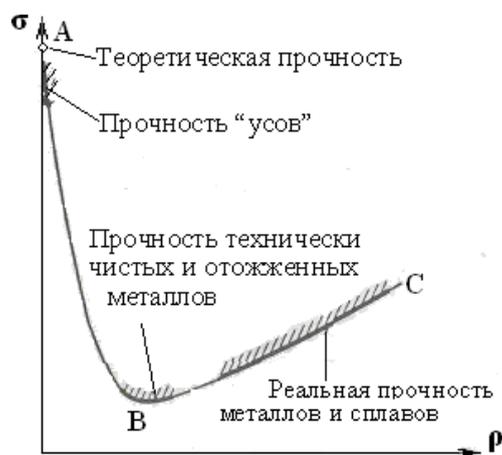


Рис. 3.5. Зависимость прочности металлов σ от концентрации дефектов ρ

Зависимость между прочностью металла σ и плотностью дислокаций ρ может быть представлена графиком (рис. 3.5) [7].

Точка A соответствует прочности бездефектного металла, т. е. теоретической прочности. На участке AB по мере увеличения плотности дислокаций наблюдается снижение прочности. Верхняя часть этого участка, близко примыкающая к точке A , соответствует прочности так называемых «усов», т. е. специально выращиваемых продолговатых кристалликов с очень низкой плотностью дислокаций. Прочность «усов» близка к теоретической. Они широко применяются при изготовлении композиционных сплавов в качестве упрочнителей. В точке B при плотности дислокаций $10^6 \dots 10^7 \text{ см}^{-2}$ уменьшение прочности прекращается и начинается ее постепенный рост. Это объясняется тем, что с увеличением ρ перемещение дислокаций затрудняется в связи с тем, что они начинают передвигаться не по параллельным, а по пересекающимся плоскостям других систем скольжения, тем самым, препятствуя движению друг друга (участок BC).

Из изложенного выше следует, что от дислокационной структуры существенно зависят прочностные свойства металла и что этими свойствами можно управлять, целенаправленно изменяя дислокационную структуру за счет выбора химического состава сплава, режимов его термической обработки или обработки какими-либо другими специальными методами. Это достигается путем легирования, закалки или наклепа металла. При этом плотность дислокаций не должна превышать $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$, так как при большей плотности дислокаций металл становится хрупким. На практике обычно следуют по второму пути.

Легирование – это введение в металл небольших количеств специальных примесей, которые приводят к значительным его структурным изменениям. Легирующие добавки сильно взаимодействуют с дислокациями и затрудняют их движение, улучшая тем самым механические характеристики.

Закалка – это термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла выше температуры фазового превращения в твердом состоянии, выдерживании при этой температуре и контролируемом ускоренном охлаждении. В результате этих операций в металле увеличивается концентрация дефектов, в том числе плотность дислокаций, а также образуется мелкозернистая структура, поэтому протяженность границы между зернами резко

возрастает. Сама же граница труднопроходима для дислокаций, что приводит к затруднению их движения и упрочнению металла.

Наклеп – это обработка металлической заготовки путем прокатки,ковки или волочения. В результате пластической деформации металла увеличивается плотность дислокаций (и концентрация других дефектов), а главное – дислокации при этой обработке переплетаются, что приводит к затруднению их движения и упрочнению металла. На этом принципе было основано производство дамасской стали.

Указанные технологические операции (легирование, закалка, наклеп) создают оптимальную концентрацию дислокаций. Известно, что наибольшее упрочнение металлов достигается при плотности дислокаций порядка $10^{12} \dots 10^{13}$ на 1 см^{-2} (у совершенных кристаллов Si и Ge – $10^2 \dots 10^3$ на 1 см^{-2} , а у недеформированных металлических кристаллов $10^6 \dots 10^8$ на 1 см^{-2}).

3.3. Основные свойства материалов и методы их определения

3.3.1. Основные свойства материалов

Для конструкционных материалов особенно важны *механические свойства*, так как они характеризуют возможность их использования в изделиях, эксплуатируемых при воздействии механических нагрузок. Количественные характеристики механических нагрузок определяют в результате *испытаний*.

При проведении механических испытаний стремятся воспроизвести такие условия воздействия на материал, которые имеют место при эксплуатации изделия, изготовленного из этого материала. Многообразие условий службы материалов обуславливает проведение большого числа механических испытаний. Но вместе с тем основными признаками, позволяющими классифицировать виды механических испытаний, являются:

- способ нагружения (растяжение, сжатие, изгиб и др.);
- скорость нагружения (статическая, динамическая);
- протяженность процесса испытания во времени (кратковременная, длительная).

3.3.2. Механические свойства, определяемые при статическом нагружении

Испытание на растяжение [2]

Испытание на растяжение относится к числу наиболее распространенных статических испытаний, позволяющих определить основные характеристики механических свойств металла. К преимуществам такого испытания относится сравнительная простота эксперимента и возможность получить растяжение в чистом виде. Для испытания

используются стандартные образцы с рабочей частью в виде цилиндра (цилиндрические образцы) (рис. 3.6) или стержни с прямоугольным сечением (плоские образцы). Размеры образцов устанавливает ГОСТ 1497–84.

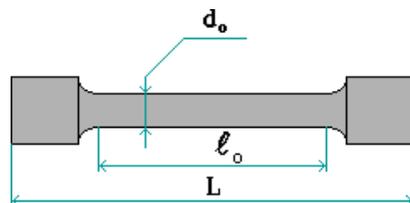


Рис. 3.6. Цилиндрический образец для испытания на растяжение:
 l_0 – начальная длина рабочей части; d_0 – начальный диаметр; L – полная длина образца

Отношение начальной расчетной длины рабочей части образца l_0 к начальному диаметру d_0 , т. е. $k = l_0 / d_0$, называют кратностью образца. Применяются образцы с кратностью 2, 5 и 10. Самым распространенным является образец с кратностью $k = 5$.

Перед испытанием образец закрепляют в вертикальном положении. На рисунке 3.7 приведена принципиальная схема типичной испытательной машины.

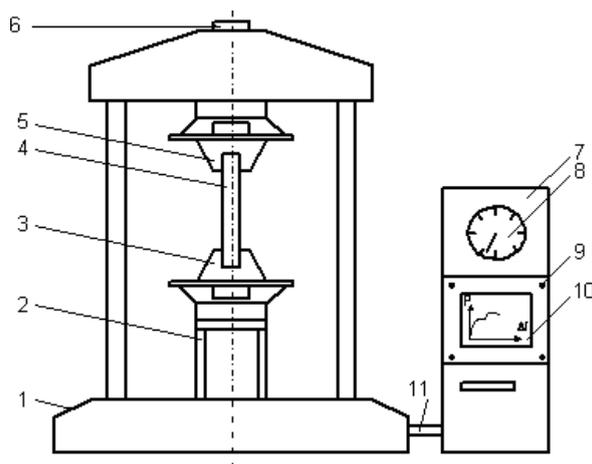


Рис. 3.7. Принципиальная схема испытательной машины:
 1 – собственно машина; 2 – винт грузовой; 3 – нижний захват (активный); 4 – образец;
 5 – верхний захват (пассивный); 6 – силоизмерительный датчик; 7 – пульт управления с электроприводной аппаратурой; 8 – индикатор нагрузок; 9 – рукоятки управления;
 10 – диаграммный механизм; 11 – кабель

В процессе испытания диаграммный механизм машины непрерывно регистрирует так называемую первичную (машинную) диаграмму растяжения в координатах нагрузка P – абсолютное удлинение образца Δl (рис. 3.8).

На диаграмме растяжения (рис. 3.8) материалов можно выделить несколько характерных участков.

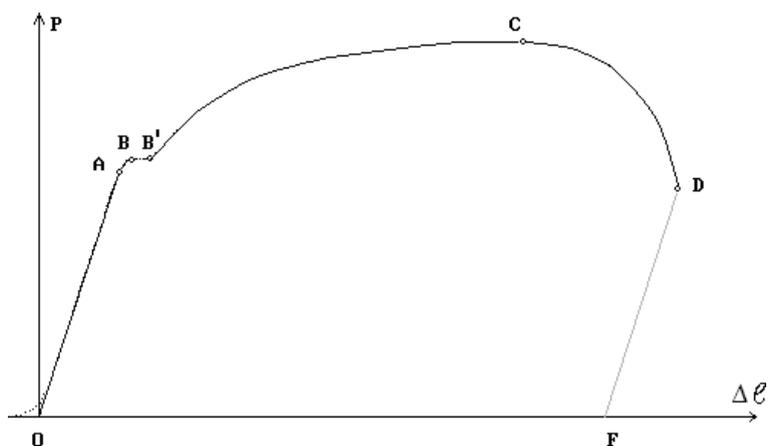


Рис. 3.8. Машинная (первичная) диаграмма растяжения пластичного материала с площадкой текучести

Прямолинейный участок OA соответствует упругой деформации образца. Дальнейшее возрастание нагрузки (участок AB) приводит к появлению пластической (остаточной) деформации. Причем на участке BB' наблюдается интенсивная пластическая деформация при неизменной нагрузке. Этот участок диаграммы называется *площадкой текучести*. Однако многие металлы и сплавы деформируются при растяжении без площадки текучести. До максимальной нагрузки (точка C) происходит равномерная деформация образца по всей его рабочей части. А затем образец в наиболее слабом месте утончается (это место называется шейкой) и на участке CD идет пластическая деформация при снижении нагрузки. В точке D происходит окончательное разрушение образца с разделением его на две части.

По диаграмме растяжения определяют следующие характеристики механических свойств металла.

Показатели прочности

Прочность – это свойство материала сопротивляться деформации или разрушению. Показатели прочности характеризуются не прикладываемой нагрузкой P , а удельной величиной – условным напряжением σ , определяемым отношением нагрузки к площади начального поперечного сечения образца F_0 ($\sigma = P / F_0$). Соответствующие напряжению σ относительные деформации δ вычисляют как частное от деления абсолютной деформации $\Delta\ell$ на ℓ_0 : $\delta = \Delta\ell / \ell_0$ или $\delta = (\Delta\ell / \ell_0) \cdot 100\%$. Зависимость $\sigma = f(\delta)$ приведена на рисунке 3.9.

В области упругой деформации (участок OA) (см. рис. 3.9) зависимость между напряжением σ и относительной деформацией δ пропорциональна и известна под названием закона Гука:

$$\sigma = E \cdot \delta,$$

где E – модуль Юнга или модуль нормальной упругости измеряется в мегапаскалях и характеризует жесткость материала. Чем выше E , тем материал жестче, т. е. меньшую упругую деформацию вызывает одна и та же нагрузка. **Предел пропорциональности** $\sigma_{\text{пц}}$ –

это напряжение, при котором отступление от линейной зависимости достигает некоторого значения, установленного техническими условиями (в качестве технического условия обычно берут следующее: при напряжении $\sigma_{\text{пл}}$ тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации с осью нагрузок, увеличивается на 50% по сравнению с линейным участком).

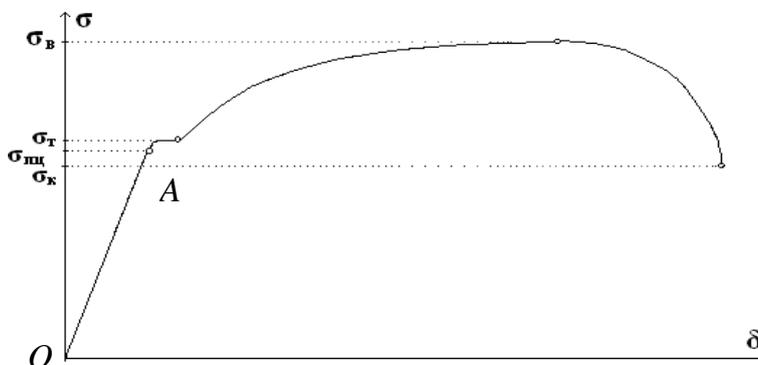


Рис. 3.9. Определение основных характеристик прочности

Предел текучести $\sigma_{\text{т}}$ — это напряжение, при котором материал деформируется (течет) без заметного изменения нагрузки.

Предел прочности (временное сопротивление) $\sigma_{\text{в}}$ — это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке.

Напряжение при разрыве $\sigma_{\text{к}}$ — это напряжение, соответствующее моменту разрушения образца.

Показатели пластичности

Пластичностью называют свойство материалов необратимо изменять свою форму и размеры под действием внешней нагрузки. Под ее действием материал деформируется. Различают следующие виды деформации: растяжение (сжатие), изгиб, кручение и срез.

Ранее уже была рассмотрена абсолютная Δl и относительная δ деформации под действием нагрузки. Если к материалу приложена небольшая нагрузка ($\sigma < \sigma_{\text{пл}}$), то возникает только упругая деформация и после снятия нагрузки образец восстанавливает свою первоначальную длину l_0 . А если напряжение $\sigma > \sigma_{\text{пл}}$, то после снятия нагрузки разгрузка образца идет по линии DF (см. рис. 3.8), параллельной линии упругой деформации OA . Остаточное удлинение в этом случае определяется как $\Delta l_{\text{ост}} = l - l_0$ (здесь l — длина образца перед снятием нагрузки), а относительное остаточное удлинение как

$$\delta = \frac{\otimes l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100\%.$$

Твердость – это свойство материала оказывать сопротивление деформации или хрупкому разрушению при внедрении индентора в его поверхность. Под *индентором* понимается твердосплавный наконечник (в виде шара, пирамиды или конуса), твердость которого существенно превосходит твердость испытываемого материала. Высокой твердостью должны обладать металлорежущие инструменты: резцы, сверла, фрезы и т. д. Испытание на твердость – самый простой вид механических испытаний. Наибольшее распространение получили статические методы испытания на твердость при вдавливании индентора: методы Бринелля, Виккерса и Роквелла.

При испытании на твердость по *методу Бринелля* (ГОСТ 9012–59) в поверхность материала вдавливается твердосплавный шарик диаметром D под действием нагрузки P и после снятия нагрузки измеряется диаметр отпечатка d (рис. 3.10).

Число твердости по Бринеллю $HВ$ определяется как отношение нагрузки P к площади поверхности сферического отпечатка M :

$$HВ = \frac{P}{M} = \frac{2P}{\pi D \cdot [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

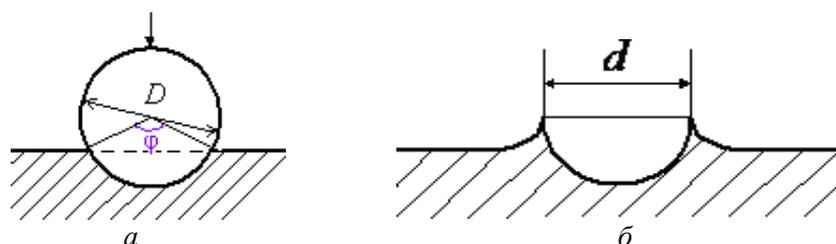


Рис. 3.10. Определение твердости металла методом Бринелля:
а – схема испытания; б – отпечаток шарика

Для получения сопоставимых результатов при определении твердости $HВ$ шариками различного диаметра необходимо соблюдать условие подобия. Подобие отпечатков при разных D и P будет обеспечено, если угол φ останется постоянным ($\varphi = \text{const}$). Твердость по Бринеллю обозначается символом $HВ$ с указанием числа твердости. При этом единица измерения ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) не ставится, например 200 $HВ$.

