

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебно-методический комплекс

УДК 621.3(075)
ББК 31.23я7
Э 45

Рекомендовано научно-методическим советом агроэнергетического факультета БГАТУ

Протокол № 2 от 22 октября 2007 г.

Составители: ст. преподаватель *Ю.Н. Селюк*;
ассистент *И.В. Довнар*

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. *И.В. Протосовицкий*;
вед. инженер-энергетик ИП «Завод теплообменного
оборудования» *Г.Ю. Ворона*

Электротехнические и конструкционные материалы :
Э 45 учеб.-метод. комплекс / сост. Ю.Н. Селюк, И.В. Довнар. –
Минск : БГАТУ, 2008. – 244 с.
ISBN 978-985-519-023-4

УДК 621.3(075)
ББК 31.23я7

**Минск
2008**

ISBN 978-985-519-023-4

© БГАТУ, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1	
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	4
МОДУЛЬ 0	
Общие сведения о строении вещества	4
МОДУЛЬ 1	
Твердые электроизоляционные материалы.	10
МОДУЛЬ 2	
Жидкие, газообразные и твердеющие электроизоляционные материалы.	42
МОДУЛЬ 3	
Проводниковые материалы.	72
МОДУЛЬ 4	
Полупроводниковые материалы.	94
МОДУЛЬ 5	
Магнитные материалы.	113
МОДУЛЬ-РЕЗЮМЕ	
Совершенствование электротехнических материалов.	133
РАЗДЕЛ 2	
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	137
МОДУЛЬ 1	
Строение и свойства металлов и сплавов.	137
МОДУЛЬ 2	
Обработка металлов и сплавов.	171
МОДУЛЬ 3	
Неметаллические конструкционные материалы и их обработка	214
МОДУЛЬ-РЕЗЮМЕ	
Совершенствование конструкционных материалов.	239
ЛИТЕРАТУРА	243

РАЗДЕЛ 1 ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

МОДУЛЬ 0 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА

В результате изучения модуля студент должен знать:

- цели, задачи, структуру дисциплины;
- место дисциплины в системе научных знаний;
- требования к организации учебного процесса;
- требования к результатам обучения;
- общие сведения о строении вещества;
- классификацию веществ по электрическим и магнитным свойствам.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Общая характеристика дисциплины и ее роль в учебном процессе

Достижения современной науки и техники трудно представить без фундаментальных исследований в материаловедении. Роль и значение электротехнических и конструкционных материалов возрастает по мере развития научно-технического процесса. Современные отрасли науки и техники не могли бы получить столь значительное развитие без использования высококачественных электротехнических материалов.

Необходимость работы в условиях агрессивных сред, повышенной влажности, высоких температур, высоких электрических нагрузок и перегрузок предъявляют все более высокие требования к материалам. При этом в ряде случаев необходимо использование новых материалов с особыми свойствами. Применение их позволяет существенно улучшить качественные показатели и эксплуатационную надежность оборудования. Выбор материалов для конкретного применения является сложной задачей, успешное решение которой в значительной степени зависит от глубины знаний разнообразных свойств электротехнических и конструкционных материалов. Для этого необходимо разбираться в требованиях, предъявляемых к конкретным материалам, глубоко изучить явления, происходящие в материалах при воздействии на них электромагнитного поля, знать количественные параметры, характеризующие свойства материалов и уметь их рационально использовать.

Содержание дисциплины «Электротехнические и конструкционные материалы»

Курс дисциплины рассчитан на два семестра: часть 1 (электротехнические материалы); часть 2 (конструкционные материалы). Для поэтапного изучения вопросов рабочей программы и контроля над этим процессом материал каждого семестра делится на определенные части – модули. Каждый модуль охватывает материал темы программы и нескольких близких тем.

Примерное распределение аудиторных часов по видам занятий

№ и название модуля	общее кол-во по модулю	в том числе			
		лекции	лаб. работы	практ. работы	УСРС
Раздел 1 Электротехнические материалы	68	34	18	16	–
М-0 Общие сведения о строении вещества	2	2	–	–	–
М-1 Твердые электроизоляционные материалы	16	4	4	4	4
М-2 Жидкие, газообразные и твердеющие электроизоляционные материалы	12	4	2	2	4
М-3 Проводниковые материалы	16	4	4	4	4
М-4 Полупроводниковые материалы	10	2	4	2	2
М-5 Магнитные материалы	10	2	4	2	2
М-Р Совершенствование электротехнических материалов	2	–	–	2	–
Раздел 2 Конструкционные материалы	51	24	12	15	–
М-1 Строение и свойства металлов и сплавов	16	8	4	4	–
М-2 Обработка металлов и сплавов	16	8	4	4	–
М-3 Неметаллические конструкционные материалы и их обработка	16	8	4	4	–
М-Р Совершенствование конструкционных материалов	3	–	–	3	–
ИТОГО:	119	58	30	31	16

В результате изучения дисциплины «Электротехнические и конструкционные материалы» студент должен:

- **знать** основы электроматериаловедения и технологии конструкционных материалов в предлагаемом объеме, которые являются базой для дальнейшего образования инженера;
- **уметь** использовать знания в области материаловедения при решении конкретных задач;
- **формулировать** с точки зрения свойств материалов и способов их обработки конкретные инженерные задачи и находить алгоритмы их решения; самостоятельно изучать техническую литературу с целью повышения квалификации.

Общие сведения о строении вещества

Строение вещества. Виды химической связи

Основными элементарными частицами, из которых строятся все известные нам вещества, являются **протоны, нейтроны и электроны**.

Из протонов и нейтронов состоит атомное ядро, электроны заполняют оболочки атома, компенсируя положительный заряд ядра. Строение ядра атома, периодичность заполнения оболочек электронами можно находить с помощью таблицы Д.И. Менделеева.

Газы, жидкие и твердые тела состоят из атомов, молекул или ионов. Размеры атомов около 0,1 нм, размеры положительных ионов, получившихся из атомов, лишившихся части электронов, меньше, чем размеры атомов, а размеры отрицательных ионов, присоединивших дополнительные электроны, больше, чем размеры соответствующих атомов. Ионами могут быть и группы атомов, потерявших или присоединивших электроны.

Молекулы газов содержат различное число атомов. В зависимости от строения внешних электронных оболочек атомов могут образовываться различные виды связи.

Ковалентная связь возникает при обобществлении электронов двумя соседними атомами (рисунок 1.1).

Молекулы, в которых центры одинаковых по величине положительных и отрицательных зарядов совпадают, являются **неполярными**. Если же в отдельных молекулах центры противоположных по знаку зарядов не совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга, то такие молекулы называются **полярными** или **дипольными**.

Полярная молекула характеризуется дипольным моментом, который определяется произведением заряда и расстояния между центрами положительного и отрицательного зарядов.

Ионная связь – определяется силами притяжения между положительными и отрицательными ионами (рисунок 1.2). Твердые тела ионной структуры характеризуются повышенной химической прочностью и относительно высокой температурой плавления.

Металлическая связь – приводит к образованию твердых кристаллических тел. Металлы можно рассматривать как системы, построенные из расположенных в узлах решетки положительно заряженных ионов, находящихся в среде свободных электронов (рисунок 1.3). Притяжение между положительными атомными остовами и электронами является причиной монолитности металла. Наличием свободных электронов объясняется высокая электропроводность и теплопроводность металла.

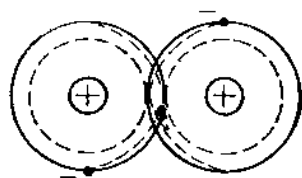


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение двухатомной молекулы с ковалентной связью

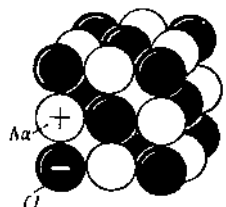


Рисунок 1.2 – Структура ионов хлористого натрия

Молекулярная связь (связь Ван-дер-Ваальса) существует в некоторых веществах между молекулами с ковалентными внутримолекулярными связями. Межмолекулярное притяжение в этом случае обуславливается согласованным движением валентных электронов в соседних молекулах (рисунок 1.4). В любой момент времени электроны максимально удалены друг от друга и максимально приближены к положительным зарядам. При этом силы притяжения валентных электронов положительно заряженными остовами соседних молекул оказываются сильнее сил взаимного отталкивания электронов внешних орбит. Связь Ван-дер-Ваальса наблюдается между молекулами некоторых веществ, например парафина, имеющих низкую температуру плавления, свидетельствующую о непрочности их кристаллической решетки.

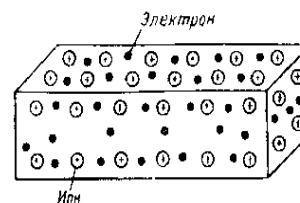


Рисунок 1.3 – Схема строения металлического проводника

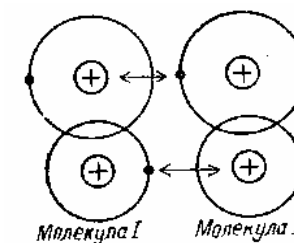


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение двух взаимодействующих молекул (связь Ван-дер-Ваальса)

Классификация веществ по электрическим и магнитным свойствам

Все вещества в зависимости от их электрических свойств относят к диэлектрикам, проводникам или полупроводникам. Различие между проводниками, полупроводниками и диэлектриками наиболее наглядно можно показать с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердых тел.

Исследование спектров излучения различных веществ в газообразном состоянии, когда атомы расположены относительно друг друга на больших расстояниях, показывает, что для атомов каждого вещества характерны вполне определенные спектральные линии. Это говорит о наличии определенных **энергетических состояний (уровней)** для разных атомов.

Энергетические диаграммы диэлектриков, полупроводников и проводников различны (рисунок 1.5).

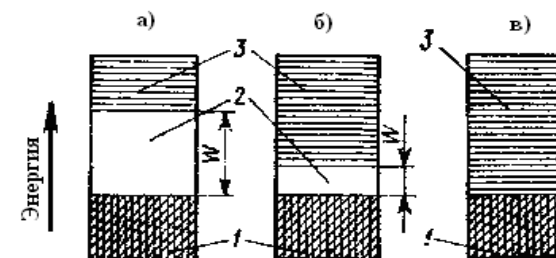


Рисунок 1.5 – Энергетические диаграммы диэлектриков (а), полупроводников (б) и проводников (в) в соответствии с зонной теорией твердого тела:

1 – заполненная электронами зона; 2 – запрещенная зона; 3 – зона свободных энергетических уровней

МОДУЛЬ 1 ТВЕРДЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- понятия: диэлектрик, твердый изоляционный материал, электропроводность, пробой, поляризация, диэлектрические потери;
- строение молекул твердых диэлектриков, энергетическую диаграмму диэлектриков, механизм электропроводности, график тока утечки через диэлектрик, кривую жизни изоляции, виды поляризации, механизм электропрооба, электрические, тепловые, физико-химические, механические свойства диэлектриков;
- область применения электроизоляционных материалов в зависимости от их свойств;

уметь:

- выбирать необходимый твердый электроизоляционный материал;
- объяснять причину выбора материала;
- определять свойства выбранного материала и оценивать их изменение в процессе работы электроустановки;
- экспериментально определять удельные объемное и поверхностное электрическое сопротивление диэлектриков, диэлектрическую проницаемость;
- распределять электроизоляционные материалы по классам нагревостойкости, работать в малой группе;
- анализировать и оценивать собранные данные, работать самостоятельно.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Диэлектрик – материал, с помощью которого осуществляют изоляцию каких-либо токопроводящих частей, находящихся под разными электрическими потенциалами.

Твердый изоляционный материал – диэлектрик, находящийся в период выполнения изоляционной конструкции и ее эксплуатации в твердом агрегатном состоянии.

Диэлектриками будут такие материалы, у которых запрещенная зона настолько велика, что электронной электропроводности в обычных случаях не наблюдается.

Полупроводниками будут вещества с более узкой запрещенной зоной, которая может быть преодолена за счет внешних энергетических воздействий.

Проводниками будут материалы, у которых заполненная электронами зона вплотную прилегает к зоне свободных энергетических уровней или даже перекрывается ею. Вследствие этого электроны в металле свободны, т. е. могут переходить с уровней заполненной зоны на незанятые уровни свободной зоны под влиянием слабой напряженности приложенного к проводнику электрического поля.

Примеси и дефекты кристаллической решетки сильно влияют на электрические свойства твердых тел.

По магнитным свойствам материалы подразделяются на **слабмагнитные** (диамагнетики и парамагнетики) и **сильномагнитные** (ферромагнетики и ферримагнетики).

Диамагнетиками являются вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r < 1$, значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся водород, инертные газы, большинство органических соединений, каменная соль и некоторые металлы (медь, цинк, серебро, золото, ртуть), а также висмут, галлий.

К **парамагнетикам** относятся вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r > 1$, также не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся кислород, оксид азота, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина.