Преимущество метода Бринелля заключается в простоте испытания и точности получаемых результатов. Метод Бринелля не рекомендуется применять для материалов с твердостью более 450 $HВ$, так как стальной шарик заметно деформируется, что вносит погрешность в результаты испытаний. Для испытания твердых материалов применяют методы Роквелла и Виккерса.

«При испытании на твердость по *методу Виккерса* (ГОСТ 2999–75) в поверхность материала вдавливается алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$ (рис. 3.11)» [14].

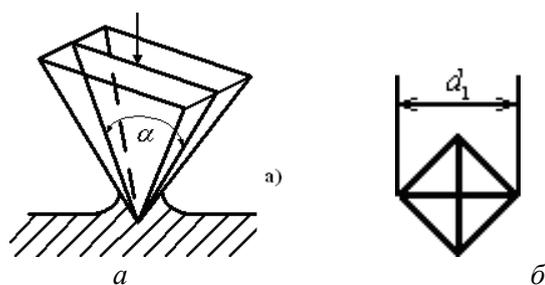


Рис. 3.11. Определение твердости металла методом Виккерса:
а – схема испытаний; *б* – отпечаток пирамиды

После снятия нагрузки вдавливания измеряется диагональ отпечатка d_1 . Число твердости по Виккерсу HV определяется как отношение нагрузки P к площади пирамидального отпечатка M :

$$HV = \frac{P}{M} = 1,854 \cdot \frac{P_2}{d_1}.$$

«Твердость по Виккерсу обозначается символом HV , при этом единица измерения ($\text{кгс}/\text{мм}^2$) не ставится» [14].

Преимущество метода Виккерса по сравнению с методом Бринелля заключается в том, что методом Виккерса можно испытывать материалы более высокой твердости из-за применения алмазной пирамиды.

При испытании на твердость по методу Роквелла (ГОСТ 9013–59) в поверхность материала вдавливается алмазный конус с углом 120° при вершине или стальной шарик диаметром 1,588 мм. Однако, согласно этому методу, за условную меру твердости принимается глубина отпечатка. Рассмотрим схему испытаний по методу Роквелла на примере вдавливания алмазного конуса (рис. 3.12).

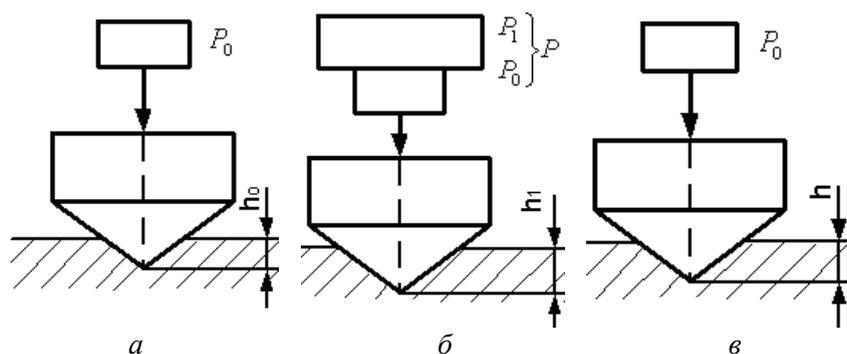


Рис. 3.12. Схема испытаний на твердость методом Роквелла

В начале прикладывается предварительная нагрузка P_0 , под действием которой индентор вдавливается на глубину h_0 (рис. 3.12, *а*). Затем прикладывается основная нагрузка P_1 , под действием которой индентор вдавливается на глубину h_1 (рис. 3.12, *б*). После этого снимают нагрузку P_1 , но оставляют предварительную нагрузку P_0 (рис. 3.12, *в*). При этом под действием упругой деформации индентор поднимается вверх, но не достигает уровня h_0 . Разность $(h - h_0)$ зависит от твердости материала: чем тверже материал, тем меньше эта разность. Глубина отпечатка измеряется индикатором часового типа с ценой деления 0,002 мм.

При испытании мягких металлов методом Роквелла в качестве индентора применяется стальной шарик. Последовательность операций такая же, как и при испытании алмазным конусом.

Число твердости, определенное методом Роквелла, обозначается символом HR и выражается в условных безразмерных единицах. В зависимости от формы индентора и значений нагрузок вдавливания к этому символу добавляются буквы А, С или В, указывающие соответствующую шкалу измерений. Обозначения твердости и значения нагрузок вдавливания для разных шкал измерений методом Роквелла приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Обозначения твердости и значения нагрузок вдавливания для разных шкал измерений методом Роквелла

Шкала		А	В	С
Индентор		Алмазный конус	Алмазный конус	Стальной шарик
Обозначение твердости		HRA	HRC	HRB
Нагрузка вдавливания, кгс	P_0	10	10	10
	P_1	50	140	90
	P	60	150	100

Различие в нагрузке P_1 для шкал объясняется тем, что по шкале А измеряют твердость особо твердых материалов, и в этом случае во избежание повреждений алмазного конуса рекомендуется меньшая нагрузка вдавливания. Число твердости по Роквеллу подсчитывается по формулам

$$HRA(HRC) = 100 - \frac{h - h_0}{0,002}; HRB = 130 - \frac{h - h_0}{0,002},$$

где 100 и 130 – предельно заданное число деления индикатора часового типа с ценой деления 0,002 мм, например, 50 HRC означает, что твердость, определенная методом Роквелла по шкале С при вдавливании алмазного конуса, равна 50 (единица измерения не ставится).

Преимущество метода Роквелла по сравнению с методами Бринелля и Виккерса заключается в том, что значение твердости по методу Роквелла фиксируется непосредственно стрелкой индикатора, при этом отпадает необходимость в оптическом измерении размеров отпечатка.

3.4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ

3.4.1. Понятие о сплавах [2]

Чистые металлы характеризуются низким пределом прочности, поэтому находят ограниченное применение. В машиностроении, главным образом, применяются сплавы.

Сплавы – это сложные вещества, получаемые сплавлением или спеканием двух или нескольких простых веществ, называемых компонентами (при сплавлении компоненты доводят до плавления, а при спекании их порошки смешивают и подвергают давлению при

высокой температуре). Сплав считается металлическим, если его основу (свыше 50% по массе) составляют металлические компоненты. Металлические сплавы обладают более высокими прочностными и другими механическими свойствами по сравнению с чистыми металлами. По этой причине они получают широкое применение в качестве конструкционных материалов. В учебном пособии рассмотрим особенности строения и свойств только двойных (или двухкомпонентных) сплавов. Полученные при этом знания достаточны для уяснения природы сплавов, состоящих из трех и большего числа компонентов. Следует также отметить, что основу большинства многокомпонентных сплавов, как правило, составляет какой-нибудь двойной сплав (например, основу легированных сталей составляет сплав железа с углеродом).

3.4.2. Виды двойных сплавов

В технике большинство сплавов получают взаимным растворением их составляющих в жидком состоянии, т. е. доводят компоненты до плавления. При этом образуется жидкий раствор – однородная смесь двух или более компонентов, которые равномерно распределены в виде отдельных атомов, ионов или молекул. Расплавленные компоненты при охлаждении и кристаллизации могут образовывать твердые металлические сплавы с различным строением:

- смеси;
- твердые растворы;
- химические соединения.

Смеси чистых металлов образуются, когда разнородные атомы компонентов не входят в общую кристаллическую решетку сплава. Каждый компонент образует самостоятельные кристаллы (зерна), сохраняя присущую ему кристаллическую решетку (рис. 3.13).

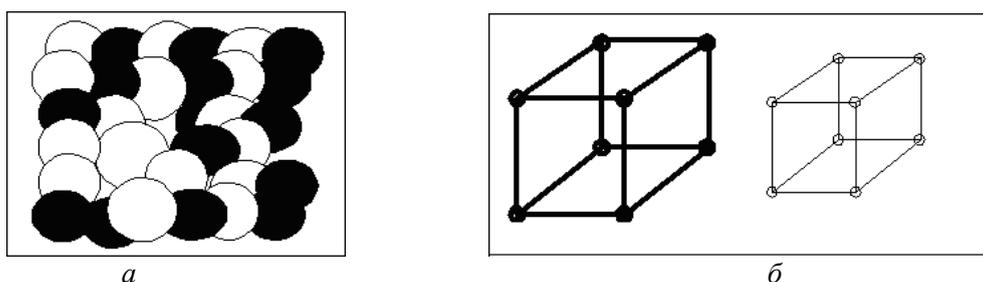


Рис. 3.13. Механическая смесь двух металлов (а) и их кристаллические решетки (б)

Твердые растворы образуются в результате перехода в твердое состояние однородных жидких растворов. Рассмотрим твердый раствор двух компонентов. Один из компонентов, который сохраняет свою кристаллическую решетку, является растворителем. Тогда другой компонент (растворимый) распределяется в решетке растворителя, не изменяя ее типов. Твердые растворы бывают двух типов:

- замещения;
- внедрения.

В твердых растворах замещения часть атомов в кристаллической решетке растворителя замещена атомами другого компонента (рис. 3.14, *a*). Такие растворы образуют компоненты с аналогическими типами кристаллических решеток при небольшой разнице их параметров, например, в сплавах железа с хромом, никелем и т. д.

В твердых растворах внедрения атомы растворенного компонента располагаются между атомами растворителя (рис. 3.14, *б*). Это возможно, если растворимый компонент имеет очень малый атомный диаметр и может разместиться между узлами кристаллической решетки растворителя, не вытесняя атомов растворителя из узлов решетки. Твердые растворы внедрения образуются, например, в сплавах железа с водородом, азотом и бором.

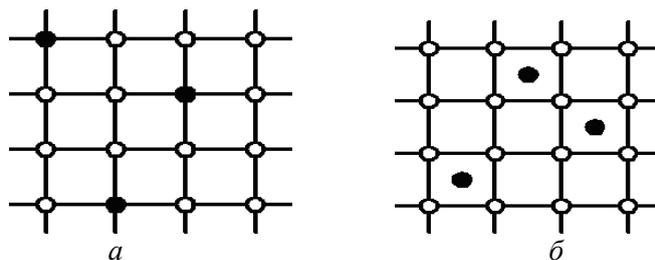


Рис. 3.14. Виды твердых растворов: *a* – замещения; *б* – внедрения;
 ○ – атомы растворителя; ● – атомы растворимого компонента

В обоих случаях твердого раствора исходные размеры кристаллической решетки растворителя изменяются, а это приводит к изменению свойств сплавов по сравнению со свойствами исходных компонентов: увеличивается электрическое сопротивление, как правило, снижается пластичность и вязкость.

При образовании твердых растворов компоненты могут растворяться друг в друге неограниченно или ограниченно. Ограниченная растворимость характеризуется тем, что в решетке растворителя может растворяться лишь определенное количество атомов растворимого элемента. Остальные атомы растворимого элемента могут сами стать растворителями или вступить со вторым компонентом в химическое взаимодействие.

При сплавлении двух компонентов могут также образовываться *химические соединения*, которые имеют характерные особенности:

- 1) их кристаллическая решетка отличается от кристаллических решеток образующих элементов и имеют более сложное строение;
- 2) соотношение элементов в сплавах кратно целым числам (они имеют формулу $AnBm$, например FeO, CuO и т. д.)
- 3) их свойства отличны от свойств образующих элементов.

У химических соединений связь между атомами, как правило, сильнее и жестче металлической, поэтому они являются очень твердыми и хрупкими. Химические соединения имеют постоянную температуру плавления.

3.4.3. Диаграммы состояния двойных сплавов

Диаграмма состояния представляет собой зависимость между строением сплава, его составом и температурой. Диаграмма имеет несколько фаз.

Фазой считается определенная часть системы, образованной компонентами сплава, которая во всех своих точках имеет одинаковые состав, строение и свойства.

Жидкая фаза представляет собой раствор расплавленных компонентов.

Твердые фазы являются зернами, имеющими определенную форму, размер, состав, специфику строения и свойства. Твердые фазы можно наблюдать в микроскоп. Диаграмма состояния разделена линиями на области.

Рассмотрим основные диаграммы состояния двойных сплавов.

Диаграмма состояния I рода

(Сплавы, образующие гетерогенные структуры)

Данная диаграмма [2] (рис. 3.15, а) охватывает сплавы, компоненты которых образуют смеси своих практически чистых зерен при ничтожной взаимной растворимости. На оси абсцисс отложена процентная доля компонента В в сплаве. Процентная доля компонента А увеличивается в противоположном направлении оси абсцисс (она не показана, но подразумевается). Компоненты А и В для этого типа диаграмм взаимно растворяются только в жидком состоянии, а в твердом – не растворяются и не образуют химических соединений. Линия диаграммы *ACB*, выше которой сплавы находятся в жидком состоянии, называется линией *ликвидус* (от лат. «ликвидус» – жидкий, текучий). Линия диаграммы *DCE*, ниже которой сплавы находятся в твердом состоянии, называется линией *солидус* (от лат. «солидус» – твердый). Между линиями ликвидус и солидус сплавы переходят из жидкого состояния в твердое.

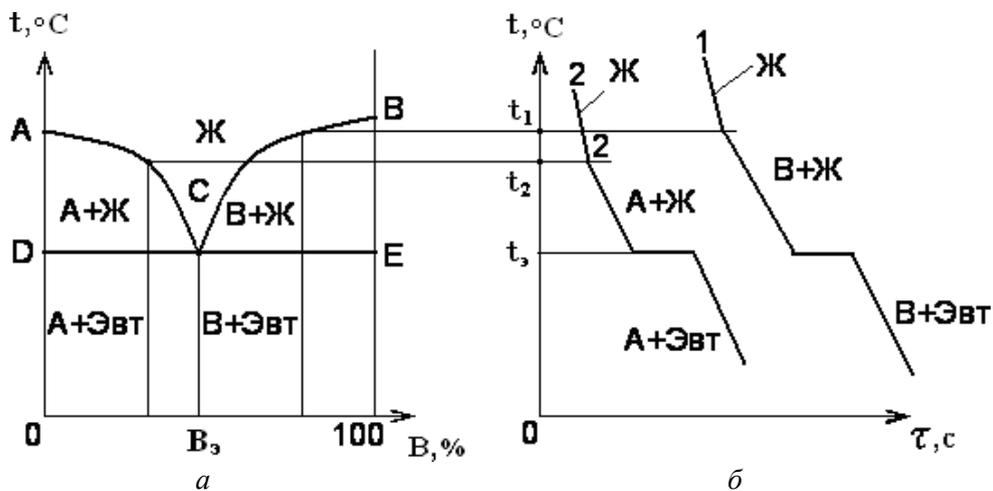


Рис. 3.15. Диаграмма состояния I рода (а) и кривые охлаждения сплава (б)

Сплав двух компонентов, который плавится при минимальной температуре, называется эвтектическим или *эвтектикой* (от греч. «эвтектика» – легко плавящийся). Эвтектика представляет собой тонкую смесь компонентов А и В в виде мелких зерен. Состав сплава можно определить, спроецировав точку *C* на ось абсцисс (точка B_3). У такого состава одновременно плавятся или кристаллизуются оба компонента при температуре t_3 – эвтектической температуре. Такой состав имеет самую высокую прочность.