Диамагнетики и парамагнетики имеют магнитную проницаемость, близкую к единице, и по магнитным свойствам нашли себе ограниченное применение в технике.

У сильномагнитных материалов $\mu_r \gg 1$ и зависит от напряженности магнитного поля. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы, сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите виды химической связи.
2. Приведите классификацию веществ по электрическим свойствам.
3. Приведите классификацию веществ по магнитным свойствам.

Электропроводность – способность материала проводить электрический ток.

Пробой – явление потери диэлектриком свойств электроизоляционного материала, если напряженность приложенного к нему электрического поля превысит некоторое критическое значение.

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

Диэлектрические потери – мощность, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающая нагрев диэлектрика.

Основной теоретический материал

Лекция Характеристики и свойства диэлектриков

1. Поляризация диэлектриков.
2. Электропроводность диэлектриков.
3. Пробой диэлектриков.
4. Диэлектрические потери
5. Твердые органические электроизоляционные материалы.
6. Твердые неорганические электроизоляционные материалы.

Электроизоляционными материалами (диэлектриками) называют такие материалы, с помощью которых осуществляют изоляцию каких-либо токопроводящих частей, находящихся под разными электрическими потенциалами. Электроизоляционные материалы обладают очень большим электрическим сопротивлением. Их удельное объемное сопротивление $\rho = 10^8 - 10^{18}$ Ом·м, тогда как у проводников оно составляет лишь $10^{-8} - 10^{-6}$ Ом·м.

Назначение электрической изоляции – не допускать прохождения электрического тока по каким-либо другим путям, не предусмотренным схемой электрического устройства. Электроизоляционные материалы используются также в качестве диэлектриков в электрических конденсаторах для создания определенного значения электрической емкости конденсатора.

По химическому составу электроизоляционные материалы делят на органические и неорганические. Основным элементом в молекулах всех органических материалов является углерод. В неорганических материалах углерод не содержится. Наибольшей нагревостойкостью обладают неорганические электроизоляционные материалы: слюда, керамика и др.

По способу получения различают естественные (природные) и синтетические (искусственные) электроизоляционные материалы. Синтетические материалы могут быть созданы с заданным комплексом электрических и физико-химических свойств, поэтому они нашли широкое применение в электротехнике.

По строению молекул электроизоляционные материалы делят на неполярные и полярные.

Неполярные диэлектрики состоят из электрически нейтральных молекул, которые до воздействия на них электрического поля не обладают электрическими свойствами (полиэтилен, фторопласт-4 и др.). Среди неполярных выделяют ионные кристаллические диэлектрики (слюда, кварц и др.), в которых пара ионов составляет электрически нейтральную частицу. Ионы располагаются в узлах кристаллической решетки. Каждый ион находится в колебательном тепловом движении около центра равновесия – узла кристаллической решетки.

Полярные диэлектрики состоят из полярных молекул – диполей. Последние вследствие асимметрии своего строения обладают начальным электрическим моментом еще до воздействия на них электрического поля. Полярными диэлектриками являются совок, поливинилхлорид и др. По сравнению с неполярными диэлектриками полярные имеют повышенные значения диэлектрической проницаемости, а также несколько повышенную проводимость.

Электроизоляционные материалы подразделяют по агрегатному состоянию на **газообразные, жидкие и твердые**. В особую группу могут быть выделены **твердеющие** материалы, которые в исходном состоянии, во время введения их в изготавливаемую изоляцию, являются жидкостями, но затем затвердевают и в готовой изоляции представляют собой твердые вещества (например, лаки и компаунды).

Тепловые свойства диэлектриков. Нагревостойкость – способность диэлектрика выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, без недопустимого ухудшения его свойств. В зависимости от значений допустимых в эксплуатации температур диэлектрики различают по классам нагревостойкости.

Холодостойкость. Во многих случаях эксплуатации изоляции, скажем, изоляции оборудования открытых подстанций, полевой аппаратуры связи, важна холодостойкость, т. е. способность изоляции выдерживать воздействие низких температур (например, от -60 до -70 °С) без недопустимого ухудшения ее свойств.

Теплопроводность определяет процесс отвода теплоты от нагретых проводников и магнитопроводов через слой электрической изоляции, а также и отвод теплоты из толщи электрической изоляции, нагретой за счет диэлектрических потерь. Количественно теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности λ [Вт/(м·К) или Вт/(м·°С)], который равен количеству теплоты, прошедшей за единицу времени через единицу площади при градиенте температуры 1 К/м.

Тепловое расширение диэлектриков, как и других материалов, оценивают **температурным коэффициентом линейного расширения** (TK_l), измеряемым в K^{-1} :

$$TK_l = \alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}. \quad (1.1)$$

Материалы, обладающие малыми значениями TK_l , имеют, как правило, наиболее высокую нагревостойкость и наоборот.

Для жидких горючих диэлектриков определяются **температура вспышки паров и температура воспламенения**.

Температурой вспышки называют температуру жидкости, при нагреве до которой смесь паров ее с воздухом вспыхивает при поднесении к ней небольшого пламени. **Температура воспламенения** – температура, при которой при поднесении пламени испытуемая жидкость загорается.

Физико-химические свойства диэлектриков. Гигроскопичность – способность впитывать в себя влагу из окружающей среды.

Влагостойкость определяется по изменению параметров диэлектрика, находящегося в окружающей среде. В процессе выдержки во влажной атмосфере контролируют изменение таких параметров диэлектрика, как удельное объемное сопротивление, электрическая прочность, сопротивление изоляции и др.

Водостойкость и водопоглощение определяются по изменению таких же параметров диэлектрика в процессе выдержки его в дистиллированной воде.

Влагопроницаемость – способность диэлектриков пропускать сквозь себя пары воды. Эта характеристика чрезвычайно важна для оценки качества материалов, применяемых для защитных покрытий (шланги кабелей, опрессовка конденсаторов, компаундные заливки, лаковые покрытия деталей).

Для уменьшения гигроскопичности и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их пропитка.

Химостойкость – это стойкость к разрушению при контактировании с водой, кислотами, щелочами, солевыми растворами, газами и т. д., возникающими при длительном контактировании диэлектрика с окружающей средой во время эксплуатации.

Кислотное число есть количество миллиграммов (мг) едкого калия (KOH), необходимое для нейтрализации свободных кислот, содержащихся в 1 г диэлектрика. Оно определяется у жидких диэлектриков, компаундов и лаков. Кислотное число позволяет оценить количество свободных кислот в диэлектрике, которые ухудшают электроизоляционные и другие свойства диэлектриков.

Вязкость (коэффициент внутреннего трения) позволяет оценить текучесть электроизоляционных жидкостей (масел, лаков и др.). Различают кинематическую и условную вязкость.

Механические свойства диэлектриков. Механическая прочность электроизоляционных и других электротехнических материалов оценивается с помощью механических характеристик. Последние вычисляют при испытании образцов определенных размеров и формы.

Предел прочности материала при растяжении σ_p вычисляют по формуле:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{S_0}, \quad (1.2)$$

где P_p – разрушающее усилие при растяжении (разрыве) образца материала, Н;

S_0 – площадь поперечного сечения образца материала до испытания, m^2 .

Относительное удлинение при растяжении e_p вычисляют по формуле:

$$e_p = \frac{\Delta l_p}{l_0} 100\%, \quad (1.3)$$

где Δl_p – абсолютная величина удлинения образца материала в момент разрыва, мм;

l_0 – длина образца материала до испытания (до разрыва), мм.

Предел прочности материала при сжатии σ_c вычисляют по формуле:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{S_0}, \quad (1.4)$$

где P_c – разрушающее усилие при сжатии образца материала, Н;
 S_0 – площадь поперечного сечения образца материала до испытания, м².

Предел прочности материала при статическом изгибе $\sigma_{и}$ вычисляется по формуле:

$$\sigma_{и} = \frac{1,5P_{и}L}{bh^2}, \quad (1.5)$$

где $P_{и}$ – разрушающее усилие, приложенное посередине образца (бруса) при изгибе, Н;

L – расстояние между опорами, на которых располагается образец в испытательной машине, м;

b – ширина образца, м;

h – толщина образца (бруска), м.

Поляризация диэлектриков

Поляризация – ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул.

Под влиянием электрического поля связанные электрические заряды диэлектрика смещаются в направлении действующих на них сил и тем больше, чем выше напряженность поля. При снятии электрического поля заряды возвращаются в прежнее состояние. В полярных диэлектриках, содержащих дипольные молекулы, воздействие электрического поля вызывает еще и ориентацию диполей в направлении поля; при отсутствии поля диполи дезориентируются вследствие теплового движения.

Основные виды поляризации диэлектриков. Переходя к рассмотрению явления поляризации в связи со структурой диэлектриков, следует различать два основных вида поляризации.

К первому виду относится поляризация, совершающаяся в диэлектрике под воздействием электрического поля практически мгновенно, вполне упруго, без рассеяния энергии, т. е. без выделения теплоты. Второй вид поляризации не совершается мгновенно, а нарастает и убывает замедленно и сопровождается рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. его нагреванием. Такой вид поляризации называют **релаксационной** поляризацией.

К первому виду поляризации относятся электронная и ионная, остальные механизмы принадлежат к релаксационной поляризации.

Емкость конденсатора с диэлектриком и накопленный в нем электрический заряд обуславливаются суммой различных механизмов поляризации. Они могут наблюдаться у разных диэлектриков, несколько механизмов одновременно может быть у одного и того же материала.

Эквивалентная схема диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, содержит ряд емкостей, включенных параллельно источнику напряжения.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около 10^{-15} с). Смещение и деформация электронных орбит атомов или ионов не зависит от температуры, однако, электронная поляризация вещества уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема. Изменение диэлектрической проницаемости диэлектрика с электронной поляризацией при изменении температуры обуславливается лишь изменением его плотности. Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерей энергии.

Ионная поляризация характерна для твердых тел с ионным строением и обуславливается смещением упруго связанных ионов. С повышением температуры она усиливается в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, из-за увеличения расстояния между ними при тепловом расширении, в большинстве случаев температурный коэффициент диэлектрической проницаемости ионных диэлектриков оказывается положительным.

Время установления ионной поляризации – порядка 10^{-13} с.

Дипольно-релаксационная поляризация, для краткости называемая **дипольной**, отличается от электронной и ионной тем, что она связана с тепловым движением частиц. Дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации.

Дипольная поляризация возможна, если молекулярные силы не мешают диполям ориентироваться вдоль поля. С увеличением температуры молекулярные силы ослабевают, вязкость вещества понижается, что должно усиливать дипольную поляризацию, однако, в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. В связи с этим дипольная поляризация с увеличением температуры сначала возрастает, пока ослабление молекулярных сил сказывается сильнее, чем возраста-

ние хаотического теплового движения. Затем, когда хаотическое движение становится интенсивнее, дипольная поляризация с ростом температуры начинает падать.

Дипольная поляризация свойственна полярным газам и жидкостям. Этот вид поляризации может наблюдаться также и в твердых полярных органических веществах, но в этом случае поляризация обычно обусловлена уже не поворотом самой молекулы, а поворотом имеющихся в ней радикалов по отношению к молекуле. Такой вид поляризации называют также **дипольно-радикальной поляризацией**. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильных групп *ОН*.

В кристаллах с молекулярной решеткой и слабыми вандерваальсовыми связями возможна ориентация и более крупных частиц.

Ионно-релаксационная поляризация наблюдается в неорганических стеклах и в некоторых ионных кристаллических неорганических веществах с неплотной упаковкой ионов. В этом случае слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля среди хаотических тепловых перебросов получают избыточные перебросы в направлении поля.

После снятия электрического поля смещение ионов постепенно ослабевает по экспоненциальному закону. С повышением температуры ионно-релаксационная поляризация заметно усиливается.

Электронно-релаксационная поляризация отличается от электронной и ионной и возникает за счет возбужденных тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок.

Электронно-релаксационная поляризация характерна главным образом для диэлектриков с высоким показателем преломления и электронной электропроводностью.

Обращает на себя внимание высокое значение диэлектрической проницаемости, которое может иметь место при электронно-релаксационной поляризации.

Миграционная поляризация понимается как дополнительный механизм поляризации, проявляющийся в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях и наличии примесей. Эта поляризация проявляется при низких частотах и связана со значительным рассеянием электрической энергии. Причинами такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью.

Самопроизвольная, или спонтанная, поляризация существует у сегнетоэлектриков. В веществах с самопроизвольной поляризацией имеются отдельные области (домены), обладающие электрическим моментом еще в отсутствие внешнего поля. Однако при этом ориентация электрических моментов в разных доменах различна. Наложение внешнего поля способствует преимущественной ориентации электрических моментов доменов в направлении поля, что дает эффект очень сильной поляризации. Поэтому диэлектрическая проницаемость при спонтанной поляризации зависит от напряженности электрического поля. В переменных электрических полях материалы с самопроизвольной поляризацией характеризуются значительным рассеянием энергии, т. е. выделением тепла.