Левее точки эвтектики сплавы называются доэвтектическими, а правее – заэвтектическими. При этом из каждого сплава по мере снижения температуры в твердую фазу переходит в начале тот компонент, количество которого превышает эвтектическую концентрацию. Причем он кристаллизуется в виде крупных зерен, имеющих меньшую прочность, по сравнению с мелкозернистой эвтектикой.

Кривые охлаждения сплавов приведены на рис. 3.15, б. Рассмотрим охлаждение сплава, имеющего избыток компонента А (кривая 2). До температуры t_2 сплав находится в жидкой фазе. По мере снижения температуры в твердую фазу сначала начинает выпадать компонент А. Двухфазная область *ACD* содержит твердую фазу компонента А и жидкую фазу Ж, состоящую из обоих компонентов. По мере приближения температуры к t_3 состав незакристаллизовавшейся фазы приближается к эвтектическому. После температуры t_3 сплав состоит из крупных зерен компонента А и мелких зерен эвтектики (А + В).

При охлаждении заэвтектических сплавов (кривая 1) сначала в твердую фазу выпадает компонент В. После температуры t_3 сплав состоит из крупных зерен компонента В и мелких зерен эвтектики (А + В).

Диаграмма состояний II рода

Диаграмма состояния II рода [2] (рис. 3.16, а) характерна для сплавов с неограниченной растворимостью компонентов друг в друге, имеющих одинаковые типы решеток и сходное строение наружных электронных оболочек.

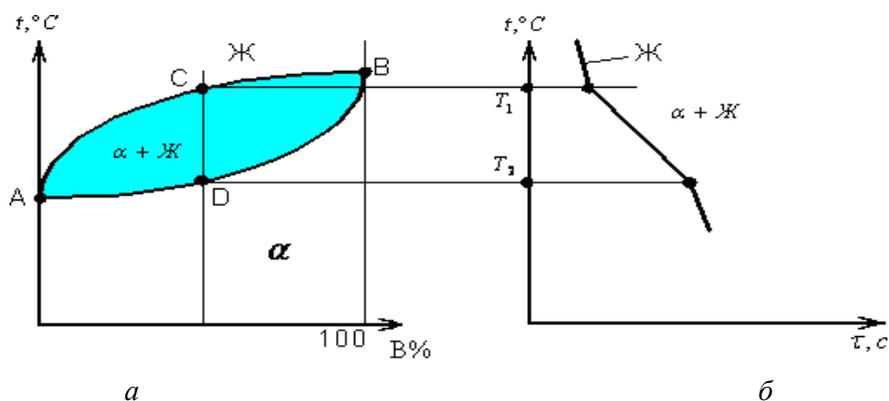


Рис. 3.16. Диаграмма состояния II рода (а) и кривые охлаждения сплава (б)

На диаграмме различают три фазовые области (рис. 3.16, б):

1. Выше линии ликвидуса ACB находится область жидкой фазы Ж;
2. Ниже линии солидуса ADB находится твердый раствор компонентов А и В (α). Зерна этой фазы имеют единую кристаллическую решетку, однако у сплавов разного состава число атомов компонентов А и В в элементарных ячейках различно.
3. Между линиями ликвидуса и солидуса расположена двухфазная область $\alpha + Ж$, в которой по мере снижения температуры содержание жидкой фазы постоянно уменьшается.

3.4.4. Строение и свойства железоуглеродистых сплавов

Железо в чистом виде встречается очень редко. Его получают из железных руд при высоких температурах, которые создают за счет горения кокса (угля). Образующееся железо Fe растворяет в себе определенное количество углерода и небольшое количество примеси: сопутствующих металлов и металлоидов (Mn, Si, P, S) и из воздуха – газов O_2 , N_2 , H_2 .

Железо с углеродом образует сплавы. В зависимости от содержания углерода С в Fe получают стали (содержание С до 2,14%) или чугуны (С от 2,14% и более). Таким образом, то, что в обиходе называют железом, является сплавом железа с углеродом в виде стали или чугуна, представляющих собой важнейшие материалы в технике.

Строение и свойства железа [7]

Железо – это металл серебристо-белого цвета, имеющий плотность 7874 кг/м^3 , $T_{\text{пл}} = 1539 \text{ }^\circ\text{C}$. Абсолютно чистое железо неизвестно. Чистое железо, которое может быть получено в настоящее время, содержит Fe 99,999%. Технические сорта содержат Fe 99,8...99,9%; такое Fe называют «армко-железо», его используют в электротехнике в качестве магнитного материала. Чистейшее Fe имеет совсем другие свойства, чем технически чистое Fe.

На рисунке 3.17 приведены кривые нагрева и охлаждения Fe, на которых в виде площадок отмечены критические точки при нагревании: Ac_2 , Ac_3 , Ac_4 и охлаждении: Ar_4 , Ar_3 , Ar_2 (буквы от франц. слов: А – *arrete* – остановка; с – *choffage* – нагрев; r – *refroidissement* – охлаждение).

«Железо при обычных температурах имеет ОЦК решетку и его называют α -Fe.

При нагреве до температуры $910 \text{ }^\circ\text{C}$ Fe сохраняет решетку объемноцентрированного куба. Однако, начиная с температуры $770 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше, Fe становится немагнитным (парамагнетиком). Это Fe часто называют β -Fe. При температуре $910 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит перегруппировка атомов, и решетка становится ГЦК; такое железо называют γ -Fe. При температуре $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ вновь происходит перегруппировка атомов Fe, и образуется решетка

ОЦК. Это высокотемпературное α -Fe нередко называют δ -Fe. При температуре $(1539 \pm 5)^\circ\text{C}$ Fe плавится» [7].

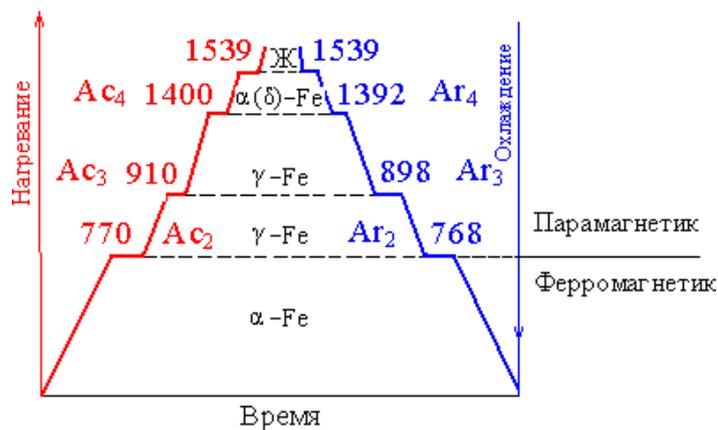


Рис. 3.17. Кривые нагрева и охлаждения железа

Критическая температура превращения γ -Fe \leftrightarrow α -Fe (δ -Fe) при 1400°C (1392°C) обозначают точкой A_{c4} (A_{r4}), температуру превращения α -Fe (β -Fe) \leftrightarrow γ -Fe при 910°C (898°C) – точкой A_{c3} (A_{r3}). Температуру Кюри, равную 770°C (768°C), обозначают точкой A_{c2} (A_{r2}).

При переходе α -Fe в γ -Fe кристаллическая решетка перестраивается из ОЦК в ГЦК, при этом происходит ее объемное сжатие.

Компоненты и фазы в сплавах системы железо – углерод

Основными компонентами сплавов системы Fe – C являются железо и углерод. **Углерод** – неметаллический элемент. Его плотность – $2,5 \text{ мг/м}^3$, $T_{\text{пл}} = 3500^\circ\text{C}$. Он полиморфен и в обычных условиях находится в виде графита. **Графит** имеет решетку гексагональную, слоистую; обладает низкой прочностью и относительно невысокой электропроводностью.

Углерод растворяется в Fe, образуя жидкие и твердые растворы, а также образует с Fe химическое соединение – цементит (карбид железа Fe_3C). В высокоуглеродистых сплавах (в чугунах) углерод может находиться еще и в виде свободного графита.

Основными фазами и структурными составляющими сплавов системы Fe–C, от которых зависят свойства и поведение сплавов при механических и тепловых нагрузках, являются феррит Φ , аустенит A , цементит C и продукты их эвтектического и эвтектоидного превращения: ледобурит L и перлит P .

Феррит (от лат. *ferrum* – железо) – это твердый раствор углерода (и других примесей, например Mn, Si) в α -железе. Различают низкотемпературный α - Φ с растворимостью углерода до 0,02% и высокотемпературный δ - Φ с предельной растворимостью углерода 0,1%.

Атомы растворенного углерода в Φ располагаются в центре граней ОЦК решетки, а также в вакансиях, на дислокациях и других дефектах.

Феррит имеет невысокие твердость ($HV \approx 80$ кгс/мм²) и прочность ($\sigma_b = 250$ МПа) и высокую пластичность: его относительное удлинение перед разрывом $\delta = 50\%$. Поэтому технически чистое Fe (применяется в электротехнике), структуру которого представляют зерна феррита, хорошо подвергается холодной деформации, т. е. хорошо штампуется, прокатывается, протягивается в холодном состоянии. Чем больше феррита в Fe–C сплавах, тем они более пластичны.

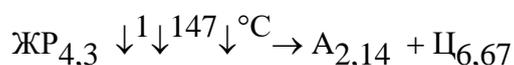
Аустенит (по имени английского ученого Аустена) – это твердый раствор углерода (и других элементов) в γ -Fe. Атомы растворенного в аустените углерода располагаются в центре элементарных ячеек ГЦК решетки. В зависимости от температуры, в A может раствориться углерода до 2,14% (при $T = 1147$ °C), т. е. больше, чем в Φ . Аустенит обычно существует только при $T > 727$ °C. При комнатной температуре он иногда в небольшом количестве сохраняется только в закаленной стали. Аустенит пластичен, его твердость $HV = 160 \dots 200$ кгс/мм², прочность $\sigma = 1600 \dots 2000$ МПа, $\delta = 40 \dots 50\%$. A – парамагнетик, хуже проводит электрический ток и тепло, чем Φ .

Способность α - и γ -Fe растворять неодинаковое количество углерода имеет важную роль при термической и химико-термической обработке стали.

Цементит (указывает на твердость этой фазы) – это химическое соединение Fe с C – карбид железа Fe₃C. Содержание углерода в Π 6,67%, температура плавления точно не установлена в связи с возможностью его распада и принимается равной примерно 1550 °C (в литературе встречается и 1600, и 1250 °C). Цементит при определенных условиях может распадаться на феррит и графит. До температуры 210 °C (точка A_0) Π слабо магнитен, выше – становится практически немагнитным. Цементит является самой твердой и хрупкой фазой в сплавах Fe–C. Его твердость составляет $HV = 800$ кгс/мм², прочность $\sigma = 8000$ МПа, а пластичность практически равна нулю, поэтому он способен только к небольшим упругим деформациям. Чем больше Π в сплавах Fe–C, тем большей твердостью и меньшей пластичностью они обладают (например, чугуны).

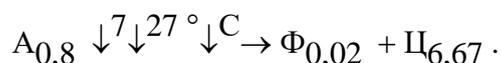
Различают цементит Π первичный Π_I , который кристаллизуется непосредственно из жидкого раствора системы Fe–C, вторичный Π_{II} – продукт распада аустенита и третичный Π_{III} – продукт распада феррита.

Ледебурит (по имени немецкого ученого Ледебура) имеет эвтектическую структуру (колониального типа), состоящую из аустенита и цементита, одновременно кристаллизующихся из жидкого раствора при постоянной температуре, равной 1147 °C. Ледебурит содержит углерода 4,3%. Он присутствует во всех затвердевших сплавах, содержащих углерод от 2,14 до 6,67%, называемых чугунами (в сталях его нет). Образование L идет из жидкого раствора по схеме



(цифры в этой схеме и в схеме, приведенной далее, указывают содержание углерода в данной фазе). Таким образом, при 1147 °С имеет место *эвтектическое превращение*, в результате которого образуется ледебурит. При температурах выше 727 °С ледебурит представляет собой аустенитно-цементитную эвтектику и обозначается через Ла. При температурах, равной и ниже 727 °С, аустенит превращается в перлит (см. ниже) и образуется структура, содержащая перлит и цементит. Эта структура обозначается буквой Лп. Ледебурит – твердая и хрупкая структурная составляющая чугунов. При обычных температурах его твердость НВ = 650 кгс/мм², прочность $\sigma = 6500$ МПа.

«**Перлит** (от франц. *perle* – жемчуг, указывает на перламутровый отлив шлифа) – представляет собой эвтектоидную структуру, состоящую из смеси зерен (пластинок) феррита и цементита, образующуюся при постоянной температуре, равной 727 °С в результате распада аустенита. При остывании *Л* до 727 °С содержание в нем углерода становится равным 0,8%. Распад происходит по схеме



Распад *Л* называют *эвтектоидным превращением*, а образующуюся смесь тонких пластинок цементита и расположенных между ними более толстых пластинок феррита – эвтектоидной. Вообще эвтектоидным превращением называют процесс, когда твердый раствор определенного состава (в данном случае аустенит) при постоянной температуре трансформируется в структуру, состоящую из новых твердых фаз (в данном случае Φ и *Ц*). Перлит образуется как в сталях, так и в чугунах и играет важную роль в формировании их механических характеристик. Механические свойства *Л* определяются формой и размером частиц цементитной фазы: чем мельче смесь, тем лучше свойства. Пластинчатый перлит имеет НВ = 180...220 кгс/мм², $\sigma = 1800...2200$ МПа, $\delta = 20\%$ » [7].

Диаграмма состояния сплавов системы железо – углерод

Диаграмма состояния сплавов железа с углеродом дает возможность определить строение углеродистых сталей и чугунов в зависимости от содержания углерода и температуры, выбрать режимы термической и других видов обработки.

На рисунке 3.18 представлена упрощенная диаграмма состояния сплавов системы Fe–C (Fe–Fe₃C) [7]. Диаграмма построена по содержанию углерода в количестве от 0 до 6,67% или по содержанию цементита от 0 до 100%.

На диаграмме точка *A* (1539 °С) соответствует $T_{пл}$ ($T_{зат}$) Fe, а точка *D* (~1550 °С) – $T_{пл}$ ($T_{зат}$) цементита. Линия *ACD* – это линия ликвидуса, которая показывает температуру начала затвердевания (конца плавления) сталей и белых чугунов. Выше линии *ACD* сплавы находятся в жидком состоянии. Линия *AECF* – это линия солидуса, которая показывает температуру конца затвердевания (начала плавления) всех сплавов системы Fe–C.

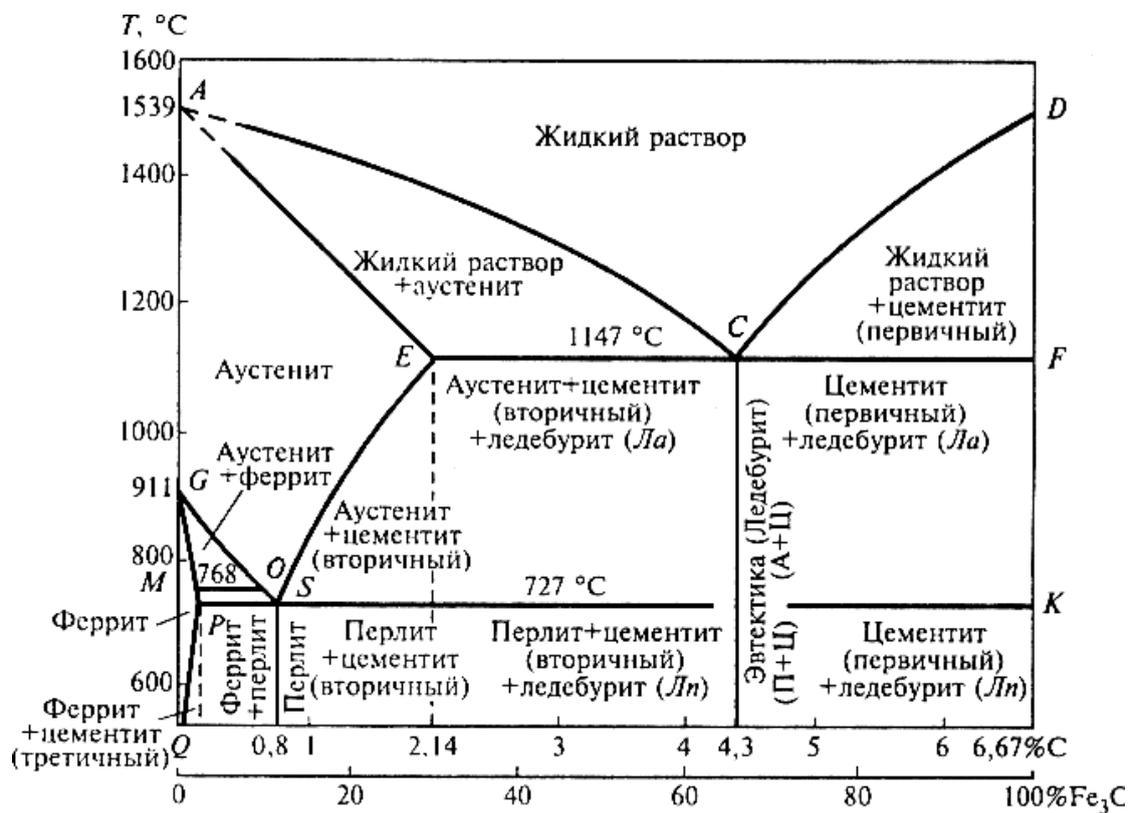


Рис. 3.18. Упрощенная диаграмма состояний соединения железо – цементит

По линии ликвидуса AC при температурах, соответствующих этой линии, из жидкого раствора кристаллизуется аустенит, а на линии CD – первичный цементит C_1 . В точке C при температуре $1147\text{ }^\circ\text{C}$ и содержании углерода $4,3\%$ из жидкого раствора одновременно кристаллизуются A и C_1 , образуя эвтектику, называемую ледебуритом.

На линии солидуса AE при температурах, соответствующих этой линии, окончательно затвердевают сплавы $Fe-C$ с содержанием углерода до $2,14\%$ и образуется структура аустенита. Сплавы Fe с содержанием углерода до $2,14\%$ называют сталями. Стали – это сплавы железа Fe с углеродом C , в которых в результате первичной кристаллизации в равновесных условиях образуется аустенитная структура.

На линии солидуса EC (температура $1147\text{ }^\circ\text{C}$) окончательно затвердевают сплавы $Fe - C$ с содержанием углерода от $2,14$ до $4,3\%$, и образуется эвтектика ледебурита. Поскольку при более высоких температурах из жидкого раствора выделяется аустенит, такие сплавы после затвердевания имеют структуру, представляющую смесь аустенита и ледебурита ($A + La$). На линии солидуса CF ($1147\text{ }^\circ\text{C}$) окончательно затвердевают сплавы $Fe-C$ с содержанием углерода от $4,3$ до $6,6\%$. При этом также образуется структура ледебурита. Вследствие того, что при более высоких температурах из жидкого раствора выделяется цементит (первичный), такие сплавы после затвердевания (при $1147\text{ }^\circ\text{C}$) имеют структуру, представляющую смесь первичного цементита и ледебурита ($C_1 + La$).

Таким образом, на линии ECF жидкие сплавы эвтектического состава кристаллизуются с образованием ледебурита, поэтому линию температур ECF называют линией эвтектического равновесия. Ледебурит присутствует во всех затвердевших сплавах,

содержащих углерод от 2,14 до 6,67%. Такие сплавы называют чугунами. Если цвет излома чугуна серебристо-белый, такой чугун называют белым; в нем практически весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Чугуны с включениями графита называют серыми.

В области ACE находится смесь двух фаз – жидкого раствора и кристаллов аустенита. В области CDF находится смесь, также состоящая из двух фаз – жидкого раствора и кристаллов цементита (первичного). В области $AGSE$ в результате первичной кристаллизации образуется однофазная структура – аустенит.

При охлаждении твердых сплавов в них происходят фазовые и структурные изменения, связанные с аллотропическими превращениями Fe и изменением растворимости в нем углерода. Эти изменения (фазовые превращения) в сплавах Fe – C характеризуют линии GSE , PSK , GPQ .

Линия GS показывает начало превращения аустенита в феррит, а линия GP – конец этого превращения, имеющего место при охлаждении. Поэтому в области GSP будет двухфазная структура, состоящая из аустенита и феррита. Критические точки A_3 лежат на линии GS .

Линия SE показывает, что с понижением температуры твердых растворов растворимость углерода в аустените уменьшается. Если при 1147 °C в аустените углерода содержится 2,14%, то при 727 °C – 0,8%. В сталях с содержанием углерода от 0,8 до 2,14% с понижением температуры из аустенита выделяется избыточный углерод, который образует вторичный цементит $Ц_{II}$. Следовательно, ниже линии SE (до температуры 727 °C) сталь имеет структуру, состоящую из A и $Ц_{II}$. Критические точки, лежащие на линии SE , обозначают $A_{ст}$.

В чугунах с содержанием углерода от 2,14 до 4,3% при 1147 °C, как уже отмечалось, структура состоит из A и L . С понижением температуры из аустенита также начнет выделяться вторичный цементит. Поэтому ниже линии EC до температуры 727 °C белые чугуны имеют структуру, состоящую из A , L и $Ц_{II}$.

На «стальном» участке диаграммы «железо – цементит» точка S (углерода 0,8%) называется *эвтектоидной точкой*, а линия PSK – *эвтектоидной линией*. В связи с этим углеродистые стали в зависимости от содержания углерода подразделяются относительно эвтектоидной точки S на *эвтектоидные* (углерода 0,8%), *доэвтектоидные* (углерода менее 0,8%) и *заэвтектоидные* (углерода менее 0,8%).

Линия PSK (727 °C) – это *линия эвтектоидного равновесия*.

Ниже температуры 727 °C сплавы Fe – C имеют следующие структуры:

– стали с содержанием углерода 0,8% имеют структуру перлита и называются *эвтектоидными сталями* (структуру см. рис. 3.18);

– стали с содержанием углерода от 0,02% при 727 °C (0,006% при 20 °C) до 0,8% имеют структуру, состоящую из Φ и $П$, и называются *доэвтектоидными сталями*. Железо, содержащее углерода 0,02% и менее и имеющее однофазную структуру Φ , называют технически чистым железом (общее содержание примеси не более 0,1...0,2%).

– стали с содержанием углерода от 0,8 до 2,14% имеют структуру, состоящую из P и $Ц_{II}$, и называются *заэвтектоидными сталями*.

При температуре ниже 727 °С микроструктура эвтектоидных сталей состоит только из перлита, доэвтектоидных – из феррита и перлита, заэвтектоидных – из перлита и цементита вторичного.

На «чугунном» участке диаграммы точка C (углерода 4,3%) называется эвтектической точкой, а линия EC – эвтектической линией.

Чугуны по аналогии с углеродистыми сталями в зависимости от содержания углерода, но уже относительно эвтектической точки C , подразделяются на *эвтектические* (углерода 4,3%), *доэвтектические* (углерода менее 4,3%) и *заэвтектические* (углерода более 4,3%). При температуре ниже 727 °С структура эвтектических чугунов состоит из эвтектики ледебурита низкотемпературного (L_{II}), доэвтектических чугунов – из перлита и ледебурита (L_{II}) и заэвтектических чугунов – из ледебурита (L_{II}) и цементита первичного ($Ц_I$).

Белые чугуны с содержанием углерода 4,3% имеют структуру ледебурита, представляющего при температурах ниже 727 °С смесь P и $Ц_{II}$, а выше 727 °С – смесь A и $Ц$ (L_{II}). Называют эти чугуны *эвтектическими*. Белые чугуны с содержанием углерода от 2,14 до 4,3% ниже температуры 727 °С имеют структуру, представляющую смесь P , L_{II} и $Ц_{II}$, называются *доэвтектическими* чугунами. Белые чугуны с содержанием углерода от 4,3 до 6,67% ниже 727 °С имеют структуру, состоящую из смеси $Ц_I$ и L_{II} . Их называют *заэвтектическими* чугунами.

Таким образом, при температуре 727 °С происходит окончательный распад аустенита и превращение его в перлит.

Линия PQ показывает, что с понижением температуры растворимость углерода в феррите уменьшается от 0,02% при 727 °С до 0,006% при комнатной температуре, и из феррита выделяется углерод в виде третичного цементита $Ц_{III}$. В большинстве сплавов Fe – C третичный цементит структурно не выявляется. Линия MO (температура Кюри равна 768 °С) показывает, что при нагревании ферромагнитный феррит переходит в парамагнитный, а при охлаждении наоборот.

Для равновесных сплавов (т. е. отожженных образцов) системы Fe – C при $T < 727$ °С, включая комнатную, все структуры, охватываемые диаграммой Fe – C при содержании углерода от 0% (0% Fe₃C) до 6,67% (100% Fe₃C), состоят только из двух фаз – феррита и цементита, находящихся в них в разных количественных соотношениях.

3.5. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВОВ

3.5.1. Термическая обработка стали

Сущность и назначение термической обработки

Термической обработкой сплавов системы Fe – C называют совокупность операций нагрева и охлаждения сплавов с целью изменения фазового состава и размера зерен и получения заданных механических свойств.

Вызываемые при этом фазовые превращения протекают в сплавах, находящихся в твердом состоянии, по определенному режиму: нагрев до заданной температуры $T_{то}$, некоторая выдержка при этой температуре и охлаждение с заданной скоростью до комнатной температуры (рис. 3.19). Нагрев, выдержку и охлаждение производят за определенное время. Следовательно, основными факторами термической обработки являются температура и время.

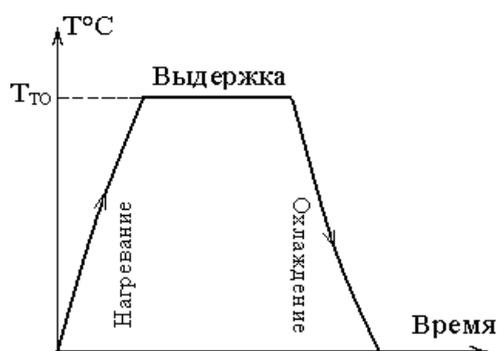


Рис. 3.19. Схема режима термической обработки

Термической обработке подвергают как стали, так и чугуны. При этом их химический состав не меняется, а изменяются лишь фазовый состав, структура и, как следствие этого, – свойства. Свойства могут изменяться в широком интервале; например, отожженная сталь 40 имеет твердость $HV = 150 \text{ кгс/мм}^2$, а закаленная – $HV = 600 \text{ кгс/мм}^2$.

Термическую обработку применяют как промежуточную операцию в цепи технологических процессов производства детали (изделия), так и в качестве завершающего этапа. Термической обработке, например, подвергают детали (заготовки), полученные литьем, ковкой и т. п., чтобы снизить их твердость и улучшить обрабатываемость на металлорежущих станках, а также уже готовые детали (изделия), чтобы повысить их твердость, прочность, упругость и долговечность работы.

Рассмотрим фазовые превращения в сталях при нагреве выше критических точек A_{c1} , A_{c3} и A_{cm} , а также при их охлаждении ниже этих критических точек. Так как критические точки при нагреве и охлаждении не совпадают, к их обозначению при нагреве добавляют букву «с», а при охлаждении – «г». Соответственно критические точки записывают: при нагреве A_{c1} , и A_{c2} , а при охлаждении $A_{г1}$, и $A_{г2}$.

Главная цель нагрева стали – получение аустенитной структуры.

Сталь в исходном состоянии (до нагревания) в зависимости от содержания углерода может иметь структуру феррито-перлитную (сталь доэвтектоидная) (рис. 3.20), перлитную (сталь эвтектоидная) или перлитно-цементитную (сталь заэвтектоидная). При нагреве стали и переходе температуры через критическую точку A_{c1} (температура 727 °С) (рис. 3.20, линия PSK) перлит начнет превращаться в аустенит и, следовательно, образуются структуры: у доэвтектоидной стали – феррито-аустенитная, у эвтектоидной – аустенитная и у заэвтектоидной – аустенитно-цементитная.

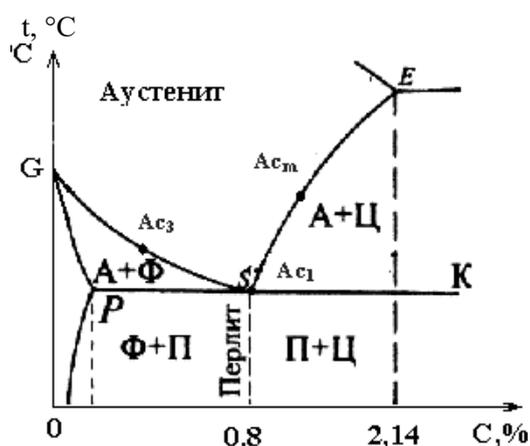


Рис. 3.20. Критические точки диаграммы

Температура превращения перлит – аустенит (П–А) является первой критической точкой (обозначают A_{c1}).