Электропроводность диэлектриков

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления равновесного состояния протекают во времени, создавая токи смещения в диэлектриках. Токи смещения упругосвязанных зарядов при электронной и ионной поляризации столь кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые у большого числа технических диэлектриков, называют абсорбционными токами. При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они протекают в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Электропроводность твердых тел. Электропроводность обуславливается передвижением как ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а у некоторых материалов может быть вызвана наличием свободных электронов. Электронная электропроводность наиболее заметна при сильных электрических полях. Ионная электропроводность сопровождается переносом вещества. При электронной электропроводности это явление не наблюдается. В процессе прохождения электрического тока через твердый диэлектрик содержащиеся в нем ионы примеси могут частично удаляться, выделяясь на электродах, как это наблюдается в жидкостях.

Пробой диэлектриков

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название **пробоя диэлектрика** или нарушения его электрической прочности. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется **пробивным напряжением**, а соответствующее значение напряженности поля — **электрической прочностью диэлектрика**.

Пробивное напряжение обозначается $U_{пр}$ и измеряется чаще всего в киловольтах. Электрическая прочность определяется пробивным напряжением, отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{пр} = U_{пр}/h, \quad (1.7)$$

где h — толщина диэлектрика.

Единицы измерения электрической прочности:

$$1 \text{ МВ/м} = 1 \text{ кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м}.$$

Значение $U_{пр}$ зависит от толщины диэлектрика h . Чем больше h , тем большее напряжение требуется для образования канала высокой проводимости, т. е. пробоя. Величина $E_{пр}$ нормирована по толщине и поэтому является количественной мерой электрической прочности, т. е. качества диэлектрика.

Пробой твердых тел может вызываться электрическими, тепловыми и электрохимическими процессами, возникающими под действием поля.

Явление **электрического** пробоя связано с электронными процессами в диэлектрике, возникающими в сильном электрическом поле и приводящими к внезапному резкому местному возрастанию плотности электрического тока к моменту пробоя.

Этот вид пробоя характеризуется весьма быстрым развитием, он протекает за время, меньшее 10^{-7} – 10^{-8} с, и не обусловлен тепловой энергией, хотя электрическая прочность при электрическом пробое в некоторой степени зависит от температуры.

Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в электрическом поле, что приводит к росту активного тока и дальнейшему увеличению нагрева диэлектрика вплоть до его термического разрушения.

Тепловой пробой возникает в случае, когда количество теплоты, выделяющееся в диэлектрике за счет диэлектрических потерь превышает количество теплоты, которое может быть рассеяно в окружающую среду. В результате происходит разогрев материала до температур, соответствующих расплавлению и обугливанию.

Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды.

Электрохимический пробой имеет место в диэлектриках при повышенных температурах и влажности воздуха, когда в материале развиваются процессы, приводящие к необратимому уменьшению сопротивления, т. е. к электрохимическому старению, при котором возможны изменение химического состава вещества и ухудшение электрической прочности.

Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжениях низкой частоты. Кроме того, электрохимический пробой может иметь место при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся тепловым эффектом.

Для развития электрохимического пробоя требуется длительное время, поскольку он связан с явлением электропроводности.

Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в материале обнаруживается сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозного тока, возникают дополнительные причины, вызывающие потери в диэлектрике.

Диэлектрические потери в электроизоляционном материале можно характеризовать рассеиваемой мощностью, отнесенной к единице объема, или **удельными потерями**; чаще для оценки способности диэлектрика рассеивать мощность в электрическом поле пользуются углом диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол, дополняющий до 90° угол фазового сдвига φ между током и напряжением в емкостной цепи. Для идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол диэлектрических потерь δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол фазового сдвига φ и тем больше угол δ и его функция $\operatorname{tg}\delta$.

Выражение для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, имеет вид:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta, \quad (1.8)$$

где P_a – активная мощность, Вт;

U – напряжение, В;

ω – угловая частота, с^{-1} ;

C – емкость, Ф.

Рассматривая формулу 1.8, можно видеть, что диэлектрические потери приобретают серьезное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку диэлектрические потери пропорциональны квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте поля. Материалы, предназначенные для применения в указанных условиях, должны отличаться малыми значениями угла потерь и диэлектрической проницаемости, так как в противном случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике, может стать недопустимо большой.

Твердые органические электроизоляционные материалы

Волокнистые материалы – материалы, состоящие преимущественно из частиц удлиненной формы – волокон.

По виду исходного сырья они делятся на материалы из:

- растительных волокон (бумага, картон, хлопчатобумажная пряжа, ткани);
- животных волокон (натуральный шелк);
- искусственных волокон (ацетатный, вискозный шелк);
- неорганических волокон (стекловолокно, асбест).

Все волокнистые материалы содержат поры объемом до 40–50 %, благодаря чему они имеют высокую гигроскопичность и низкие электроизоляционные свойства. Для устранения этого недостатка их подвергают сушке и пропитке. Наиболее распространенными материалами являются бумага, картон, нити, ткани. На их основе изготавливают текстильные диэлектрические материалы и слоистые пластики.

Резина состоит из многокомпонентной смеси на основе каучуков и близких к ним по свойствам веществ, называемых эластомерами. Резина для получения необходимых свойств подвергается процессу так называемой вулканизации (введения серы и нагреву).

Резину широко применяют в электропромышленности для изоляции установочных и монтажных проводов, гибких переносных проводов и кабелей. Она используется также для изготовления защитных перчаток, галош, ковриков и изоляционных трубок, применяемых при монтаже проводов. К недостаткам резины как электроизоляционного материала следует отнести низкую нагревостойкость (при нагреве резина стареет, становится хрупкой и трескается), малую стойкость к действию неполярных жидкостей (бензол, бензин); малую стойкость к действию оптического излучения, особенно ультрафиолетового, под влиянием которого резина быстро стареет. Губительно действует на резину озон.

Пластмассы – это материалы на основе природных, а чаще всего искусственных (синтетических) полимеров, которые под воздействием нагревания и давления способны формоваться в изделия заданной формы и затем устойчиво сохранять ее. Кроме основного компонента – связующего вещества, в состав пластмасс могут входить наполнители, пластификаторы, отвердители, красители, стабилизаторы, порообразователи, ингибиторы и некоторые другие добавки.

Твердые неорганические электроизоляционные материалы

Стеклами называют неорганические квазиаморфные термопластичные вещества, представляющие собой системы различных оксидов. Основой стекол являются стеклообразующие оксиды SiO_2 , B_2O_5 , P_2O_5 , которые совместно с оксидами щелочных (Na_2O , K_2O), щелочно-земельных (BaO , CaO), и других металлов (PbO , ZnO , Al_2O_3) составляют исходный продукт для варки стекол различного состава, а потому и различного назначения.

По химическому составу технические силикатные стекла могут быть разбиты на три группы:

- щелочные стекла без тяжелых оксидов или с весьма незначительным содержанием их. К ним принадлежат наиболее распространенные в быту оконные, бутылочные и тому подобные стекла, а также стекла «пайрекс», имеющие довольно малое значение $TК_l$ (около $3,3 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) и сравнительно стойкие к термоударам;
- щелочные стекла с большим количеством тяжелых оксидов. К ним принадлежат флинтсы с содержанием PbO и кроны с содержа-

нием BaO , применяемые в качестве оптических и электроизоляционных стекол. Эти стекла имеют высокую ϵ_r и малым $tg\delta$. К флинтам принадлежат специальные конденсаторные стекла с повышенным значением ϵ_r ;

▪ бесщелочные стекла — кварцевое стекло, а также стекла с очень малым содержанием щелочных оксидов применяются для оптических, электроизоляционных и различных специальных целей.

В зависимости от назначения можно отметить следующие основные виды электротехнических стекол.

1. Конденсаторные стекла используются в качестве диэлектрика конденсаторов, применяемых в высоковольтных фильтрах, импульсных генераторах, колебательных контурах высокочастотных устройств. Они должны иметь по возможности повышенную ϵ_r и (для высокочастотных конденсаторов) малый $tg\delta$.

2. Установочные стекла служат для изготовления установочных деталей, изоляторов (телеграфных, антенных, опорных, проходных), бус и т. п.

3. Ламповые стекла применяются для баллонов и ножек осветительных ламп, различных электронных приборов и т. д. К ним предъявляется требование спаиваемости с металлом (вольфрамом, молибденом и др.).

4. Стекла с наполнителем: к ним принадлежит пластмасса горячей прессовки из стекла и слюдяного порошка – микалекс.

Стекловолокно применяют при повышенных температурах и влажности. Обладает хорошими электроизоляционными свойствами, достаточно хорошей механической прочностью и малой гигроскопичностью. Из стекловолокна толщиной 0,07–0,28 мм ткнут стеклоленты, ткани. Недостатком материала является недостаточная эластичность и малая сопротивляемость к истиранию.

Керамическими материалами (керамикой) называют неорганические материалы, из которых могут быть изготовлены изделия той или иной формы, подвергаемые дальнейшему обжигу при высокой температуре; в результате обжига в керамической массе происходят сложные физико-химические процессы, благодаря которым готовое (обожженное) изделие приобретает нужные свойства.

Керамические диэлектрические материалы делятся на пассивные и активные. Пассивную керамику по назначению и электрическим свойствам делят на установочную и конденсаторную.

Установочная керамика должна иметь $\epsilon < 10$, повышенную механическую прочность и хорошие электроизоляционные свойства. Применяется для изготовления опорных, проходных, подвесных

изоляторов. Большинство видов установочной керамики относится к высокочастотным диэлектрикам и имеют $tg\delta \sim 2 \times 10^{-3}$ на частоте 1 МГц.

Конденсаторная керамика применяется для изготовления конденсаторов высокого и низкого напряжения и подразделяется на керамику с повышенным ϵ (более 12) и высоким (более 900).

Наиболее широкое распространение среди пассивной керамики получили материалы с кристаллической фазой системы $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$. К ним относятся радиофарфор, алюминоксид, ультрафарфор, корундомуллитовая и цельзиановая керамики.

Некоторые виды керамики относятся к классу активных диэлектриков, свойства которых зависят от внешних воздействий и применяются в основном как сегнето- и пьезоэлектрики.

Активные диэлектрики нашли широкое применение в технике благодаря своим особым, управляемым свойствам.

По явлениям, вызывающим поляризацию, активные диэлектрики делятся на сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и электреты.

Сегнетоэлектрики – материалы, обладающие в определенном интервале температур спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено внешним электрическим полем. Имеют высокое значение ϵ , что связано с их доменной структурой.

Пьезоэлектрики – генерируют электрические заряды под действием механических напряжений или, наоборот, изменяют свои размеры под действием электрического поля.

Электреты – материалы, которые после поляризации электрическим полем могут длительно сохранять поляризованное состояние и создавать в окружающем их пространстве электрическое поле. Их можно представить в виде аналогов постоянных магнитов. К активным диэлектрикам относятся также пироэлектрики, электролюминофоры и материалы квантовой электроники.

Пироэлектрики характеризуются возникновением на их поверхности электрических зарядов при изменении температуры.

Электролюминофоры – материалы, излучающие свет под действием внешнего электрического поля.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется поляризацией диэлектриков?
2. Назовите виды и механизмы поляризации диэлектриков.
3. Что называется электропроводностью?
4. Что называется диэлектриком?

5. Что называется электрическим пробоем?
6. Назовите виды пробоя диэлектриков.
7. Что называется диэлектрическими потерями?
8. Перечислите классы нагревостойкости органических электроизоляционных материалов.
9. Перечислите классы нагревостойкости неорганических электроизоляционных материалов.
10. Назовите достоинства и недостатки органических электроизоляционных материалов.
11. Назовите достоинства и недостатки неорганических электроизоляционных материалов.
12. Каков механизм дипольной поляризации?
13. Сущность миграционной поляризации?
14. Что называется током сквозной проводимости?
15. Чем обусловлен ток абсорбции?
16. Изобразите и объясните график тока утечки.
17. Когда возникает электрический пробой в твердых диэлектриках?
18. Как определяется электрическая прочность диэлектриков?
19. Перечислите параметры, характеризующие диэлектрические потери.
20. Чем обусловлены диэлектрические потери?
21. Классификация волокнистых электроизоляционных материалов.
22. Классификация неорганических стекол.
23. Приведите схемы замещения и векторные диаграммы диэлектриков.
24. Поясните суть явлений короны и перекрытий диэлектриков.
25. Особенности строения и поляризации сегнетоэлектриков.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ И ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа

«Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов»

Общие сведения

Электроизоляционными материалами (ЭИМ) (диэлектриками) называют такие материалы, с помощью которых осуществляют изоляцию каких-либо токопроводящих частей, находящихся под разными электрическими потенциалами.

Диэлектрики обладают очень большим электрическим сопротивлением. Их удельное объемное сопротивление – 10^8 – 10^{18} Ом·м.