При дальнейшем повышении температуры у доэвтектоидной стали феррит постепенно превращается в аустенит, и при достижении температуры, соответствующей критической точке A_{c3} (рис. 3.20, линия GS), процесс перехода Φ в A полностью завершается. У заэвтектоидной стали при нагреве выше 727 °С цементит растворяется в аустените и при достижении температуры критической точки A_{cm} (рис. 3.20, линия SE) структура становится аустенитной.

Таким образом, при температурах, соответствующих критическим точкам A_{c3} и A_{cm} (линия GSE), все стали будут иметь структуру из одного аустенита. Однако образовавшийся аустенит будет неоднородным по составу в силу того, что процессы диффузии углерода не успевают завершиться. Поэтому для ускорения диффузионных процессов, выравнивающих в зернах аустенита содержание углерода и других элементов (например, легирующих), стали

нагревают выше линии GSE на 30...50 °С и при этой температуре делают выдержку, достаточную для выравнивания состава во всех зернах. При этом образуется структура мелкозернистого аустенита, независимо от размера зерен стали до термообработки. Нагрев до более высоких температур недопустим, так как приведет к увеличению размера зерен аустенита и в результате этого к ухудшению механических свойств стали.

Главная цепь охлаждения стали – превращение аустенита в желаемую структуру: перлит, сорбит, троостит или мартенсит.

«В феррите содержится около 0,02% С (точка *P*), в аустените до 2,14% (при $t = 1147$ °С, точка *E*) и до 0,8% С ($t = 727$ °С, точка *S*), в цементите – 6,67% С. При охлаждении стали происходит превращение γ -Fe в α -Fe, при этом появляется избыточный углерод. Однако для успешного завершения процесса выхода из раствора атомов углерода и формирования нормальных по составу и строению феррита и цементита необходима диффузия атомов углерода. Образование этих структур, в свою очередь, зависит от температуры нагрева, а главное – скорости (времени) охлаждения (табл. 3.2)» [10].

Таблица 3.2

**Изменение структуры и твердости углеродистой стали
эвтектоидного состава в зависимости от скорости охлаждения**

Скорость охлаждения, °С/с	Температура превращения, °С	Структура	Твердость НВ (средние значения), кгс/мм ²
1	700...650	Перлит	200
10	650...600	Сорбит	300
50	600...500	Троостит	400
150	300...200	Мартенсит	600

На практике требуемую скорость охлаждения получают путем выбора среды охлаждения. Охлаждают изделия в закрытой и открытой печах, на воздухе, в минеральном масле или в воде. Самая низкая скорость охлаждения – в закрытой печи, самая высокая – в воде (особенно если в ней растворена соль или щелочь). Следовательно, изменяя скорость охлаждения аустенита, можно получать стали (изделия) с различными свойствами – от самых мягких и пластичных до наиболее твердых и хрупких.

Для простоты рассмотрим превращения аустенита в эвтектоидной стали (содержание углерода 0,8%). При медленном охлаждении изделия (например, в печи) из этой стали при температурах, близких 700 °С, т. е. при незначительном переохлаждении ниже линии *PSK* (см. рис. 3.20), аустенит превращается в равновесную (устойчивую) структуру перлита, представляющего собой грубую крупнопластинчатую смесь Φ и Ц с твердостью НВ = 80...200 кгс/мм².

При ускоренном охлаждении, например на открытом воздухе, распад аустенита произойдет при более низких температурах (~650 °С), и образуется более мелкая, чем перлит, тонко пластинчатая смесь Φ и Ц , которую называют *сорбитом С* (по имени английского ученого Сорби). В отличие от перлита сорбит имеет более высокую твердость (НВ = 250...300 кгс/мм²), механическую прочность и упругость при достаточной вязкости.

«При дальнейшем ускорении охлаждения (например, в минеральном масле) распад аустенита происходит при еще более низких температурах (~550 °С) с образованием более мелкой, чем сорбит, высокодисперсной смеси Φ и \mathcal{C} , которую называют *трооститом Т* (по имени французского ученого Трооста). От сорбита троостит отличается более высокими твердостью ($HV = 350 \dots 400 \text{ кгс/мм}^2$), упругими свойствами и меньшей вязкостью» [7].

При достаточно большой скорости охлаждения (например, в воде) аустенит не успевает распасться на феррито-цементитную смесь и превращается в пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -Fe, называемый *мартенситом М* (по имени немецкого ученого Мартенса). Аустенит – это твердый раствор углерода в γ -Fe. Однако при охлаждении γ -Fe переходит в α -Fe, а при резком переохлаждении аустенита углерод не успевает выделиться из него в виде цементита \mathcal{C}_{II} и остается в α -Fe. При комнатной температуре α -Fe способно растворить 0,006% углерода. В случае же образования мартенсита у эвтектоидной стали в решетке α -Fe растворяется – 0,8% углерода, что приводит к сильной деформации кристаллической решетки и повышению тем самым плотности возникающих дислокаций. Структура M – неравновесная (неустойчивая). Мартенсит очень тверд ($HV = 600 \text{ кгс/мм}^2$), хрупок и является основной структурой закаленной стали. Различают температуру начала процесса превращения аустенита в мартенсит – M_H и окончания этого процесса – M_K . С увеличением содержания углерода в стали M_H и M_K снижаются (рис. 3.21).

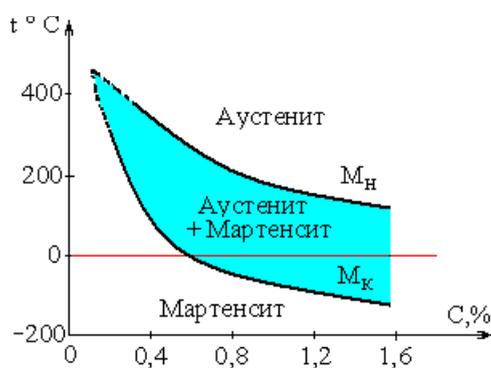


Рис. 3.21. Влияние содержания углерода на температуру начала M_H и конца M_K мартенситного превращения

Минимальная скорость охлаждения, которая обеспечивает превращения $A \rightarrow M$, называется критической скоростью закалки.

С целью уяснения характера влияния скорости охлаждения аустенита на строение и свойства получающихся при его распаде продуктов рассмотрим диаграмму его изотермических превращений, т. е. таких превращений, которые происходят при постоянных температурах, лежащих ниже точки A_{T1} .

Диаграмма изотермических превращений аустенита эвтектоидной стали (0,8% C) имеет простой вид (рис. 3.22). Диаграмма представлена двумя кривыми (их принято называть S-кривыми). Она составлена в координатах время – температура изотермической выдержки. Время откладывается в логарифмической шкале (для укорочения последней, так как отсчет ведется в секундах).

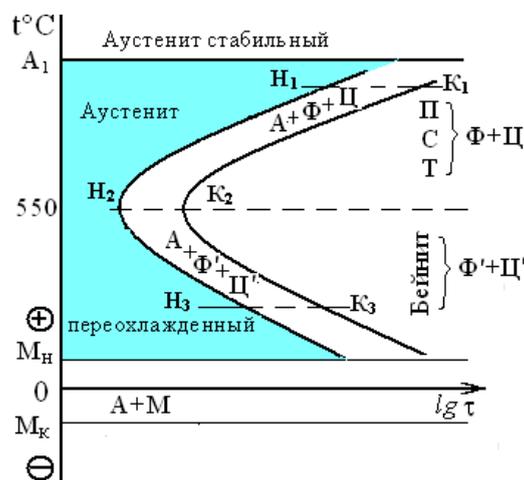


Рис. 3.22. Диаграмма изотермических превращений аустенита (0,8% С)

Собственно диаграмма заключена между двумя критическими изотермами, из которых изотерма A_1 соответствует равновесному превращению аустенит – перлит, а изотерма M_H – началу так называемого мартенситного превращения, о котором будет сказано позже.

Левая С-кривая является геометрическим местом точек начала превращения (распада) аустенита при соответствующих температурах его изотермической выдержки – Н. Время окончания превращения ограничивается правой С-кривой – К.

При построении С-кривых специальные образцы стали нагреваются до аустенитной структуры, а затем охлаждаются в ваннах с температурами в диапазоне $A_1 - M_H$.

Весь диапазон температур изотермических превращений можно разбить на две части, существенно отличающиеся друг от друга по составу и особенностям строения фаз, получающихся при распаде аустенита. Границей между этими частями является температура, соответствующая выступу на С-кривых (примерно $550\text{ }^\circ\text{C}$).

От скорости охлаждения зависит температурный интервал превращения аустенита, продолжительность превращения, а также характер и свойства получающегося продукта. Скорость охлаждения регулируется составом и свойствами охлаждающей среды, в качестве которой могут быть вода, минеральное масло, воздух, водные растворы солей и щелочей, специально создаваемые синтетические жидкости. Иногда используются расплавы солей.

Рассмотрим особенности превращения аустенита с 0,8% С при различных скоростях охлаждения: $v_1 < v_2 < v_3 < v_4$ (рис. 3.23). Поскольку С-кривые строятся в координатах время – температура, то с известными оговорками правомерно наложить на них кривые охлаждения.

При увеличении скорости охлаждения снижаются температуры распада аустенита на ферритно-цементитную смесь и уменьшается время распада. Это обуславливает снижение интенсивности происходящих при распаде диффузионных процессов и увеличение числа зарождающихся в зернах аустенита центров, вокруг которых растут зерна нового продукта $\Phi + \Psi$ (Π, C, T). При ускорении охлаждения образующиеся зерна продуктов должны уменьшаться, составляющие их пластинки феррита и цементита должны становиться короче и тоньше. Это должно приводить к повышению прочностных свойств продуктов распада.

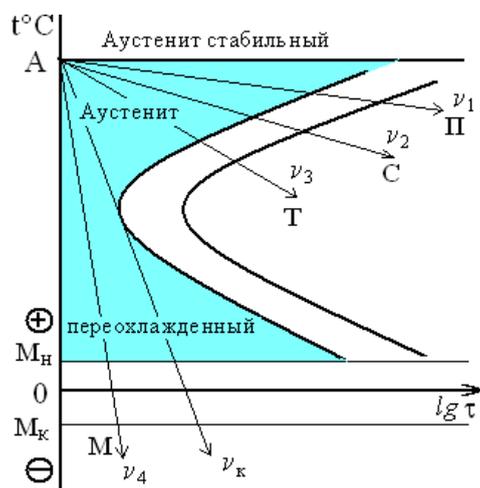


Рис. 3.23. Влияние скорости непрерывного охлаждения аустенита на характер образующихся продуктов ($v_1 < v_2 < v_3 < v_4$, 0,8% С)

«Распад аустенита в области температур ниже выступа происходит при явно недостаточной скорости диффузионных процессов. Это в данной области является доминирующим обстоятельством, предопределяющим характер формирования образующихся при распаде продуктов, называемых бейнитами в честь американского ученого Бейна, впервые исследовавшего изотермические превращения аустенита ($HV = 400 \text{ кгс/мм}^2$). Скорость работы механизма формирования новых фаз в этих условиях полностью зависит от интенсивности диффузии. При M_n диффузия прекращается полностью» [10].

Минимальная скорость охлаждения, которая обеспечивает превращения $A \rightarrow M$, называется критической скоростью закалки.

Основные виды термической обработки стали

Основными видами термической обработки углеродистых сталей являются отжиг, закалка и отпуск. С помощью этих операций получают изделия с различными механическими свойствами – от самых мягких и пластичных до наиболее твердых и хрупких.

Отжиг является предварительной операцией термической обработки. Его производят для снятия внутренних напряжений, устранения структурной неоднородности, снижения твердости стальных заготовок перед механической обработкой, а также при подготовке к последующей термической обработке. В результате отжига образуется равновесная (устойчивая) структура Fe – С сплавов.

Традиционно сложившееся понятие «отжиг» охватывает несколько отличающихся друг от друга по режиму операций термообработки, объединенных единой целью – привести сталь в термодинамически равновесное состояние с минимальной плотностью дислокации ($10^6 \dots 10^7 \text{ см}^{-2}$) и по возможности с низкой твердостью и высокой пластичностью.

Отжиг заключается в нагреве изделия (заготовки) до температуры на $30 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$ выше линии *GSK* (сталь эвтектоидную, до температуры аустенитного состояния, сталь

доэвтектоидную – до феррито-аустенитного и сталь заэвтектоидную – до аустенитно-цементитного состояния) (рис. 3.24) и выдержке при этой температуре для выравнивания состава и медленного охлаждения изделия вместе с печью.

Заэвтектоидную сталь при отжиге нельзя нагревать выше точки A_{cm} (линия SE), так как образующаяся при очень медленном охлаждении вокруг зерен перлита цементитная сетка затрудняет механическую обработку заготовки резанием и охрупчивает сталь. Умягчению стали при отжиге способствует очень малая плотность дислокаций. Различают отжиг первого и второго рода (рис. 3.25).

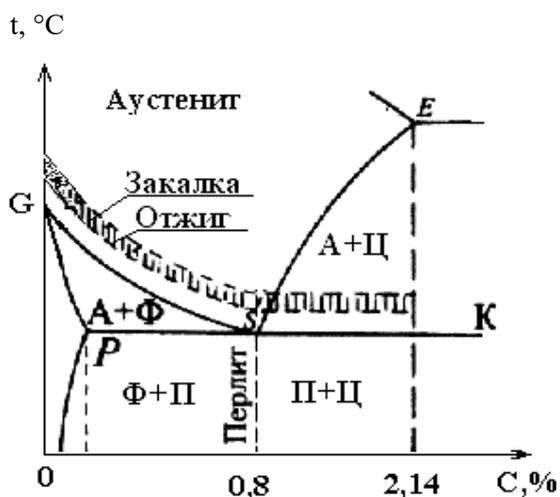


Рис. 3.24. Диапазон оптимальных температур при отжиге и закалке

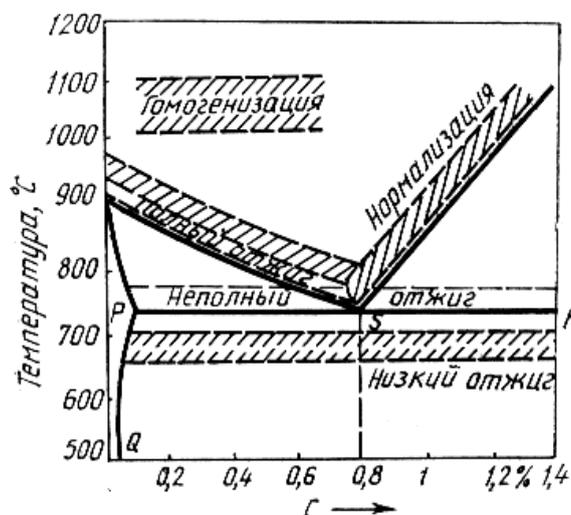


Рис. 3.25. Диапазон оптимальных температур нагрева при различных видах отжига [3]

Отжиг первого рода происходит без фазовых (полиморфных) превращений, а если они и имеют место, то не оказывают решающего влияния на конечную структуру сталей. Различают следующие разновидности отжига первого рода: гомогенизационный (диффузионный), рекристаллизационный и отжиг для снятия остаточных напряжений.