В соответствии с ГОСТ 8865–87 все электроизоляционные материалы разделены на классы нагревостойкости (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Классы нагревостойкости	У	А	Е	В	Ф	Н	200	220	250
Допустимая рабочая температура, °С	90	105	120	130	155	180	200	220	250

Нагревостойкость – способность диэлектрика длительно выдерживать заданную рабочую температуру и выполнять свои функции в течение времени нормальной эксплуатации оборудования, в котором используется данный диэлектрик.

К классам нагревостойкости У, А, Е в основном относятся органические электроизоляционные материалы.

К достоинствам этих диэлектриков относятся гибкость, эластичность.

К недостаткам следует отнести:

- невысокую нагревостойкость;
- недостаточную стойкость к воздействию окружающей среды;
- склонность к старению в электрическом, тепловом, радиационном полях.

У (90°) – текстильные материалы на основе хлопка, натуральные шелка, целлюлозная электроизоляционная бумага, картон, древесина, пластиковые материалы с органическими наполнителями.

А (105°) – материалы класса У, если они пропитаны изоляционным составом или погружены в жидкие диэлектрики. Пленкоэлектротрактон на основе ацетилцеллюлозной пленки.

Е (120°) – пластические массы с органическим наполнителем и терморезистивными связующими типа фенолформальдегидных и подобных им смол (гетинакс, текстолит, пресспорошки с наполнением древесной мукой). Полиэтилентерефталатные пленки, эпоксидные, полиэфирные и полиуретановые смолы и компаунды, изоляция эмалированных проводов на полиуретановых и эпоксидных лаках).

Электроизоляционные материалы классов нагревостойкости В, F, H, 200, 220, 250 в основном относятся к неорганическим.

Неорганические материалы обладают повышенной теплопроводностью, стойкостью к старению в электрическом и радиационном полях.

К недостаткам этих материалов относится трудность обработки и переработки в электроизоляционные изделия. Такие электроизоляционные материалы, как стекло, фарфор, керамика, обладают рядом недостатков: хрупкость, способность разрушаться без заметной пластической деформации.

В (130°) – материалы на основе щепаной слюды, слюдопластов и слюдинитов, в том числе с бумажной или тканевой органической подложкой, стеклоткани и стеклолакошпатель; асбестовые волокнистые материалы, в том числе с органическими волокнами. Слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов. Терморезистивные синтетические компаунды. Асбоцемент, пропитанный органическим составом.

Ф (155°) – материалы на основе щепаной слюды, слюдопластов и слюдинитов без подложки или с неорганической подложкой. Стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов, слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов.

Н (180°) – материалы на основе щепаной слюды без подложки или с неорганической подложкой, стекловолокнистые материалы. Асбестовые материалы (пряжа, ткани, бумага).

200 (200°), 220 (220°), 250 (250°) – чисто неорганические материалы, не содержащие склеивающих и пропитывающих составов.

Аудиторные задания

1 уровень

Изучить образцы электроизоляционных материалов, представленных на стенде в аудитории, разбить их на классы нагревостойкости. Заполнить таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Электроизоляционные материалы

Наименование материала	Класс нагревостойкости	Применение

2 уровень

Изучить образцы электроизоляционных материалов, представленных на стенде в аудитории, разбить их на классы нагревостойкости. Заполнить таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Электроизоляционные материалы

Наименование материала	Класс нагревостойкости	Способ получения	Достоинства	Недостатки	Применение

Лабораторная работа

«Измерение электрических характеристик твердых диэлектриков»

Теоретический материал

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления равновесного состояния протекают во времени, создавая токи смещения в диэлектриках. Токи смещения упругосвязанных зарядов при электронной и ионной поляризации столь кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые у большого числа технических диэлектриков, называют абсорбционными токами.

При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они протекают в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению слабых по величине **сквозных токов**. Ток утечки в техническом диэлектрике представляет сумму сквозного тока и тока абсорбции. Для плотностей токов можно записать:

$$J_{yt} = J_{ск} + J_{аб}. \quad (1.9)$$

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения D :

$$J_{см} = \frac{\partial D}{\partial \tau} \approx J_{аб}, \quad (1.10)$$

обусловленного мгновенными (электронными, ионными) и замедленными смещениями зарядов.

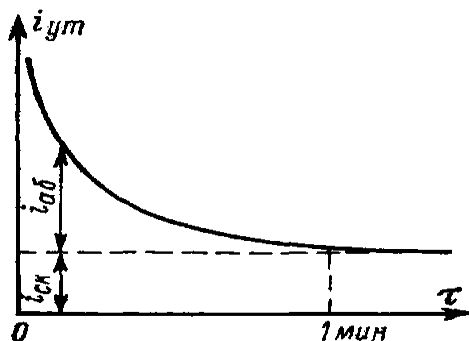


Рисунок 1.5 – Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени

Зависимость тока через диэлектрик при приложении постоянного напряжения показана на рисунке 1.5. Этот ток получил название тока утечки I_{yt} . Ток утечки содержит постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая образует сквозной ток $I_{скв}$ диэлектрика, обусловленный упорядоченным перемещением свободных носителей электрических зарядов. Переменная составляющая тока утечки – ток абсорбции $I_{абс}$ обусловлена смещением связанных электрических зарядов диэлектрика (диполей) под действием электрического поля.

Из рисунка 1.5 видно, что после завершения процессов поляризации через диэлектрик протекает только сквозной ток. Токи сме-

щения необходимо принимать во внимание при измерениях проводимости диэлектриков ввиду того, что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только **сквозной ток**, но и сопровождающий его **ток абсорбции**, вследствие чего может создаться неправильное представление о большой проводимости. Проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току, сопровождающемуся выделением и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только сквозным током, но и активными составляющими абсорбционных токов.

Особенностью электропроводности диэлектриков в большинстве случаев является ее неэлектронный (ионный) характер.

Истинное сопротивление диэлектрика $R_{из}$, определяющее сквозной ток, может быть вычислено по следующей формуле:

$$R_{из} = \frac{U}{i_{yt} - \sum i_{аб}} = \frac{U}{i_{ск}}, \quad (1.11)$$

где i_{yt} – наблюдаемый ток утечки;

U – приложенное напряжение;

$i_{аб}$ – суммарный ток абсорбции.

Поскольку при определении абсорбционных токов даже замедленных видов поляризации возникают некоторые трудности, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на ток, измеренный через одну минуту после включения напряжения и принимаемый за сквозной ток.

Для твердых электроизоляционных материалов необходимо различать объемную и поверхностную проводимость.

Для сравнительной оценки объемной и поверхностной проводимости различных материалов пользуются значениями **удельного объемного сопротивления ρ_v** и **удельного поверхностного сопротивления ρ_s** .

По удельному объемному сопротивлению может быть определена **удельная объемная проводимость**, по удельному поверхностному сопротивлению – **удельная поверхностная проводимость**.

В системе СИ удельное объемное сопротивление ρ_v равно объемному сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит сквозь куб от одной его стороны к противоположной.

Для плоского образца материала в однородном поле удельное объемное сопротивление ($\text{Ом} \cdot \text{м}$) рассчитывается по формуле:

$$\rho_v = R_v S / h, \quad (1.12)$$

где R_v – объемное сопротивление образца, Ом;

S – площадь электрода, м^2 ;

h – толщина образца, м.

Удельная объемная проводимость γ_v измеряется в сименсах на метр. Удельное поверхностное сопротивление равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через квадрат, от одной его стороны к противоположной.

Удельное поверхностное сопротивление (в омах) рассчитывается по формуле:

$$\rho_s = R_s d / l, \quad (1.13)$$

где R_s – поверхностное сопротивление образца материала, Ом;

d – ширина параллельно поставленных электродов, м;

l – расстояние между электродами, м.

Удельная поверхностная проводимость γ_s измеряется в сименсах.

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению изоляции, складывается из объемной и поверхностной проводимостей.

Электропроводность изоляционных материалов обуславливается состоянием вещества: газообразным, жидким или твердым, а также зависит от влажности и температуры окружающей среды. Некоторое влияние на проводимость диэлектриков оказывает также напряженность поля в образце, при которой проводится измерение.

При длительной работе под напряжением ток через твердые и жидкие диэлектрики с течением времени может уменьшаться или увеличиваться. Уменьшение тока со временем говорит о том, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей и уменьшалась за счет электрической очистки образца. Увеличение тока со временем говорит об участии в нем зарядов, являющихся структурными элементами самого материала, и о протекающем в нем под напряжением необратимом процессе старения, способном постепенно принести к разрушению – пробоем диэлектрика.

Все электроизоляционные материалы не являются идеальными диэлектриками. В любом из них всегда имеется некоторое количе-

ство свободных зарядов, благодаря чему в диэлектрике под действием электрического поля возникают слабые токи объемной I_v и поверхностной I_s утечки (рисунок 1.6).

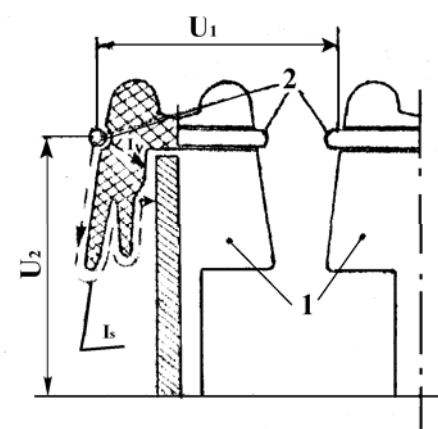


Рисунок 1.6 – Пути токов объемной и поверхностной утечки:
1 – изоляторы; 2 – провода, находящиеся под напряжением U_1 ; U_2 – напряжение между проводом и конструкцией (землей); I_v – ток объемной утечки; I_s – ток поверхностной утечки

Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь – важнейшие характеристики электроизоляционных материалов.

Значение относительной диэлектрической проницаемости электроизоляционных материалов можно вычислить, сравнив емкости двух конденсаторов, одинаковых по форме и геометрическим размерам:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0}, \quad (1.14)$$

где C_x – емкость конденсатора с испытываемым диэлектриком;

C_0 – емкость конденсатора при тех же геометрических размерах, где между электродами вакуум.

Значение исследуемого диэлектрика можно определить, измеряя дважды емкость разборного конденсатора: когда между обкладками исследуемый диэлектрик (C_x) и когда между ними воздух (C_0).

Замена вакуума воздухом дает малую погрешность.

Емкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{h}, \quad (1.15)$$

где S – площадь обкладок конденсатора, м^2 ;
 h – толщина диэлектрика, м ;
 ϵ_0 – электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$;
 ϵ – диэлектрическая проницаемость.

Относительную диэлектрическую проницаемость определяют одновременно с другой электрической характеристикой материала – тангенсом угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$).

Условия работы изоляции под напряжением переменного тока тяжелее, чем под напряжением постоянного тока при одинаковых величинах напряжения, т. е. когда $U_{\text{пост}} = U_{\text{пер}}$ (действующее значение). При напряжении переменного тока в изоляции возникают значительные потери энергии, которые называются диэлектрическими потерями.

При переменном токе через изоляцию протекает ток I (рисунок 1.7), равный геометрической сумме: тока сквозной проводимости $I_{\text{скв}}$, тока абсорбции $I_{\text{абс}}$ и емкостного тока (тока смещения) $I_{\text{см}}$, обусловленного геометрической емкостью C .

$$I = I_{\text{см}} + I_{\text{абс}} + I_{\text{скв}}. \quad (1.16)$$

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика:

$$P_a = U^2 \omega C \text{tg}\delta, \quad (1.17)$$

где P_a – мощность диэлектрических потерь, Вт ;
 U – напряжение, В ;
 ω – угловая частота; $\omega = 2\pi f$ (f – частота сети);
 C – емкость, Ф ;
 $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Так как величины U , ω , C практически являются неизменными, то о потерях энергии в изоляции судят по величине тангенса угла диэлектрических потерь, которыми обладает данный диэлектрик.

В практике чаще используется величина $\text{tg}\delta$, которая дает усредненную объемную характеристику диэлектрика по величине потерь энергии и является одним из его параметров (рисунок 1.7).