Диффузионный отжиг, или гомогенизация, является разновидностью отжига, применяемого с целью устранения в легированной стали (как и в других сплавах) дендритной ликвации. При диффузионном отжиге с целью интенсификации диффузионных процессов сталь нагревается до 1000...1100 °С и подвергается длительной выдержке (18...24 ч) а затем охлаждению.

Рекристаллизационный отжиг. Этот вид отжига производится с целью устранения наклепа холоднодеформированного металла. Напомним, что наклепанный металл очень тверд и хрупок, его кристаллическая решетка вследствие высокой плотности дислокаций и наличия большого числа других дефектов (вакансий, перемещенных в междоузлия атомов), а также из-за искажений и больших внутренних напряжений находится в неравновесном состоянии, обладая большим запасом избыточной свободной энергии. В сильно наклепанном металле из-за слияния дислокаций в местах их скопления наблюдаются опасные дефекты – зародыши трещин.

Рекристаллизационный отжиг углеродистой стали производится при температуре нагрева в пределах 600...700 °С. При этой температуре выдерживают 0,5...1,5 ч и охлаждают.

В рекристаллизованном металле плотность дислокаций составляет 10^7 см^{-2} , поэтому он имеет низкие прочностные характеристики и высокую пластичность.

Отжиг для снятия остаточных напряжений проводят при разных температурах в зависимости от обработки (после резания – при 570...600 °С, после сварки при 650...700 °С, после шлифования при 160...180 °С), продолжительность 2...3 ч [3].

Отжиг второго рода протекает с фазовыми (полиморфными) превращениями. К этому виду относятся отжики: изотермический, полный, неполный и нормализационный (нормализация).

Изотермический отжиг применяется для легированных сталей и заключается в нагреве изделия до температуры на 30...50 °С выше линии *GS*, прогреве до завершения фазового превращения, а затем перенос в другую печь с температурой 850 °С, выдержка в ней и медленное охлаждение. *Полный отжиг* применяется для перекристаллизации доэвтектоидной стали с целью измельчения зерна и снятия остаточных напряжений [3]. Отжиг заключается в нагреве изделия до температуры на 30...50 °С выше линии *GS*, прогрева до завершения фазового превращения и медленного охлаждения изделия вместе с печью.

Неполный отжиг заключается в нагреве изделия до температуры на 10...30 °С выше линии *GSK*, он позволяет получать зернистую структуру перлита вместо пластинчатой (сфероидизация).

Нормализация сталей заключается в нагреве в зависимости от содержания углерода до температуры $A_{c3} + (30...50 \text{ °C})$ или $A_{cm} + (30...50 \text{ °C})$, т. е. выше линии *GSE* на 30...50 °С, выдержке при этой температуре и затем охлаждении на спокойном воздухе. Из-за более быстрого охлаждения, чем при отжиге первого рода, происходит некоторое переохлаждение аустенита, в результате чего в низкоуглеродистых сталях образуется более дисперсная смесь феррита и перлита; в случае средне- и высокоуглеродистых сталей образуется тонкопластинчатая смесь феррита и цементита (структура сорбита), прочность и твердость при этом повышаются. Для многих изделий нормализация является окончательной операцией термообработки. Иногда изделия после нормализации подвергают отпуску, чтобы снять внутренние напряжения, образующиеся при ускоренном охлаждении.

Закалка придает стали такую структуру и, следовательно, свойства, которые обеспечивают изделию надежную и долговечную работу в заданных условиях эксплуатации. Это достигается путем создания у стали мартенситной структуры, при которой сталь становится более прочной, твердой, упругой и износостойкой. Свойства закаленной стали можно улучшить после соответствующего вида отпуска (см. далее). Закалка в сочетании с отпуском дает наилучший комплекс механических свойств.

Исторически сложившееся понятие «закалка» предполагает такую термообработку, при которой сталь приобретает неравновесную структуру, что прежде всего выражается в

повышении твердости стали. В связи с этим к закалке можно отнести термообработку на сорбит, тростит, бейнит и мартенсит. Степень неравновесности продуктов закалки с увеличением скорости охлаждения повышается и возрастает от сорбита к мартенситу.

Закалку на мартенсит принято считать *истинной закалкой*. Важнейшим преимуществом истинной закалки является возможность получения из мартенсита за счет последующего отпуска продуктов с такими ценными комплексами свойств, которые другими видами термообработки получить невозможно.

Режим истинной закалки включает нагрев до температуры на 30...50 °С выше линии *GSK* (см. рис. 3.24) и охлаждение со скоростью не ниже критической v_k (см. рис. 3.23).

Критическая скорость закалки имеет очень важное значение. От нее зависит такое технологическое свойство стали, как *прокаливаемость*, т. е. способность закаливаться на определенную глубину. Чем меньше величина v_k , тем на большую глубину от поверхности детали распространяется закалка (поскольку фактическая скорость охлаждения по мере увеличения расстояния от поверхности уменьшается и на каком-то удалении может оказаться меньше v_k). Критическая скорость закалки зависит от стабильности аустенита, которая, в свою очередь, определяется количеством растворенных в нем углерода и легирующих элементов.

Углеродистые стали закаливают в воде. Качество закалки зависит от скорости нагрева, температуры и времени выдержки и особенно от скорости охлаждения. При низких скоростях закалки образуются более мягкие, чем мартенсит, структуры – сорбит, троостит.

Следует различать два понятия, характеризующие важные свойства стали: «закаливаемость» и «прокаливаемость» стали. Под закаливаемостью стали понимают ее способность повышать твердость в результате закалки. Эта способность стали зависит от содержания в ней углерода (легирующие элементы влияют незначительно): чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость. Под прокаливаемостью понимают способность стали закаливаться на определенную глубину, т. е. образовывать на определенную глубину закаленный слой с мартенситной или троостомартенситной структурой. Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения, которая зависит от состава стали.

Отпуск стали является заключительной операцией термической обработки, выполняемой после закалки. Цель отпуска заключается в снижении или полном устранении внутренних напряжений, уменьшении хрупкости и повышении вязкости закаленной стали. При отпуске неравновесная структура мартенсита переходит в более равновесное состояние.

Отпуск закаленной стали достигается путем нагрева до заданной температуры, лежащей ниже критической точки A_{c1} (727 °С), выдерживания при этой температуре в течение времени, достаточного для завершения необходимых структурно-фазовых превращений, и охлаждения с любой скоростью. В зависимости от температуры выдержки отпуск подразделяют на низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск производят при 150...250 °С для снижения внутренних напряжений. При этих температурах из решетки мартенсита выделяется часть «лишнего» углерода и

частично уменьшается ее искажение, а структура отпущенной стали становится менее напряженной. Выделившийся углерод образует мельчайшие, но видимые в микроскоп частицы ε -карбида, состав и решетка которого отличаются от цементита (Fe_3C). Полученную структуру называют мартенситом отпуска. Низкому отпуску подвергают режущий инструмент и другие изделия, которые должны иметь высокую твердость и износостойкость.

Средний отпуск производят при 350...450 °С. При этих температурах заканчивается выделение углерода из мартенсита и полностью завершается его распад с образованием высокодисперсной смеси феррита и цементита, называемой трооститом отпуска. Превращение $M \rightarrow T$ сопровождается уменьшением твердости и повышением пластичности и вязкости. Среднему отпуску подвергают все пружины (в том числе локомотивов) после закалки.

Высокий отпуск производят при 500...680 °С. При этих температурах практически полностью устраняется искажение решетки α -Fe и снимаются закалочные напряжения; плотность дислокаций сводится к минимуму. В результате образуется более грубая, чем у троостита, смесь феррита и цементита, называемая сорбитом отпуска. Эта структура имеет меньшую, но вполне удовлетворительную твердость, прочность и упругость, но более высокие показатели пластичности и вязкости.

Процесс закалки на M и последующий отпуск на C называют улучшением стали. Этому процессу подвергают многие детали машин: шестерни, оси, валы и т. п.

При термической обработке стали изменяется также размер ее зерна. Отжиг зерно укрупняет, а закалка – измельчает: чем мельче зерно, тем тверже сталь.

«Кроме рассмотренных видов термической обработки, используются в технике еще и такие ее виды:

– как *термомеханическая* – сочетание теплового воздействия и пластической деформации;

– *химико-термическая* – сочетание теплового и химического воздействия, в результате которого насыщается поверхностный слой изделия каким-либо элементом-упрочнителем (углеродом – цементация, азотом – азотирование, азотом и цианистой солью – цианирование и т. п.), что приводит к повышению твердости и износостойкости поверхности при сохраняющейся вязкости сердцевины детали;

– *поверхностная закалка* – упрочнение поверхностного слоя изделия; изделие при сохранившейся вязкости сердцевины приобретает повышенную твердость поверхности» [7].

3.5.2. Поверхностное упрочнение металлов и сплавов

Химико-термическая обработка.

Общие закономерности

Химико-термической обработкой (ХТО) называют обработку, совмещающую термическое и химическое воздействие с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя детали в необходимом направлении. При этом происходит поверхностное насыщение металлического материала соответствующим элементом (С, N, В, Al, Cr, Si, Ti и др.) путем его диффузии в атомарном состоянии из внешней среды (твердой, газовой, паровой, жидкой) при высокой температуре.

Широкое применение ХТО в различных областях техники объясняется тем, что большинство деталей машин и механизмов работает в условиях износа, кавитации, циклических нагрузок, коррозии при криогенных или высоких температурах, при которых максимальные напряжения возникают в поверхностных слоях металла. ХТО металлов и сплавов как с целью их поверхностного упрочнения, так и для защиты от коррозии повышает надежность и долговечность деталей машин.

ХТО включает следующие основные взаимосвязанные стадии:

- 1) образование активных атомов в насыщающей среде и диффузию их к поверхности обрабатываемого металла;
- 2) адсорбцию образовавшихся активных атомов поверхностью насыщения;
- 3) диффузию – перемещение адсорбированных атомов внутри металла. Важнейший этап ХТО – диффузия.

Диффузионное насыщение сплавов углеродом и азотом

Диффузионное насыщение стали углеродом, азотом и совместное насыщение этими элементами – широко распространенные в промышленности процессы химико-термической обработки.

Цементация стали. Цементацией (науглероживанием) называется ХТО, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагревании в соответствующей среде – карбюризаторе. Как правило, цементацию проводят при температурах выше точки $A_{с3}$ (930...950 °С), когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в больших количествах.

Для цементации используют низкоуглеродистые (0,1...0,18% С), чаще легированные стали (15Х, 18ХГТ, 20ХНМ, 15ХГН2ТА и др.).

Цементованный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, убывающую от поверхности к сердцевине детали.

Твердость на поверхности цементованного слоя находится в пределах HRC ~58...62 и в сердцевине HRC ~30...45. При цементации чаще контролируют не общую, а эффективную толщину слоя. Эффективная толщина соответствует зоне слоя от поверхности насыщения до границы зоны с твердостью HRC ~50 или HV ~550. Толщина эффективного слоя составляет 0,4...1,8 мм.

Азотирование стали. Азотированием называется ХТО, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали азотом при нагревании в соответствующей среде. Азотированию подвергают гильзы цилиндров двигателей внутреннего сгорания, детали арматуры турбин и целый ряд других деталей, работающих на износ при повышенных температурах в агрессивных средах. Твердость азотированного слоя стали выше цементованного, и сохраняется при нагреве до высоких температур (450...500 °С), тогда как твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до 200...225 °С.

Азотирование чаще проводят при 500...600 °С (низкотемпературное азотирование). Стали ферритного и аустенитного классов и тугоплавкие металлы (Ti, Mo и др.) подвергают высокотемпературному азотированию (600...1200 °С).

Диффузионное насыщение сплавов металлами и неметаллами

Борирование – насыщение поверхности металлов и сплавов бором с целью повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости. Борированию подвергают стали перлитного, ферритного и аустенитного классов, тугоплавкие металлы и никелевые сплавы. При нагреве бориды устойчивы: FeB – до 800 °С, Fe₂B – до 1000 °С.

Силицирование. В результате диффузионного насыщения поверхности кремнием (силицирования) повышается коррозионная стойкость, жаростойкость, твердость и износостойкость металлов и сплавов. При силицировании железа и стали на поверхности образуется α -фаза (твердый раствор кремния в α -железе). Наибольший интерес представляет силицирование легированных сталей, так как Cr, Al и Ti, попадая в силицированный слой, повышают его окислительную стойкость.

Хромирование – насыщение поверхности изделий хромом. Диффузионному хромированию подвергают чугуны, стали различных классов, сплавы на основе никеля, молибдена, вольфрама, ниобия, кобальта и металлокерамические материалы. Этот процесс обеспечивает повышенную устойчивость стали против газовой коррозии (окислительная стойкость) до 800 °С. Хромирование сталей, содержащих свыше 0,3...0,4% С, повышает твердость и износостойкость. Твердость слоя, полученного при хромировании железа, достигает HV 250...300, а при хромировании стали HV 1200...1300.

Алитирование – процесс диффузионного насыщения поверхности изделий алюминием с целью повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости. При

алитировании железа и сталей наблюдается плавное падение концентрации алюминия по толщине слоя.

Поверхностная закалка стали

Назначение поверхностной закалки – повышение твердости, износостойкости и предела выносливости поверхности обрабатываемых изделий. При этом сердцевина остается вязкой и изделие воспринимает ударные нагрузки. Наибольшее распространение получил метод поверхностной закалки при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ). При нагреве ТВЧ используется явление индукции и поверхностного распределения индуцированного тока в детали. Деталь устанавливается в индуктор (соленоид), представляющий один или несколько витков пустотелой водоохлаждаемой медной трубки. При пропускании через индуктор переменного тока высокой частоты создается магнитное поле, вызывающее появление в обрабатываемом изделии индуцированного тока той же частоты, но обратного направления. Индуцированный ток вызывает разогрев изделия. Особенностью индуктивного тока является его неодинаковая плотность по сечению изделия.

В основном ток концентрируется в поверхностном слое изделия.

Толщина в метрах закаленного слоя может быть посчитана по формуле

$$y = 4,46 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}$$

где ρ – электросопротивление, Ом · м; μ – магнитная проницаемость, Гн/м; f – частота, Гц.

Чем меньше f (частота тока), тем больше глубина нагреваемого слоя. Если применять ток малой частоты (промышленный), то индуцированный ток будет течь по всему сечению детали и вызывать сквозной нагрев.

После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при 160...200 °С, нередко и самоотпуску. В этом случае при закалке охлаждение проводят не до конца, и в детали сохраняется некоторое количество теплоты, нагревающей закаленный слой до температур отпуска. «Для поверхностной индукционной закалки применяют стали, содержащие 0,4...0,5% С (40, 45, 40Х, 45Х, 40ХН и др.), которые после закалки имеют высокие твердость (HRC 50...60), сопротивляемость износу и не склонны к хрупкому разрушению» [12].