Тангенсом угла диэлектрических потерь называется отношение активной составляющей тока I_a , протекающего через изоляцию, при

приложении к ней переменного напряжения, к его емкостной составляющей.

$$\text{tg}\delta = \frac{I_a}{I_C}, \quad (1.18);$$

$$\delta = 90 - \varphi, \quad (1.19)$$

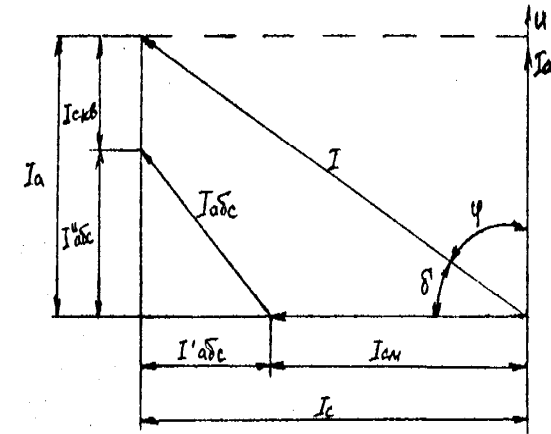


Рисунок 1.7 – Векторная диаграмма токов в диэлектрике

На векторной диаграмме видно, что активная составляющая полного тока I_a состоит из тока сквозной проводимости $I_{\text{скв}}$ и активной составляющей тока абсорбции $I_{\text{абс}}$. Емкостная составляющая тока I_C равна сумме тока смещения $I_{\text{см}}$ и емкостной составляющей тока абсорбции $I_{\text{ам}}$. Потери в изоляции создаются, как видно из диаграммы, в основном током абсорбции, активная составляющая $I_{\text{абс}}$ которого больше тока сквозной проводимости $I_{\text{скв}}$.

Увлажнение и загрязнение изоляции вызывают увеличение активной составляющей тока I_a и вместе с тем увеличение тангенса угла диэлектрических потерь.

Показатель $\text{tg}\delta$ очень чувствителен к изменению качества изоляции, поэтому, измеряя его, контролируют состояние изоляции трансформаторов, конденсаторов, электрических машин, высоковольтных вводов и другого электрооборудования.

Описание лабораторной установки и хода выполнения лабораторной работы

Величина токов объемной и поверхностной утечки зависит от удельного объемного и удельного поверхностного электрического сопротивления диэлектрика.

Для определения объемного электрического сопротивления применяют образец диэлектрика с тремя металлическими электродами, которые подключаются к мегаомметру, как указано на рисунке 1.8.

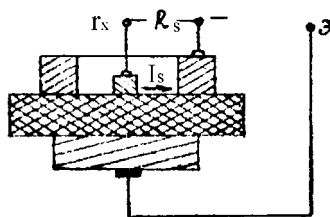


Рисунок 1.8 – Схема подключения установки при измерении R_v .

Удельное объемное электрическое сопротивление диэлектрика определяют по формуле:

$$\rho_v = \frac{R_v S}{h}, \quad (1.20)$$

где R_v – объемное сопротивление, Ом;

S – площадь электрода, m^2 (диаметр электрода $d = 0,05$ м);

h – толщина диэлектрика, м.

Для определения поверхностного электрического сопротивления применяют образец диэлектрика с тремя металлическими электродами, которые подключают к мегаомметру, как указано на рисунке 1.9.

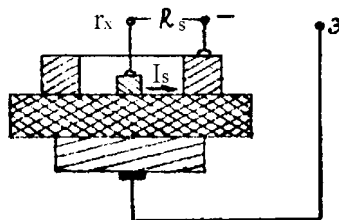


Рисунок 1.9 – Схема подключения установки при измерении R_s .

Удельное поверхностное электрическое сопротивление определяют по формуле:

$$\rho_s = R_s \frac{\pi(d_2 - d_1)}{(d_2 + d_1)}, \quad (1.21)$$

где R_s – поверхностное сопротивление, Ом;

d_2 – внутренний диаметр электрода, м; $d_2 = 0,055$ м;

d_1 – диаметр внутреннего электрода, м; $d_1 = 0,05$ м.

Исследуемые образцы поочередно помещаются в установку с электродами, которые подключены к мегаомметру, согласно рисункам 2.6, 2.7 и производится измерение сопротивлений R_v , R_s .

Результаты измерений вносятся в таблицы 1.4, 1.5.

Таблица 1.4 – Удельное объемное сопротивление диэлектриков

№ п/п	Наименование исследуемого диэлектрика	h , мм	U , В	R_v , МОм	ρ_v , Ом·м	I_v , А
1.	Бумага кабельная	0,1				
2.	Электрокартон	2				
3.	Гетинакс	2				
4.	Пленка полиэтиленовая	0,1				

Значение ρ_v рассчитывается по формуле 1.20.

Значение I_v рассчитывается по формуле:

$$I_v = \frac{U}{R_v}, \quad (1.22)$$

где U – приложенное напряжение, В (определяется по положению переключателя на приборе);

R_v – объемное сопротивление, Ом.

Таблица 1.5 – Удельное поверхностное сопротивление диэлектриков

№ п/п	Наименование исследуемого диэлектрика	U , В	R_s , МОм	ρ_s , Ом·м	I_s , А
1.	Бумага кабельная				
2.	Электрокартон				
3.	Гетинакс				
4.	Пленка полиэтиленовая				

Значение ρ_s рассчитывается по формуле 1.21.

Значение I_s рассчитывается по формуле:

$$I_s = \frac{U}{R_s}, \quad (1.23)$$

где U – приложенное напряжение, В (определяется по положению переключателя на приборе);

R_s – поверхностное сопротивление, Ом.

Для измерения C и $\operatorname{tg} \delta$ используется прибор Е7–8.

Порядок работы с прибором:

- 1) включить тумблер «Сеть» и прогреть прибор в течение 1 минуты;
- 2) установить переключатель «Запуск» в положение «Следящий»;
- 3) установить переключатель «Вид» измерения в положение соответственно C , G , $\operatorname{tg} \delta$;
- 4) переключатель «Знак C , L » в положение «АВТ»;
- 5) выводы соединительного кабеля прибора присоединить к выводам измеряемого объекта;
- 6) прочтите результат измерения на табло прибора.

Примечание – прибор не должен работать более 5 минут.

В качестве измеряемых объектов используются образцы кабельной бумаги, пропитанной и не пропитанной водой.

Результаты измерений вносятся в таблицу 1.6.

Расчет диэлектрической проницаемости производится по формуле 1.15. Угол фазового сдвига между током и напряжением φ рассчитывается по формуле 1.19.

Таблица 1.6 – Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ и ε от материала, применяемого для пропитки диэлектрика

Наименование материала	$\operatorname{tg} \delta$	δ	φ	$S, \text{ м}^2$	$h, \text{ м}$	$C, \text{ Ф}$	ε
Бумага непропитанная				0,6	0,0001		
Бумага, пропитанная водой				0,6	0,0001		

Задания

1 уровень

1. Изучить мегаомметр и порядок работы с ним согласно паспорту.
 2. Измерить электрические сопротивления R_v и R_s твердых диэлектриков (бумага кабельная, электрокартон, гетинакс, пленка полиэтиленовая) с помощью мегаомметра и схемы из трех металлических электродов согласно рисункам 1.8 и 1.9 и внести результаты измерений в таблицы 1.4, 1.5.
 3. Рассчитать объемный и поверхностный токи и удельные объемное и поверхностное электрические сопротивления. Результаты расчетов внести в таблицы 1.4, 1.5.
 4. Измерить C и $\operatorname{tg} \delta$ образцы кабельной бумаги, пропитанной и не пропитанной водой, и рассчитать угол фазового сдвига и диэлектрическую проницаемость.
- Результаты измерений внести в таблицу 1.6.

2 уровень

1. Выполнить задание уровня 1.
2. Привести зависимость тока утечки через диэлектрик от времени и векторную диаграмму токов в диэлектрике и дать им объяснение.
3. Сравнить полученные результаты со справочными значениями и сделать выводы.

3 уровень

1. Выполнить задание уровня 2.
2. Снять зависимость R_v от величины приложенного напряжения для одного из образцов (по указанию преподавателя). Результаты внести в таблицу 1.7.
3. Построить графики зависимостей $I_v = f(U)$, $R_v = f(U)$.
4. Измерить C и $\operatorname{tg} \delta$ у кабеля между жилами и между оболочкой и жилой и рассчитать мощность диэлектрических потерь по формуле 1.21 отдельно между двумя фазами и между фазой – нулем. Рассчитать мощность потерь P всего кабеля по формуле:

$$P = (P_{aAB} + P_{a0-ж})3, \quad (1.24)$$

где P_{aAB} – мощность диэлектрических потерь между двумя жилами, Вт;
 $P_{a0-ж}$ – мощность диэлектрических потерь между жилой и оболочкой (нулем), Вт.

Результаты занести в таблицу 1.8.

Таблица 1.7 – Зависимость сопротивления от приложенного напряжения

Величина напряжения, В	R_v , МОм	I_v , А	ρ_v , Ом·м
100			
500			
1000			
2500			

Таблица 1.8 – Диэлектрические потери в кабельной линии

Изоляция между фазами	$\text{tg}\delta$	С, Ф	P_a , Вт
$AB = BC = CA$			
0 – жила			

Вопросы предварительного контроля

1. Что называется током утечки?
2. Чем обусловлен ток сквозной проводимости?
3. Чем обусловлен ток абсорбции?
4. Что такое удельные объемное и поверхностное электрические сопротивления диэлектриков?
5. Виды диэлектрических потерь.
6. Что называется поляризацией диэлектриков?
7. Какие бывают виды поляризации?

Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1 уровень

1. Что называется диэлектриком?
2. Как классифицируются электроизоляционные материалы?
3. Как определяется объемный и поверхностный токи?
4. Когда возникает сквозной ток через диэлектрик?
5. Как определяется диэлектрическая проницаемость?
6. Что называется поляризацией?
7. Какие бывают виды поляризации?

2 уровень

1. Изобразите график тока утечки через диэлектрик при приложении постоянного напряжения.

2. Как определяются удельные объемное и поверхностное электрические сопротивления диэлектриков?

3. Физический смысл величины тангенса угла диэлектрических потерь.

4. Вычертите векторную диаграмму токов в диэлектрике.

5. Факторы, влияющие на величину тангенса угла диэлектрических потерь.

3 уровень

1. Покажите пути протекания объемного и поверхностного токов в низковольтном изоляторе?

2. Экспериментальным путем определите состояние изоляции представленных образцов.

3. Сформулируйте методику определения степени старения твердой изоляции.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1 уровень

- Изучить способы получения электроизоляционного материала согласно индивидуальному заданию и составить реферат.

2 уровень

- Выполнить задание уровня 1. Составить описание электроизоляционного материала согласно индивидуальному заданию, выбрать его из образцов, представленных в лаборатории. Объяснить причины выбора.

3 уровень

- Выполнить задание уровня 2. Определить область применения заданного электроизоляционного материала.

Виды электроизоляционных материалов (индивидуальные задания)

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1. Бумага кабельная. | 14. Гетинакс. |
| 2. Электрокартон. | 15. Текстолит. |
| 3. Дерево. | 16. Стеклолакоткань. |
| 4. Фибра. | 17. Стеклотекстолит. |
| 5. Лакоткань. | 18. Миканит. |
| 6. Лакобумага. | 19. Слюдопласты. |
| 7. Органическое стекло. | 20. Слюдиниты. |
| 8. Полиэтилен. | 21. Микалекс. |
| 9. Поливинилхлорид. | 22. Асбокартон. |
| 10. Эбонит. | 23. Асбоцемент. |
| 11. Микалентная бумага. | 24. Неорганическое стекло. |
| 12. Конденсаторная бумага. | 25. Фарфор. |
| 13. Пленкоэлектрокартон. | |

ПРИМЕРЫ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МОДУЛЯ

1 уровень

1. Перечислите механизмы поляризации диэлектриков.
2. Назовите и охарактеризуйте тепловые характеристики электроизоляционных материалов.
3. Назовите и охарактеризуйте электрические характеристики электроизоляционных материалов.
4. Что называется электрическим пробоем диэлектриков?
5. Назовите виды пробоя диэлектриков.
6. Какие вещества относятся к сегнетоэлектрикам?
7. Назовите достоинства и недостатки органических электроизоляционных материалов.
8. Назовите достоинства и недостатки неорганических электроизоляционных материалов.

2 уровень

1. Изобразите и объясните кривую жизни изоляции.
2. Приведите схемы замещения диэлектриков и сформулируйте условия их эквивалентности.

3 уровень

1. Сформулируйте основные направления совершенствования электроизоляционных материалов и приведите примеры их реализации.

МОДУЛЬ 2 ЖИДКИЕ, ГАЗООБРАЗНЫЕ И ТВЕРДЕЮЩИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В результате изучения модуля студент должен:

знать:

- понятия: жидкий, газообразный и твердеющий изоляционный материал, электрическая прочность, пробой, битумы, лаки, компаунды, смолы, эмали;
- классификацию, назначение жидких, газообразных и твердеющих диэлектриков, виды газообразных, жидких диэлектриков, электрические характеристики жидких диэлектриков, процессы старения и регенерации трансформаторного масла, методику испытания трансформаторного масла.
- область применения жидких, газообразных и твердеющих электроизоляционных материалов в зависимости от их свойств;

уметь:

- выбирать необходимый жидкий, газообразный, твердеющий электроизоляционный материал;
- объяснить причину выбора материала;
- определять электрическую прочность газообразных и жидких диэлектриков; проводить испытания трансформаторного масла;
- классифицировать жидкие, твердеющие диэлектрики, работать в малой группе;
- анализировать и оценивать собранные данные, работать самостоятельно.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Жидкий изоляционный материал – диэлектрик, находящийся в период выполнения изоляционной конструкции и ее эксплуатации в жидком агрегатном состоянии.