3.6. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

3.6.1. Конструкционные стали

Классификация углеродистых сталей

Железоуглеродистые сплавы – стали и чугуны – основа важнейших машиностроительных материалов.

Сталь – основной металлический материал, широко применяющийся для изготовления деталей, машин, летательных аппаратов, инструментов, строительных конструкций и т. д. Стали сочетают высокую жесткость с достаточной статической и циклической прочностью. Эти параметры можно менять в широком диапазоне за счет изменения концентрации углерода, легирующих элементов и технологий термической и химической обработки.

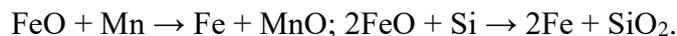
Приблизительно 85% у нас в стране изготавливается углеродистой стали и 15% – легированной.

Углеродистые стали – это стали, содержащие углерод в качестве основной добавки к железу. Свойства углеродистых сталей зависят прежде всего от содержания углерода. Однако в этих сталях содержится небольшое количество примесей. Большинство из них являются вредными, а некоторые – полезными.

Вредные примеси попадают в сталь из металлургического сырья, топлива, огнеупоров, атмосферы, а полезные примеси специально вводят в сталь для раскисления и улучшения свойств. *К вредным примесям* относится сера, фосфор, кислород, азот и водород:

- *сера* – сильно ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость стали;
- *фосфор* – сильно повышает хрупкость при низких температурах;
- *кислород, азот и водород* – повышают хрупкость стали, снижают пластичность.

Марганец и кремний вводят в сталь для раскисления, т. е. для освобождения от лишнего кислорода. Эти элементы образуют оксиды по реакциям раскисления:



MnO и SiO₂, обладая малыми растворимостями и плотностью, всплывают на поверхность жидкого металла и отделяются от стали вместе со шлаком.

Углеродистые стали классифицируются:

- по содержанию углерода;
- назначению;
- качеству.

По *содержанию углерода* стали подразделяются [2]:

- на низкоуглеродистые (менее 0,3% C);
- среднеуглеродистые (0,3...0,7% C);
- высокоуглеродистые (более 0,7% C).

Низкоуглеродистые стали – мягкие, пластичные, хорошо деформируемые в холодном и горячем состоянии. Среднеуглеродистые стали обладают хорошими прочностными

свойствами при небольшой пластичности и вязкости. Высокоуглеродистые стали имеют высокую твердость и очень низкую пластичность и вязкость.

По назначению стали классифицируют [2]:

- на конструкционные;
- инструментальные.

Конструкционные предназначены для изготовления деталей машин, механизмов, строительных сооружений. Инструментальные стали используются для изготовления различного рода инструментов (режущего, измерительного).

По качеству стали классифицируют [2]:

- на обыкновенного качества;
- качественные;
- высококачественные.

Основными показателями для разделения сталей по качеству являются нормы содержания вредных примесей (серы, фосфора).

Сера и фосфор попадают в сталь во время металлургического процесса и ухудшают ее качество.

Стали обыкновенного качества содержат до 0,06% S и 0,07% P.

Качественные – до 0,03% S и 0,035% P.

Высококачественные – не более 0,025% S и 0,025% P.

Стали обыкновенного качества бывают только углеродистыми, качественные и высококачественные – углеродистыми и легированными.

Стали обыкновенного качества получают в конвертерах или мартеновских печах, они подразделяются на три группы: А, Б и В.

Стали группы А поставляются с гарантированными механическими свойствами, без указания химического состава.

Стали группы Б поставляются с гарантированным химическим составом, без гарантии механических свойств.

Стали группы В поставляются с гарантированными механическими свойствами и химическим составом.

Углеродистые стали обыкновенного качества (всех трех групп) предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабо нагруженных деталей машин и приборов. Их используют при изготовлении железобетонных конструкций.

К недостаткам этих сталей относится малая прочность и низкая хладостойкость (их не следует использовать в районах Крайнего Севера и Сибири).

«Качественные углеродистые стали широко используются в машиностроении и приборостроении. Они имеют более низкое содержание вредных примесей и неметаллических включений, чем стали обыкновенного качества. Эти стали поставляются с гарантированными химическим составом и механическими свойствами. Их получают в мартеновских печах с соблюдением повышенных требований к составу шихты, технологическим режимам плавки и разливки» [16].

Стали высококачественные получают главным образом в электропечах или кислых мартеновских печах. Они используются там же, где и качественные стали. Чтобы их различать, в конце марки высококачественной стали ставится буква А. В таблице 3.3 для сравнения приведены основные механические свойства сталей разного качества.

Таблица 3.3

Механические свойства сталей

Марка стали	σ_b , МПа	δ , %	Тип стали
Ст3	380...490	27	Обыкновенного качества (группа А)
Ст40	580	19	Качественная сталь
40ХФА	900	10	Высококачественная сталь

3.6.2. Чугуны [2]

Чугуны – более дешевый материал, чем стали. Содержание углерода в них больше 2,14%. Они обладают пониженной температурой плавления и хорошими литейными свойствами. За счет этого из чугунов можно делать отливки значительно более сложной формы, чем из сталей.

Наиболее высокими литейными свойствами обладают сплавы, испытывающие эвтектическое превращение.

В зависимости от того, в какой форме присутствует углерод в сплавах, различают белые, серые, высокопрочные и ковкие чугуны. Высокопрочные чугуны являются разновидностью серых, но из-за повышенных механических свойств их выделяют в особую группу.

Белый чугун

«Такое название он получил по виду излома, который имеет матовобелый цвет. Весь углерод в этом чугуне находится в связанном состоянии в виде цементита. Белые чугуны в зависимости от содержания углерода могут быть доэвтектическими (перлит + ледебурит), эвтектическими (ледебурит) и заэвтектическими (первичный цементит + ледебурит). Эти чугуны имеют большую твердость (НВ 450...550) из-за присутствия в них большого количества цементита; как следствие этого, они очень хрупкие и для изготовления деталей машин не используются. Отливки из белого чугуна служат для получения деталей из ковкого чугуна с помощью графитизирующего отжига» [16].

Серый чугун

Такое название чугун получил по виду излома, который имеет серый цвет. В структуре серого чугуна имеется графит. Поскольку структура чугуна состоит из металлической

основы и графита (в форме пластин), то и свойства его будут зависеть от этих двух составляющих.

Графит по сравнению со сталью обладает низкими механическими свойствами, и поэтому в некотором приближении можно считать, что места, которые он занимает, – это пустоты и трещины. Количественное соотношение основы и пустот влияет на механические свойства чугуна, и с увеличением последних свойства резко ухудшаются. Чем более грубы включения графита, тем, следовательно, больше разобщена металлическая основа, что отрицательно сказывается на свойствах чугуна.

«По структуре металлической основы серые чугуны разделяют на три вида.

1. Серый перлитный со структурой перлит + графит (количество связанного углерода составляет ~0,8%.);

2. Серый ферритно-перлитный со структурой феррит + перлит + графит (количество связанного углерода < 0,8.);

3. Серый ферритный со структурой феррит + графит. (Весь углерод в виде графита)» [16].

Механические свойства серого чугуна зависят от свойств металлической основы и ее количества, формы и размеров графитных включений (пустот). Марка серого чугуна состоит из букв Сч (серый чугун) и цифры, показывающей значение временного сопротивления при растяжении в килограммах на квадратный миллиметр (кгс/мм²).

Графит способствует измельчению стружки при обработке резанием и оказывает смазывающее действие, что повышает износостойкость чугуна. Номенклатура отливок из серого чугуна и их масса разнообразны: от деталей в несколько граммов до 100 т и более.

Ферритные серые чугуны марки Сч10, Сч15 используются для слабо- и средненагруженных деталей: крышки, фланцы, маховики, суппорты, тормозные барабаны, диски сцепления и т. д.

Ферритно-перлитные серые чугуны марки Сч20, Сч25 применяются для деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках: картеры двигателя, поршни цилиндров, барабаны сцепления, станины станков и другие отливки разного назначения.

Перлитный чугун применяют для отливки станин мощных станков и механизмов.

Для деталей, работающих при повышенных температурах, применяют легированные серые чугуны, которые дополнительно содержат хром, никель, молибден и алюминий.

Высокопрочный чугун

Высокопрочными называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Их получают путем модифицирования магнием. Этот процесс сопровождается сильным возгоранием, поэтому чистый магний заменяют лигатурами (например, сплавом магния и никеля). После модифицирования чугун имеет следующий химический состав: 3...3,6% С;

1,8...2,9% Si; 0,4...0,7% Mn; 0,02...0,08% Mg; ~0,15% P; ~0,03% S. По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть ферритным, феррито-перлитным или перлитным. Ферритный чугун в основном состоит из феррита и шаровидного графита, а также содержит до 20% перлита. Перлитный чугун в основе состоит из сорбитообразного или пластинчатого перлита, шаровидного графита и до 20% феррита.

Из сказанного выше ясно, что шаровидный графит является менее сильным концентратором напряжений, чем пластинчатый графит и, следовательно, менее активно влияет на механические свойства металлической основы. Чугуны с шаровидным графитом имеют более высокую прочность и при этом некоторую пластичность.

Маркируются высокопрочные чугуны по пределу прочности и относительному удлинению, например Вч45-5, где 45 кгс/мм² – предел прочности, а ~5% – относительное удлинение.

Из высокопрочных чугунов изготавливают оборудование прокатных станков (прокатные валки до 12 т), кузнечно-прессовое оборудование, корпуса паровых турбин, коленчатые валы и другие детали, работающие при циклических нагрузках и в условиях сильного износа.

Иногда для улучшения механических свойств применяют термическую обработку отливок; закалку и отпуск при 500...600 °С, для увеличения пластичности – отжиг, способствующий сфероидизации перлита.

Ковкий чугун

«Ковкими называют чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают в результате специального графитизирующего отжига (томление) доэвтектического белого чугуна. Графит в таких чугунах называют углеродом отжига. Ковкий чугун по сравнению с серым обладает более высокой прочностью, что связано с меньшим влиянием хлопьевидной формы графита на механические свойства металлической основы» [10].

При производстве ковкого чугуна очень важно, чтобы отливки белого чугуна, подвергаемые отжигу, были тонкостенными. В противном случае в сердцевине при кристаллизации будет выделяться пластинчатый графит, и чугун станет непригодным для отжига.

По структуре металлической основы ковкие чугуны бывают ферритными и перлитными.

3.6.3. Сплавы на основе меди [6]

В случаях, когда необходимы повышенные механические свойства и нет жестких требований по электропроводности, вместо меди в качестве проводникового материала

используют ее сплавы – бронзы и латуни. Эти сплавы состоят из одной или нескольких фаз, представляющих твердые растворы

Бронзы – это сплавы меди с небольшим содержанием одного или нескольких химических элементов (Sn, Si, P, Be, Cr, Mg, Cu и др.), которые дают название бронзам. Маркируют бронзы буквами Бр, после которых идут буквы, указывающие легирующие элементы, и цифры, показывающие количество этих элементов в целых процентах. Например, бронза марки БрБ2 – бериллиевая бронза (содержит Be ~2%, остальное Cu), марки БрОЦС6-6-3 – оловянно-цинково-свинцовая бронза (содержит Sn 6%, Zn 6%, Pb 3%, остальное медь). Атомы примеси (в том числе легирующей), внедряясь в кристаллическую решетку, увеличивают ее деформацию и концентрацию дефектов. Кроме того, атомы примеси взаимодействуют с дислокациями и затрудняют их подвижность, упрочняя медь. Поэтому удельное сопротивление бронз больше [$\rho = (1,8...2,8) \cdot 10^{-8}$ Ом · м], чем у чистой меди, зато выше предел прочности на разрыв ($\sigma_b = 250...1100$ МПа) и твердость (НВ = 20...260 МПа), меньше относительное удлинение перед разрывом ($\delta = 2...65\%$). Бронзы лучше обрабатываются на металлорежущих станках и обладают более высокими литейными свойствами, чем медь. У кадмиевой бронзы при сравнительно небольшом снижении удельной электропроводности существенно повышены механическая прочность, твердость и стойкость к истиранию. Кадмиевую бронзу применяют в качестве контактного провода для электрифицированного транспорта и коллекторных пластин в электрических машинах. Еще большей механической прочностью обладает бериллиевая бронза. Бронзы широко применяют для изготовления токопроводящих пружинящих контактов и других деталей коммутирующих узлов, выключателей и электрических машин. Некоторые виды бронз упрочняют термообработкой. У твердотянутых бронз механическая прочность σ_b и удельное сопротивление ρ выше, чем у отожженных бронз.

Латуни – это сплавы системы Cu – Zn с максимальным содержанием Zn 45%. При повышении концентрации Zn до 45% увеличивается механическая прочность σ_b . Максимальная пластичность наблюдается при содержании Zn около 37%. В некоторые марки латуней для улучшения того или иного свойства вводят в небольшом количестве один или несколько химических элементов (Sn, Pb, Fe, Mn, Ni или Al). Маркируют латуни буквой Л и цифрой, указывающей процентное содержание меди (например, латунь марки Л63 содержит меди 63%, остальное цинк). У сложных латуней в маркировке указывается легирующий элемент (например, латунь марки ЛС59-1 – это свинцовая латунь, содержащая Cu 59%, свинца 1%, остальное цинк). Главная отличительная особенность латуни от чистой меди – повышенная механическая прочность σ_b при достаточно высоком удлинении перед разрывом δ . Латуни лучше, чем бронзы, обрабатываются штамповкой, глубокой вытяжкой и т. п. Они широко используются для изготовления токопроводящих винтов, гаек, шайб, шпилек, штырей, гнезд, упругих элементов и для коммутирующих узлов и штепсельных разъемов.

3.6.4. Алюминий и его сплавы [6]

Алюминий Al – это серебристо-белый металл, легкий и легкоплавкий, с высокой электро- и теплопроводностью и пластичностью.

Алюминий – самый распространенный в природе металл. Его массовая доля в земной коре составляет ~ 8,8%.

Маркировка алюминия начинается с буквы А, затем идет цифра, указывающая содержание алюминия в сотых долях процента (например, алюминий марки А97 содержит алюминия 99,97%, остальное – контролируемая примесь). Алюминий различают трех классов: 1) особо чистый – марка А999 (Al не менее 99,999%); 2) химически чистый – марки А995, А99, А97, А95, содержащие Al не менее 99,995; 99,99; 99,97; 99,95% соответственно; 3) технически чистый – марки А85, А8, А7, А6, А5, АО, А, АЕ, содержащие Al не менее 99,85; 99,80; 99,70; 99,60; 99,50; 99,00; 99,00; 99,5% соответственно. Чем выше требуется чистота алюминия, тем сложнее технология его очистки и контроля и тем он дороже.

В электротехнике применяют алюминий марок А7Е, А6Е, А5Е, АЕ, где буква Е указывает на его электротехническое назначение, а примеси должны находиться в определенном соотношении и не превышать 0,5%, при этом Си должно быть не более 0,015%, Mn – не более 0,01% и Mg – не более 0,02%. Алюминий марки А97 применяют для изготовления фольги, электродов и корпусов электролитических конденсаторов и других изделий.

Сплавы алюминия

Сплавы алюминия обладают более высокими значениями механической прочности σ_b , твердости НВ, износостойкости, нагревостойкости и удельного электросопротивления ρ , но меньшим значением относительного удлинения перед разрывом δ , чем чистый алюминий.

Алюминиевые сплавы можно условно разделить на конструкционные и электротехнические. *Конструкционные сплавы* – на литейные сплавы и сплавы, деформируемые обработкой (деформируемые сплавы).

Литейные сплавы алюминия маркируют двумя буквами АЛ и цифрой, обозначающей порядковый номер сплава. Наиболее известные сплавы алюминия с кремнием (и небольшими добавками Mg и Mn), называются *силуминами* (например, АЛ2, АЛ4, АЛ9). Для получения мелкозернистой структуры и улучшения механических свойств в силумины добавляют 0,05...0,08% натрия. Такие сплавы называют *модифицированными*. К литейным алюминиевым сплавам относят сплавы следующих систем: Al – Si – Cu (например, АЛ3, АЛ5, АЛ6), Al – Cu (например, АЛ7, АЛ19, АЛ21), Al – Mg (например, АЛ8, АЛ27, АЛ13). Эти сплавы обладают хорошими литейными свойствами, свариваемостью и удовлетворительными механическими свойствами.

Деформируемые сплавы алюминия подразделяют на сплавы, не упрочняемые термической обработкой, и сплавы, упрочняемые термической обработкой. Сплавы, не упрочняемые термической обработкой, имеют высокую пластичность, поэтому из них получают изделия холодной штамповкой. Однако у них невысокая механическая прочность. К ним относятся сплавы алюминия с Mg и Mn в суммарном количестве до 6%, например сплавы АМц, АМг2, АМг5, а также сплавы с небольшими добавками Mg и Si – сплавы АД31. Алюминиевые сплавы АД31 (Mg 0,6% и Si 0,5%), подвергнутые закалке и естественному старению, наряду с алюминием марки А5Е используют для изготовления электропроводящих шин.

К алюминиевым деформируемым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы, известные как дюралюмины и авиаль.

Дюралюмины – это сплавы системы Al – Cu – Mn; Mn введен для повышения коррозионной стойкости сплавов. Наиболее известны сплавы Д1, Д16, Д18. Они хорошо деформируются в горячем и холодном состоянии. Для их упрочнения применяют закалку в воде и естественное старение (около 5 сут). Сплав Д16 используют в строительных конструкциях средней и повышенной прочности, для обшивки и изготовления некоторых элементов самолетов, для кузовов грузовых автомобилей и т. д.

Сплавы авиаль (АВ) менее прочны, чем дюралюмины, зато обладают большей пластичностью как в горячем, так и в холодном состоянии, хорошо свариваются и сопротивляются коррозии. Сплавы авиаль используют в легких конструкциях, где требуется их деформация при монтаже. Наиболее прочным алюминиевым деформируемым сплавом является сплав В95, содержащий добавку Zn. Однако он менее коррозионностоек, чем дюралюминий, и непригоден для работы при температуре выше 150 °С, так как ухудшается его механическая прочность.

Жаропрочные алюминиевые сплавы могут быть как литейными (например, АЛ21), так и деформируемыми (например, АК4). Эти сплавы используют для изготовления деталей, работающих при температурах 250...350 °С. Повышенная жаропрочность достигается высоким содержанием Cu, а также Mn, Mg и Ti.

Электротехнические сплавы алюминия. В соответствии с ГОСТ 14838–78 для изготовления холоднотянутой электротехнической проволоки используют алюминий марки АД1 и алюминиевые деформируемые сплавы марок АМц, АМг2, АМг5П, Д1П, Д16П, Д18 и В65, где А обозначает алюминий, Д – деформируемый сплав, Мц – марганец, Мг – магний, П – сплав холодной высадки (разновидность пластической деформации), В – высокопрочный деформируемый сплав, цифра – концентрацию легирующего химического элемента. Эти сплавы содержат алюминия не менее 99,30%, а Fe, Si, Mn и Mg в количестве 0,2...0,7, 0,25...0,6, 0,2...1,0 и 0,2...4,8% соответственно.

Химические элементы, образующие с алюминием твердые растворы, увеличивают механическую прочность, но снижают удельную электропроводность. Наиболее сильно снижают удельную электропроводность Cr, Li, Mg, Nb, Ti, V, Mn, поэтому их количество в электротехнических алюминиевых сплавах должно быть ограниченным. Железо также

повышает механическую прочность сплавов, но при этом мало влияет на их удельную электропроводность, так как не входит в твердый раствор, а присутствует в алюминии в виде дисперсных частиц.

Все электротехнические сплавы алюминия содержат железо Fe и отличаются друг от друга различным его содержанием. Остальные элементы в этих сплавах представлены на более низком уровне.

«Магний, растворяясь в кристаллической решетке алюминия, сильно ее деформирует и тем самым увеличивает удельное сопротивление. При большем содержании Si, чем Mg, образуется и выделяется из твердого раствора химическое соединение Mg_2Si . В результате кристаллическая решетка алюминия деформируется меньше. Следовательно, электропроводность снижается, но повышается нагревостойкость сплавов. Поэтому эти сплавы имеют повышенные значения механической прочности, электропроводности и нагревостойкости по сравнению со сплавами, содержащими Mg больше, чем Si. Введение малых добавок Ti, V или Ni повышает коррозионную стойкость алюминия и его сплавов с Mg» [7].

Из электротехнических сплавов системы Al – Mg – Si с добавкой Fe наиболее известен сплав *альдрей*, обладающий высокими механическими свойствами при небольшом удельном сопротивлении; его плотность $d = 2,7 \text{ Мг/м}^3$, $TK_{\ell} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\rho = 3,22 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $EKp = 0,0036 \text{ К}^{-1}$. На-

гревостойкость альдрея – начало рекристаллизации и снижения механической прочности, равна 180...200 °С. Высокие механические свойства альдрея приобретает в результате специальной обработки по схеме: деформация волочением → закалка в воде при температуре 510...550 °С → повторная деформация волочением → старение при температуре 140...150 °С. Выделяющееся при этой обработке из твердого раствора химическое соединение Mg_2Si в мелкодисперсном состоянии обеспечивает ему высокие механическую прочность и нагревостойкость. По механическим свойствам альдрей приближается к твердой меди (МТ), по плотности и удельной электропроводности – к твердому алюминию (АТ). Известно, что контактный провод из сплава типа альдрея при рабочем токе 60 А, скорости движения 70 км/ч с медноугольным токосъемником имеет износостойкость большую, чем у медного провода.

Из системы Al – Mg – Si с добавкой Fe известны и другие сплавы (например, сплав, содержащий Fe до 1% и минимальную концентрацию Si, имеет удельную электропроводность, составляющую 61% от электропроводности меди, и механическую прочность у отожженных образцов 100...165 МПа. Известны также сплавы системы Al – Mg – Si с малыми добавками B, Zn, Zr, Be, Ag и других химических элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 304 с.
2. Материаловедение и технология металлов / под ред. Г.П. Фетисова. М.: Высш. школа, 2002. 638 с.
3. Материаловедение и конструкционные материалы / под ред. В.А. Белого. Минск: Высшая школа, 1989. 461 с.
3. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. СПб.: Лань, 2003. 368 с.
4. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: учебник для вузов / под общ. ред. В.П. Ларионова. М.: Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
5. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для вузов / С.Н. Колесов. М.: Высшая школа, 2004. 519 с.
6. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей высших учебных заведений / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Высш. шк., 2008. 534, [1] с.: ил., табл.; 21 см. (Энергетика, энергетическое машиностроение: для высших учебных заведений).
7. Корицкий Ю.В. Электротехнические материалы: учебник для техникумов / Ю.В. Корицкий. М.: Энергия, 1976. – 320 с.
8. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства [Текст]: монография / А.М. Капитонов, В.Е. Редькин; М-во образования и науки Российской Федерации, Сибирский федеральный ун-т, [Ин-т инженерной физики и радиоэлектроники]. Красноярск: СФУ, 2013. 531 с.: ил., табл.; 21 см.
9. Материаловедение [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 140402 «Теплофизика» направления подготовки 140400 «Техническая физика» / О.В. Андреев, А.А. Вакулин, К.В. Киселева; Российская Федерация, Министерство образования и науки, ФГБОУ ВПО Тюменский государственный университет [и др.]. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2013. 630 с.: ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-400-00837-5
10. Поведение материалов в электрическом поле [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150100 Материаловедение и технологии материалов / А.П. Королев, Д.М. Мордасов; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Тамбовский гос. технический ун-т». Тамбов: ТГТУ, 2012. 78, [1] с.: ил., табл.; 20 см.
11. Материаловедение: учебное пособие по общеобразовательной дисциплине «Материаловедение» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по

направлениям и специальностям подготовки дипломированных специалистов / М.М. Серов, В.А. Васильев; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «МАТИ» Российский гос. технологический ун-т им. К.Э. Циолковского. Москва: МАТИ, 2006. 424, [1] с.: ил., табл.; 21 см.

12. Материаловедение: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки и специальностям в области техники и технологии / [Б. Н. Арзамасов и др.]. Изд. 8-е, стер. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 646, [1] с., [4] л. цв. ил.: ил., табл.; 25 см.

13. Оперативная диагностика механических свойств конструкционных материалов: пособие для научных и инженерно-технических работников / В.М. Матюнин. Москва: Изд. дом МЭИ, 2006 (М.: Московская типография N 6). 213, [1] с.: ил., табл.; 21 см.

14. Материалы и технологии в машиноведении [Текст]: учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей: [учебно-методическое пособие] / М.П. Лебедев; М-во образования и науки РФ, Северо-Восточный Федеральный ун-т им. М.К. Аммосова, Автодорожный фак., Каф. машиноведения. Москва: Academia, 2011. 255 с.: ил., табл.; 20 см.

15. Конструкционные материалы: состав, свойства, применение [Текст]: учебное пособие / [Гаркушин И.К., Лаврентьева О.В., Истомова М.А., Калмыкова О.Ю.]; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования «Самарский гос. технический ун-т», Каф. общей и неорганической химии. Самара: Самарский гос. технический ун-т, 2015. 238 с.: ил., табл.; 21 см.

16. Техника высоких напряжений и электротехнические материалы: в устройствах железнодорожного транспорта: учебник / Халилов Ф.Х., Егоров В.В., Смирнов А.А. Санкт-Петербург: Талекс, 2007. 539 с.: ил., табл.; 22 см.; ISBN 5-91258-029-6

17. Новые конструкционные материалы / В.В. Максаров, В.А. Красный, А.Д. Халимоненко. Санкт-Петербург: ЛЕМА, 2020. 160 с.: ил., табл.; 21 см.

18. Инновации технических решений в машиностроении и транспорте: VII Всероссийская научно-техническая конференция для молодых ученых и студентов с международным участием, 16-17 марта 2021: сборник статей / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», Политехнический институт, Факультет машиностроения и транспорта, Межотраслевой научно-информационный центр ПГАУ; [под общей редакцией В.В. Салмина]. Пенза: ПГАУ, 2021. 273 с.: ил., табл.

19. Современные технологические процессы порошковой металлургии: учебное пособие / Р.В. Егорова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет». Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. 46 с.: ил.

20. Все материалы: энциклопедический справочник 2021. 2021. № 1. 2021. 48 с.: ил., табл.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	5
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ	5
1.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА	6
1.2.1. Строение атома	6
1.2.2. Химическая связь	7
2. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	10
2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	10
2.2. ДИЭЛЕКТРИКИ	13
2.2.1. Общие сведения о диэлектриках	13
2.2.2. Поляризация диэлектриков	13
2.2.3. Электропроводность диэлектриков	26
2.2.4. Диэлектрические потери	33
2.2.5. Пробой диэлектриков	42
2.2.6. Физико-химические и механические свойства диэлектриков	54
2.2.7. Диэлектрические материалы	59
2.3. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	68
2.3.1. Классификация проводников	68
2.3.2. Основные свойства проводниковых материалов	70
2.3.3. Материалы высокой проводимости ($\rho < 5 \cdot 10^{-8}$ Ом · м)	75
2.3.4. Некоторые металлы, используемые в энергетике	78
2.3.5. Сплавы высокого сопротивления	79
2.3.6. Припой	80
2.3.7. Сверхпроводники и криопроводники	81
2.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	84
2.4.1. Общие сведения и классификация полупроводников	84
2.4.2. Собственные и примесные полупроводники	86
2.4.3. Воздействие внешних факторов на электропроводность полупроводников	89
2.4.4. Простые полупроводники	93
2.4.5. Полупроводниковые химические соединения (бинарные соединения)	95
2.4.6. Полупроводниковые материалы сложного состава (полупроводниковые комплексы)	97
2.5. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	100
2.5.1. Основные свойства магнитных материалов	100
2.5.2. Магнитомягкие материалы	106
2.5.3. Магнитотвердые материалы	111
2.5.4. Аморфные магнитомягкие сплавы	115

3. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	117
3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	117
3.2. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ	117
3.2.1. Основные типы кристаллических решеток	117
3.2.2. Дефекты кристаллической решетки	119
3.2.3. Влияние дефектов строения металлов на их прочность [7]	121
3.3. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ	123
3.3.1. Основные свойства материалов	123
3.3.2. Механические свойства, определяемые при статическом нагружении	123
3.4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ	129
3.4.1. Понятие о сплавах [2]	129
3.4.2. Виды двойных сплавов	130
3.4.3. Диаграммы состояния двойных сплавов	132
3.4.4. Строение и свойства железоуглеродистых сплавов	134
3.5. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВОВ	141
3.5.1. Термическая обработка стали	141
3.5.2. Поверхностное упрочнение металлов и сплавов	151
3.6. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ	154
3.6.1. Конструкционные стали	154
3.6.2. Чугуны [2]	156
3.6.3. Сплавы на основе меди [6]	158
3.6.4. Алюминий и его сплавы [6]	160
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	163

Учебное издание

*Николаев М.Ю., Мальгин Г.В.,
Щекочихин А.В., Шкаруба М.В.*

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

ISBN 978-5-00047-657-4



Редактор: Е.В.Вилявина
Технический редактор: Д.В. Вилявин
Обложка: Д.В. Вилявин

Дата выхода: 17.05.2022
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. листов 8,08
Электронное издание. Объем 2,39 МБ. Заказ 2238

Издательство НВГУ
628615, Тюменская область, г. Нижневартовск, ул. Маршала Жукова, 4
Тел./факс: (3466) 24-50-51, E-mail: izdatelstvo@nggu.ru