Газообразный изоляционный материал – диэлектрик, находящийся в период выполнения изоляционной конструкции и ее эксплуатации в газообразном агрегатном состоянии.

Твердеющий изоляционный материал – диэлектрик, находящийся в период выполнения изоляционной конструкции в жидком, а при ее эксплуатации в твердом агрегатном состоянии.

Электрическая прочность – минимальная напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробое диэлектрика.

Пробой – явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля

Битумы – аморфные материалы, представляющие собой сложные смеси углеводородов (обычно они содержат также некоторое количество кислорода и серы) и обладающие характерным комплексом свойств.

Лаки – это коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел в летучих растворителях.

Компаунды – отличаются от лаков отсутствием в их составе растворителя, они состоят из различных смол, битумов, воска, масел.

Смолы – это сложные смеси органических веществ (растворы синтетических, искусственных или природных смол), главным образом высокомолекулярных.

Эмали – это лаки, в состав которых входит пигмент, т. е. порошок неорганического состава (обычно – оксиды металлов), придающий пленке определенную окраску, улучшающий ее механическую прочность, теплопроводность и адгезию к поверхности, на которую нанесен лак.

Основной теоретический материал

Лекция Жидкие и твердые электроизоляционные материалы

1. Растительные масла.
2. Нефтяные масла.
3. Синтетические жидкие диэлектрики
4. Битумы.
5. Электроизоляционные лаки и эмали.
6. Электроизоляционные смолы.
7. Компаунды.

Электропроводность газов. Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают исключительно малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с молекулами.

Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи, космические лучи,

радиоактивное излучение, а также термическое воздействие (сильный нагрев газа). Электропроводность газа, обусловленная действием внешних ионизаторов, называется **несамостоятельной**.

С другой стороны, особенно в разреженных газах, возможно создание электропроводности за счет ионов, образующихся в результате соударения заряженных частиц с молекулами газа. Ударная ионизация возникает в газе в тех случаях, когда кинетическая энергия заряженных частиц, приобретаемая под действием электрического поля, достигает достаточно больших значений. Электропроводность газа, обусловленная ударной ионизацией, называется **самостоятельной**.

В слабых полях ударная ионизация отсутствует и самостоятельной электропроводности не обнаруживается. При ионизации газа, обусловленной внешними факторами, происходит расщепление молекул на положительные и отрицательные ионы. Одновременно часть положительных ионов, соединяясь с отрицательными частицами, образует нейтральные молекулы. Этот процесс называется **рекомбинацией**. Наличие рекомбинации препятствует безграничному росту числа ионов в газе и объясняет установление определенной концентрации ионов спустя короткое время после начала действия внешнего ионизатора.

Если ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено электрическое напряжение, то ионы под влиянием напряжения будут перемещаться, и в цепи возникает ток. Часть ионов будет нейтрализовываться на электродах, часть – исчезать за счет рекомбинации.

Электропроводность жидкостей. Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В неполярных жидкостях электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей, в том числе влаги; в полярных жидкостях электропроводность определяется не только примесями, но иногда и диссоциацией молекул самой жидкости. Ток в жидкости может быть обусловлен как передвижением ионов, так и перемещением относительно крупных заряженных коллоидных частиц. Невозможность полного удаления способных к диссоциации примесей из жидкого диэлектрика затрудняет получение электроизоляционных жидкостей с малыми значениями удельной проводимости.

Полярные жидкости всегда имеют повышенную проводимость по сравнению с неполярными, причем возрастание диэлектрической проницаемости приводит к росту проводимости. Сильнополярные жидкости отличаются настолько высокой проводимостью, что рас-

сматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью.

Очистка жидких диэлектриков от содержащихся в них примесей заметно повышает их удельное сопротивление. При длительном пропускании электрического тока через неполярный жидкий диэлектрик также можно наблюдать возрастание сопротивления за счет переноса свободных ионов к электродам (**электрическая очистка**).

Удельная проводимость любой жидкости сильно зависит от температуры. С увеличением температуры возрастает подвижность ионов в связи с уменьшением вязкости и может увеличиваться степень тепловой диссоциации. Оба эти фактора повышают проводимость.

В коллоидных системах наблюдается **молионная**, или **электрофоретическая** электропроводность, при которой носителями заряда являются группы молекул – молионы.

Из коллоидных систем в электротехнике используются **эмульсии** (оба компонента — жидкости), **суспензии** (твердые частицы в жидкости), аэрозоли (твердые и жидкие частицы в газе). При наложении поля молионы приходят в движение, что проявляется как явление электрофореза. Электрофорез отличается от электролиза тем, что при нем не наблюдается образования новых веществ, а лишь меняется относительная концентрация дисперсной фазы в различных слоях жидкости.

Пробой газа обуславливается явлением ударной и фотонной ионизации. Явление пробоя газа зависит от степени однородности электрического поля, в котором осуществляется пробой. В однородном поле пробой наступает практически мгновенно при достижении строго определенного напряжения, зависящего от температуры и давления газа. Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде **короны** в местах, где напряженность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения.

Разряд в воздухе у поверхности твердого диэлектрика, называемый в технике **поверхностным разрядом (перекрытием)**, возникает обычно при более низких напряжениях, чем в том случае, когда между электродами имеется только воздух. На разрядное напряжение влияют форма электрического поля, обусловленная конфигурацией электродов и диэлектрика, частота поля, состояние поверхности диэлектрика, давление воздуха.

Пробой жидких диэлектриков происходит в результате ионизационных и тепловых процессов. Одним из главных факторов,

способствующих пробоем жидкостей, является наличие в них посторонних примесей, таких как вода, газы и твердые частицы.

Жидкие диэлектрики отличаются более высокой электрической прочностью, чем газы в нормальных условиях. Повышенная электрическая прочность жидкого диэлектрика обусловлена значительно меньшей длиной свободного пробега электронов.

Растительные масла

Растительные масла – вязкие жидкости, получаемые из семян различных растений. Из этих масел особо важны **высыхающие масла**, способные под воздействием нагрева, освещения, соприкосновения с кислородом воздуха и других факторов переходить в твердое состояние. Тонкий слой масла, налитый на поверхность какого-либо материала, высыхает и образует твердую блестящую, прочно пристающую к подложке электроизоляционную пленку. Высыхание масел отнюдь не объясняется испарением части жидкости, а является сложным химическим процессом, связанным с поглощением маслом некоторого количества кислорода из воздуха. Поэтому при высыхании льняного и подобных ему масел масса масла не уменьшается, а даже несколько увеличивается. Для полного высыхания масел, например при сушке масляных лаков, необходим доступ свежего воздуха.

Наиболее распространенные высылающие масла – льняное и тунговое.

Льняное масло золотисто-желтого цвета, получается из семян льна. Его плотность 0,93–0,94 Мг/м³, температура застывания – около минус 20 °С.

Тунговое (древесное) масло получают из семян тунгового дерева, которое произрастает на Дальнем Востоке и на Кавказе. Тунговое масло не является пищевым (как льняное) и даже токсично. Плотность тунгового масла 0,94 Мг/м³, температура застывания – от 0 до минус 5 °С.

Касторовое масло получается из семян клещевины; иногда используется для пропитки бумажных конденсаторов. Плотность касторового масла 0,95–0,97 Мг/м³, температура застывания от 10 до –18 °С. Его диэлектрическая проницаемость при 20 °С составляет 4,0–4,5, а при 90 °С – 3,5–4,0; tgδ при 20 °С равен 0,01–0,03, а при 100 °С – 0,2–0,8; E_{пр} при 20 °С равна 15–20 МВ/м. Касторовое масло не растворяется в бензине, но растворяется в этиловом спирте. В отличие от нефтяных масел касторовое не вызывает набухания обычной резины.

Нефтяные электроизоляционные масла

Трансформаторное масло, которым заливают силовые трансформаторы, из всех жидких электроизоляционных материалов находит наибольшее применение в электротехнике. Его назначение двояко: во-первых, масло, заполняя поры в волокнистой изоляции, а также промежутки между проводами обмоток и между обмотками и баком трансформатора, значительно повышает электрическую прочность изоляции; во-вторых, оно улучшает отвод теплоты, выделяемой за счет потерь в обмотках и сердечнике трансформатора. Лишь некоторые силовые и измерительные трансформаторы выполняются без заливки маслом («сухие» трансформаторы). Еще одна важная область применения трансформаторного масла – масляные выключатели высокого напряжения. В этих аппаратах разрыв электрической дуги между расходящимися контактами выключателя происходит в масле или в находящихся под повышенным давлением газах, выделяемых маслом под действием высокой температуры дуги; это способствует охлаждению канала дуги и быстрому ее гашению. Трансформаторное масло применяется также для заливки маслонаполненных вводов, некоторых типов реакторов, реостатов и других электрических аппаратов.

Трансформаторные, а также другие **нефтяные** («минеральные») **электроизоляционные** масла получают из нефти посредством ее ступенчатой перегонки с выделением на каждой ступени определенной (по температуре кипения) фракции и последующей тщательной очистки от химически нестойких примесей в результате обработки серной кислотой, затем щелочью, промывки водой и сушки. Часто электроизоляционные масла дополнительно обрабатываются адсорбентами, т. е. веществами (особые типы глин или же получаемые искусственным путем материалы), которые обладают сильно развитой поверхностью и при соприкосновении с маслом поглощают воду и различные полярные примеси. Такая обработка производится или перемешиванием нагретого масла с измельченным адсорбентом с последующим отстаиванием, или же фильтрованием масла сквозь слой адсорбента (перколяция). Применяются и другие способы очистки масла.

Трансформаторное масло – это жидкость от почти бесцветной до темно-желтого цвета, по химическому составу представляющая собой смесь различных углеводов.

Трансформаторное масло – горючая жидкость; большие количества масла, находящиеся в масляных хозяйствах энергосистем, представляют собой большую пожарную опасность.

Вода легко может попасть в масло при его перевозке, хранении, переливании в недостаточно просушенную тару и т. п. Для сушки масла имеется несколько способов: пропускание под давлением сквозь фильтровальную бумагу в специальных установках – фильтр-прессах; воздействие на масло центробежной силы в центрифуге, причем вода, имеющая плотность, большую, чем у масла, отжимается к периферии сосуда и отделяется от масла; уже упоминавшаяся обработка адсорбентами; распыление нагретого масла в камере, заполненной азотом, и т. п. При сушке электрическая прочность увлажненного масла восстанавливается. Плотность трансформаторного масла 0,85–0,90 Мг/м³.

При работе в трансформаторе или ином маслонаполненном электрическом аппарате масло постепенно стареет. Масло различного происхождения обладает различной стойкостью к старению, поэтому перед введением в эксплуатацию трансформаторное масло подвергают испытанию на ускоренное старение в особо жестких условиях.

Регенерация начавшего стареть масла, т. е. удаление из него продуктов старения и восстановление исходных свойств, достигается обработкой масла адсорбентами (как говорилось выше, адсорбенты поглощают не только воду, но и другие полярные вещества; продукты старения масла являются полярными примесями в неполярном масле).

Рекомендуется добавление к трансформаторному маслу **ингибиторов** (антиокислительных присадок), которые в противоположность катализаторам замедляют старение масла: ионол, амидопирин и некоторые другие вещества.

Для каждого типа масла необходим подбор соответствующего ингибитора. Применение правильно выбранных ингибиторов позволяет увеличить срок эксплуатации масла и дает большой экономический эффект.

Помимо трансформаторного масла в электротехнической промышленности широко применяются и другие виды нефтяных электроизоляционных масел.

Конденсаторное масло служит для пропитки бумажных конденсаторов, в особенности силовых, предназначенных для компенсации индуктивного фазового сдвига. При пропитке бумажного диэлектрика повышаются как его диэлектрическая проницаемость, так и электрическая прочность. То и другое дает возможность уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость конденсатора при заданном рабочем напряжении, частоте и емкости.

Нефтяное конденсаторное масло имеет плотность 0,86–0,89 Мг/м³, температуру застывания минус 45 °С, диэлектрическую проницаемость 2,1–2,3 и tgσ 0,002 (при частоте 1 кГц). **Вазелиновое** конденсаторное масло по плотности и электрическим свойствам близко к нефтяному, но имеет более высокую температуру застывания (минус 5 °С). Электрическая прочность конденсаторных масел не менее 20 МВ/м.

Кабельные масла используются в производстве силовых электрических кабелей; пропитывая бумажную изоляцию этих кабелей, они повышают ее электрическую прочность, а также способствуют отводу теплоты потерь. Кабельные масла бывают различных типов. Для пропитки изоляции силовых кабелей на рабочие напряжения до 35 кВ в свинцовых или алюминиевых оболочках (кабели с вязкой пропиткой) применяется масло марки КМ-25 с кинематической вязкостью не менее 23 мм²/с при 100 °С, температурой застывания не выше минус 10 °С и температурой вспышки не ниже +220 °С. Для увеличения вязкости к этому маслу дополнительно добавляется какиноль или же синтетический загуститель.

Синтетические жидкие диэлектрики

Трансформаторные и другие описанные электроизоляционные материалы нефтяного происхождения обладают преимуществами, которые и обеспечили им весьма широкое применение: они сравнительно дешевы и могут изготавливаться заводами нефтеперерабатывающей промышленности в больших количествах; при хорошей очистке tgσ мал, что свойственно чистым неполярным диэлектрикам, а электрическая прочность достаточно высока.

Имеются синтетические жидкие диэлектрики, по тем или иным свойствам превосходящие нефтяные электроизоляционные масла. Рассмотрим важнейшие из них.

Хлорированные углеводороды получают из различных углеводородов путем замены в их молекулах некоторых (или даже всех) атомов водорода атомами хлора. Наиболее широкое применение имеют полярные продукты хлорирования **дифенила**, имеющие общий состав $C_{12}H_{10-n}Cl_n$. Молекула дифенила $C_{12}H_{10}$ (или $H_5C_6 - C_6H_5$) состоит из двух фенильных остатков. Чаще всего применяются смеси различных изомеров хлорированных дифенилов со средней степенью хлорирования n от 3 до 6.

Хлорированные дифенилы (ХД) обладают ϵ_r , повышенной по сравнению с неполярными нефтяными маслами: пентахлордифенил $C_{12}H_6Cl_6$ (**совол**) имеет при 50 Гц и 20 °С $\epsilon_r = 5$, а при 90 °С – $\epsilon_r =$

4,1. Поэтому замена масел на ХД при пропитке конденсаторов уменьшает объем конденсатора (при той же электрической емкости) почти в два раза. Преимуществом ХД является также их негорючесть. Однако ХД имеют и свои недостатки. Они сильно токсичны, из-за чего применение их для пропитки конденсаторов запрещено. В связи с сильно выраженной полярностью ХД на их электроизоляционные свойства весьма значительно влияют примеси; наличие примесей существенно сказывается на потерях сквозной электропроводности при повышенной температуре, но практически не влияет на tgσ в области дипольного максимума потерь. Недостатком ХД является заметное снижение их ϵ_r и, следовательно, емкости пропитанных ХД конденсаторов при пониженных температурах. Хлорированные дифенилы обладают сравнительно высокой вязкостью, что в некоторых случаях вызывает необходимость разбавления ХД менее вязкими хлорированными углеводородами.

Кремнийорганические жидкости обладают малым tgσ, низкой гигроскопичностью и повышенной нагревостойкостью. Для них характерна слабо выраженная зависимость вязкости от температуры. Как и другие кремнийорганические продукты, эти жидкости весьма дорогие. В зависимости от характера радикалов, присоединенных к атомам кремния, различают полиметилсилоксановые (ПМС), полиэтилсилоксановые (ПЭС), полифенилсилоксановые (ПФС) и другие кремнийорганические жидкости. Кремнийорганические жидкости имеют диэлектрическую проницаемость от 2,5 до 3,3 и tgσ от 0,0001 до 0,0003 (при 1 кГц и 20 °С). Наивысшая допустимая рабочая температура некоторых из этих жидкостей доходит до 250 °С (длительно) и до 350 °С (кратковременно).

Фторорганические жидкости имеют малый tgσ, ничтожно малую гигроскопичность и высокую нагревостойкость. Некоторые фторорганические жидкости могут длительно работать при температуре 200 °С и выше.

Характерными свойствами фторорганических жидкостей являются малая вязкость, низкое поверхностное натяжение (что благоприятствует пропитке пористой изоляции), высокий температурный коэффициент объемного расширения (значительно больший, чем у других электроизоляционных жидкостей), сравнительно высокая летучесть. Последнее обстоятельство требует герметизации аппаратов, заливаемых фторорганическими жидкостями. Фторорганические жидкости способны обеспечивать значительно более интенсивный отвод теплоты потерь от охлаждаемых ими обмоток и магнитопроводов, чем нефтяные масла или кремнийорганические

жидкости. Важным преимуществом фторорганических жидкостей по сравнению с кремнийорганическими является полная негорючесть и высокая дугостойкость (кремнийорганические жидкости, как и нефтяные масла, сравнительно легко загораются и горят сильно коптящим пламенем). Как и кремнийорганические соединения, фторорганические жидкости пока еще весьма дорогие.

Битумы

Битумы – аморфные материалы, представляющие собой сложные смеси углеводов (обычно они содержат также некоторое количество кислорода и серы) и обладающие характерным комплексом свойств. Они имеют черный (или темно-коричневый) цвет, при достаточно низких температурах хрупки и дают характерный излом в виде раковин. Битумы растворяются в углеводородах – легче ароматических (бензол, толуол), несколько труднее в бензине, немаслостойки. В спирте и воде битумы нерастворимы, они имеют малую гигроскопичность и в толстом слое практически водонепроницаемы. Битумы термопластичны, плотность их близка к 1 Мг/м^3 .

Различают битумы **искусственные** (нефтяные), представляющие собой тяжелые продукты перегонки нефти, и **природные** (ископаемые), называемые также асфальтами. Залежи асфальтов связаны с нефтяными месторождениями, так как в природных условиях асфальты также образовались из нефти. Асфальты обычно бывают загрязнены минеральными примесями. В электроизоляционной технике из нефтяных битумов применяют битумы марок БН-III, БН-IV и БН-V, а также более тугоплавкие спецбитумы марок В и Г. Температура размягчения для них должна быть не ниже определенных значений (от $50 \text{ }^\circ\text{C}$ для БН-III до $125 \text{ }^\circ\text{C}$ для В).

Температура размягчения асфальтов доходит до $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Более тугоплавкие битумы, как правило, имеют лучшие электроизоляционные свойства, которые медленно ухудшаются при повышении температуры; они труднее растворимы и при низких температурах более тверды и хрупки. Температура размягчения битума может быть повышена продувкой, т. е. пропусканием воздуха сквозь расплавленный битум. Повышение температуры размягчения битума происходит при этом вследствие окисления и дополнительной полимеризации битума. Если, наоборот, температуру размягчения битума требуется снизить, это может быть достигнуто сплавлением битума с небольшим количеством нефтяного масла. Добавление нефтяного масла улучшает холодостойкость битума, т. е. делает его менее хрупким при низких температурах. Битумы — слабополяр-

ные вещества с $\epsilon_r = 2,5-3,0$; $\text{tg}\delta$ около $0,01$; $E_{\text{пр}} = 10-25 \text{ МВ/м}$ и $\rho = 10^{13}-10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; эти параметры мало зависят от влажности. Битумы используются для изготовления лаков и компаундов.

Электроизоляционные лаки и эмали

Это коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел, составляющих так называемую **лаковую основу**, в летучих растворителях. При сушке лака растворитель улетучивается, а лаковая основа переходит в твердое состояние, образуя (в тонком слое) лаковую пленку.

По применению электроизоляционные лаки разделяются на три группы: пропиточные, покрывные и клеящие.

Пропиточные лаки служат для пропитки пористой, в частности, волокнистой изоляции (бумага, картон, пряжа, ткань и пр.). После пропитки поры в изоляции оказываются заполненными уже не воздухом, а высохшим лаком, имеющим значительно более высокую электрическую прочность и теплопроводность, чем воздух. Поэтому в результате пропитки повышается пробивное напряжение, увеличивается теплопроводность (это важно для отвода теплоты потерь), уменьшается гигроскопичность, улучшаются механические свойства изоляции. После пропитки органическая волокнистая изоляция в меньшей мере подвергается окисляющему влиянию воздуха, а потому ее нагревостойкость повышается.

Покрывные лаки служат для образования механически прочной, гладкой, блестящей, влагостойкой пленки на поверхности твердой изоляции (часто – на поверхности предварительно пропитанной пористой изоляции). Такая пленка повышает напряжение поверхностного разряда и поверхностное сопротивление изоляции, создает защиту лакируемого изделия от действия влаги, растворителей и химически активных веществ, а также улучшает внешний вид изделия и затрудняет прилипание к нему загрязнений.

Некоторые покрывные лаки (**эмаль-лаки**) наносят не на твердую изоляцию, а непосредственно на металл, образуя на его поверхности электроизоляционный слой (например, изоляция эмалированных проводов, изоляция листов электротехнической стали в магнитопроводах).

К покрывным лакам принадлежат также **пигментированные эмали**; это – лаки, в состав которых входит пигмент, т. е. порошок неорганического состава (обычно – оксиды металлов), придающий пленке определенную окраску, улучшающий ее механическую прочность, теплопроводность и адгезию к поверхности, на которую

нанесен лак. В полупроводящих лаках пигментом является углерод (сажа); пленки таких лаков имеют низкое удельное поверхностное сопротивление (от 10^2 до 10^{10} Ом) и наряду с лентами из железистого асбеста используются в производстве электрических машин на высокие рабочие напряжения.

Клеящие лаки применяются для склеивания между собой твердых электроизоляционных материалов (например, клейка листочков расщепленной слюды при изготовлении миканитов) или для приклеивания их к металлу. Помимо высоких электроизоляционных свойств и малой гигроскопичности (общие требования для всех электроизоляционных лаков), клеящие лаки должны обеспечивать особо высокую адгезию к склеиваемым материалам.

Приведенное разделение лаков по областям применения не всегда может быть выдержано достаточно строго. Так, при изготовлении гетинакса и текстолита лак, пропитывающий отдельные слои бумаги или ткани и склеивающий эти слои друг с другом, является одновременно пропиточным и клеящим.

По режиму сушки различают **лаки горячей** (печной) **сушки**, которые требуют для сушки повышенной температуры (выше 70°C), и **лаки холодной** (воздушной) **сушки**, которые достаточно быстро и хорошо сохнут при комнатной температуре.

Смоляные лаки – растворы синтетических, искусственных или природных смол.

Бакелитовые лаки – растворы бакелита (в стадии А) в спирте. Это пропиточные и клеящие терморезистивные лаки, дающие механически прочную, но малоэластичную и обладающую заметной склонностью к тепловому старению пленку. Они используются в производстве гетинакса и текстолита, при изготовлении изоляции электрических аппаратов высокого напряжения и т. п.

Глифталевые лаки – это растворы глифталевой смолы в смеси спиртов с жидкими углеводородами и тому подобных растворителях. Это терморезистивные лаки, обладающие клеящей способностью и используемые для клейки миканитов, микаленты; гибкость их пленок выше, чем пленки бакелитового лака, но влагостойкость ниже.

Кремнийорганические лаки требуют сушки при повышенной температуре и образуют нагрето- и влагостойкие пленки.

Поливинилхлоридные лаки стойки к действию бензина, масла, многих химически активных веществ и применяются как покрывные лаки для защиты изоляции, работающей, например, в содержащей кислотные пары атмосфере.

Целлюлозные лаки – растворы эфиров целлюлозы; пленки их термопластичны. Большая часть целлюлозных лаков – лаки холодной сушки. Особое значение из них имеют нитроцеллюлозные лаки (**нитролаки**). Пленки нитролаков механически прочны, отличаются блеском, хорошо сопротивляются действию воздуха, влаги, масел и пр. Нитролаки применяют также для пропитки хлопчатобумажных оплеток автомобильных и самолетных проводов (поверх слоя резиновой изоляции) с целью защиты резины от влияния озона, масла и бензина.

Масляные лаки. Основу этих лаков составляют высыхающие масла. В их состав входят также сиккативы, ускоряющие процесс отверждения пленки, и растворители (бензин или керосин, иногда с примесью ароматических углеводородов). Иногда употребляют масляные лаки без растворителей, поскольку их основа сама по себе является жидкостью, но такие лаки имеют повышенную вязкость и менее удобны для применения.

Масляные лаки применяют для производства светлых лакотканей и лакобумаг, а также для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов; в частности, они могут быть использованы для пропитки обмоток маслонаполненных трансформаторов, так как запеченная пленка этих лаков маслостойка. Однако такие лаки менее влагостойки, чем «черные» масляно-битумные.

Масляные лаки быстрой горячей («огневой») сушки применяют при эмалировании листовой электротехнической стали для расслоенных магнитопроводов электрических машин и аппаратов с целью изоляции листов друг от друга, чтобы уменьшить потери на вихревые токи в переменных магнитных полях. Растворитель таких лаков – труднолетучий (керосин). Листы стали на конвейерной установке покрывают лаком и затем быстро пропускают сквозь печь, в которой поддерживают температуру около 500°C .

Черные лаки. В состав этих лаков входят битумы, которые и определяют черный цвет как жидкого лака, так и лаковой пленки. По сравнению с масляными лаками они дешевле и образуют менее гигроскопичные пленки с более высокими электроизоляционными свойствами, слабо подверженные старению, но зато менее эластичные. Пленки битумных лаков практически немаслостойки и заметно растворяются в легких углеводородах, особенно ароматических. При нагреве пленки этих лаков склонны к размягчению.

Битумные лаки – растворы битумов в органических растворителях – являются лаками холодной сушки; эти лаки в качестве электроизоляционных непригодны, так как у них особенно резко выра-

жены указанные выше отрицательные свойства лаковой пленки: малая гибкость, низкая нагревостойкость и небольшая стойкость к растворителям. Обычно такие лаки используют в качестве антикоррозионных покрытий металлических изделий.

Масляно-битумные лаки помимо битумов содержат в своей основе высыхающие масла. Свойства этих лаков занимают промежуточное положение между свойствами чисто битумных и чисто масляных лаков; благодаря присутствию высыхающих масел пленки данных лаков более гибки, менее подвержены действию растворителей и размягчению при нагреве, чем пленки битумных лаков.

Наилучшими растворителями для масляно-битумных лаков являются углеводороды (бензол, толуол), а также скипидар. Вследствие значительной вредности паров, особенно бензола, для организма человека, эти растворители применяются в смеси с бензином.

Масляно-смоляные лаки – это масляные лаки на основе природных или синтетических смол. Отметим масляно-глифталевые лаки; по сравнению с чисто масляными лаками они обладают повышенной эластичностью, нагревостойкостью и клеящей способностью, а по сравнению с чисто глифталевыми лаками – пониженной гигроскопичностью. Такие лаки широко применяют для пропитки обмоток маслонаполненных трансформаторов, обеспечивая маслоустойчивость и высокую механическую прочность пропитанных обмоток; для пропитки обмоток, подвергающихся действию кислотных паров и хлора; для покрытия изоляции, содержащей фенолформальдегидные смолы, с целью повышения трекинговостойкости изоляции.

Электроизоляционные смолы

Канифоль – хрупкая смола, получаемая из живицы (природной смолы сосны) после отгонки ее жидких составных частей (скипидара). Канифоль в основном состоит из органических кислот (абиединовой и других); соли этих кислот, получающиеся при нагреве канифоли с соответствующими металлами или их оксидами, называются **резинатами**. Канифоль растворима в нефтяных маслах (особенно при нагреве) и других углеводородах, растительных маслах, спирте, скипидаре и пр.

Копалы – тугоплавкие смолы с характерным блеском, большой твердостью, сравнительно труднорастворимые. Эти смолы добывают частично как ископаемые продукты разложения ранее произраставших деревьев-смолоносов, частично как смолы ныне растущих деревьев (преимущественно в тропических странах). Копалы применяют в качестве добавки к масляным лакам, увеличивающей твердость их пленок.

Компаунды

Компаунды отличаются от лаков отсутствием в их составе растворителя. Они состоят из различных смол, битумов, воска, масел; если компаунд в исходном состоянии тверд, его перед употреблением нагревают до необходимой температуры, чтобы получить массу достаточно низкой вязкости.

По применению компаунды делятся на две основные группы.

Пропиточные компаунды, назначение которых аналогично назначению пропиточных лаков.

Заливочные компаунды служат для заполнения сравнительно больших полостей, промежутков между различными деталями в электрических машинах и аппаратах, а также для получения сравнительно толстого покрытия на тех или иных электротехнических деталях, узлах, блоках. Применение заливочных компаундов преследует цели защиты изоляции от увлажнения и от действия химически активных веществ, увеличения разрядного напряжения, улучшения условий отвода теплоты и пр.

В кабельной технике большое значение имеют **кабельные компаунды**. К ним относятся: а) пропиточные компаунды (**пропиточные кабельные массы**), служащие для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей и изготовляющиеся из нефтяного масла, к которому для повышения вязкости добавляют канифоль или синтетические смолы; б) заливочные компаунды (**заливочные кабельные массы**), применяемые для заливки соединительных, ответвительных и концевых муфт. Заливка компаундом разделанных концов кабелей в муфтах имеет целью устранение возможности проникновения влаги в изоляцию кабелей и повышение пробивных напряжений между отдельными разделанными жилами кабеля и между жилами и корпусом муфты. Заливочные кабельные массы состоят из битумов или же (для кабелей на более высокое напряжение) из нефтяного масла и канифоли.

Существуют **эпоксидные компаунды**, представляющие собой эпоксидную смолу с добавлением наполнителей, пластификаторов и других ингредиентов. Непосредственно перед употреблением компаунда в него вводится отвердитель; в зависимости от вида отвердителя эпоксидные компаунды могут отверждаться или на холоде, или при нагреве.

Эпоксидные компаунды в последнее время применяются, в частности, в качестве кабельных заливочных масс; благодаря высокой механической прочности отвержденного эпоксидного компаунда в некоторых случаях залитая таким компаундом муфта может выполняться без металлического кожуха.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие бывают растительные масла?
2. Где применяется трансформаторное масло?
3. Назовите достоинства и недостатки трансформаторного масла.
4. Где применяются битумы?
5. Как делятся по назначению лаки?
6. Что называется эмалями?
7. Перечислите виды смол.
8. Что называется компаундами?
9. Что такое регенерация трансформаторного масла?
10. Принцип очистки трансформаторного масла при помощи термосифонного фильтра.
11. Как классифицируются лаки по химическому составу?
12. Что называется термопластичными и терморезистивными компаундами?
13. Области применения компаундов.
14. Где применяются масляно-битумные лаки?
15. Опишите методы восстановления трансформаторного масла.
16. Дайте сравнительную характеристику синтетических жидких диэлектриков.
17. Предложите способы улучшения свойств электроизоляционных лаков.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа «Методика испытания трансформаторного масла»

Общие сведения

Применение электроизоляционных жидкостей позволяет обеспечить надежную и длительную работу электрической изоляции находящихся под напряжением элементов конструкции и отводить от них теплоту, выделяющуюся при работе.

В электротехнике в качестве жидкого диэлектрика наибольшее применение получило трансформаторное масло.

Применяется трансформаторное масло для изоляции в трансформаторах, для охлаждения магнитопровода и обмоток, в масляных выключателях для гашения электрической дуги, для заливки маслонаполненных вводов, некоторых типов реакторов, реостатов (в шахтных подъемных установках).

Взвешенный углерод хорошо проводит ток. Кроме того, частицы угля оседают на изоляторах или на других погруженных в масло деталях масляного выключателя, создают проводящий слой, который может быть причиной перекрытия и короткого замыкания.

Растворенные в масле кислые вещества действуют на твердую изоляцию (бумагу, картон, пряжу и пр.) и металлы (стенки бака, медь, алюминий, обмотки).

Осадки могут покрыть сплошным слоем выемную часть трансформатора, чем ухудшают условия охлаждения, приводят к повышению температуры обмоток и порчи изоляции. При этом продукты начавшегося старения приводят к ускорению старения масла.

Трансформаторное масло с ухудшенными характеристиками может быть восстановлено методами сушки, очистки и регенерации.

Образцы трансформаторного масла с различной степенью старения и загрязнения масла, силикагель и воздействие его на трансформаторное масло представлены на стенде. Свойства масла и характеристики должны отвечать требованиям ГОСТа.

Для наблюдения за состоянием трансформаторного масла при хранении и в процессе эксплуатации оно периодически подвергается испытаниям. Испытания разделяют на два вида.

1. На пробой (определение электрической прочности, кроме того, воды, наличие механических примесей, содержание взвешенного углерода).

2. Сокращенный анализ, который включает все пункты первого вида испытаний и дополнительно определение температуры вспышки паров, содержания органических кислот и щелочей.

Таблица 1.9 – Основные характеристики трансформаторного масла

Характеристики	Единицы измерения
Цвет	Желтый
Удельное объемное сопротивление	$10^{14}-10^{15}$ Ом·м
Плотность при 20 °С	0,88 г/см ³
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20 °С и 50 Гц (не более)	0,003
Диэлектрическая проницаемость	2,1–2,2
Электрическая прочность при 20 °С и 50Гц (не ниже)	18 кВ/мм
Рабочая температура	95 °С
Температура вспышки паров	135 °С
Температура застывания (не выше)	–45 °С
Температурный коэффициент расширения	0,00070 1/°С
Коэффициент теплопроводности при 20–90 °С	0,002 Вт/см.град

Определение наличия механических примесей и прозрачность

При техническом контроле масла определение содержания в нем механических примесей производится визуально по внешнему виду пробы масла.

Проба масла должна быть в банке из светлого стекла емкостью 0,5 литра. Банка медленно переворачивается и производится наблюдение в проходящем дневном или электрическом свете за осаждением механических примесей. Если в пробе имеется более 10 ворсинок или мелких частиц примесей, то масло считается загрязненным.

Определение механических примесей производится в свежем и эксплуатационном масле.

В том случае, если при испытании масла неясен характер механических примесей, могут быть использованы другие способы (при полном химическом анализе).

При выполнении данного пункта наличие механических примесей необходимо определить на глаз.

Прозрачность трансформаторного масла определяется на глаз. При определении прозрачности масла использовать тот же образец, что и при определении механических примесей.

Результаты занести в протокол.

Определение содержания взвешенного углерода

Определение содержания углерода производится в пробах масла из масляных выключателей.

При разложении масла электрической дугой образуются углекислые частицы черного цвета (углекислый шлак), который принято называть взвешенным углеродом.

Масло, содержащее взвешенный углерод, имеет синеватый оттенок и обладает более сильной флуоресценцией, чем чистое масло.

Методика испытания

Испытываемое масло выливается в плоскую шириной 100 мм стеклянную банку из белого стекла и помещается в прибор (рисунок 1.10).

На задней стенке его приклеивается листок с нанесенными черной тушью тремя линиями толщиной 1,0; 0,5; 0,1 мм.

Содержание взвешенного углерода устанавливается просвечиванием слоя масла (толщиной 100–120 мм) электрической лампой мощностью 25 Вт.

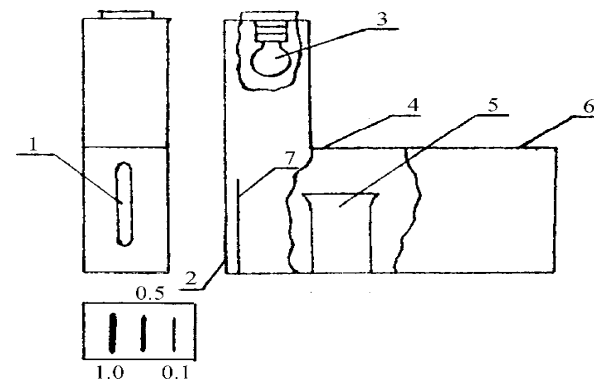


Рисунок 1.10 – Установка для определения взвешенного углерода: 1 – щель (ширина 5 мм); 2 – задняя стенка ящика со шкалой; 3 – лампа (25 Вт); 4 – крышка; 5 – банка с маслом; 6 – фанерный ящик; 7 – лист с нанесенными тушью линиями

Просмотр линии производится через щель шириной 5 мм, которая находится на расстоянии 500 мм от черных линий.

Степень загрязненности масла углем определяется в зависимости от видимости линий:

- а) через слой масла четко и ясно видны все три линии – масло годно для эксплуатации;
- б) линия 0,5 мм видна нечетко, линия 1 мм – четко – масло должно быть очищено при помощи фильтр-пресса;
- в) линия 0,5 мм не видна – масло должно быть сменено и подвергнуто регенерации.

Результаты исследования образца масла занести в протокол.

Определение температуры вспышки паров

Температурой вспышки называется температура, при которой пары масла, нагреваемого в закрытом сосуде, образуют с воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении к ней воспламенителя.

Вспышка происходит настолько быстро, что масло не успевает нагреваться и загораться.

Если масло нагревать выше температуры вспышки, то наступает такой момент, когда при поднесении нагретой спирали или пламени к маслу, оно загорается. Температура, при которой масло загорается и горит не менее 5 с, называется температурой воспламенения.

Температура вспышки определяется с помощью специальных приборов, в частности ПТВ-1.

Порядок проведения испытания

1. Установить предохранитель-переключатель в положение, соответствующее напряжению сети 220 или 127 В.
2. Проверить крепление спирали воспламенителя.
3. Включить прибор тумблером в сеть.
4. Кратковременно, в течение 5 с при нажатии кнопки (**кн**) проверить степень нагрева спирали. Спираль должна накаляться до ярко-красного цвета.
5. Снять воспламенитель, закрыть блок вспышки крышкой.
6. Поставить тумблер диапазона измерения температур в положение 50 + 150 °С, переключатель скорости подъема температуры в положение (**б**), включить дополнительный нагрев.
7. Пока идет подогрев установки, заполнить тигель с меткой (**М**) исследуемым маслом до уровня верхней кромки стержня или кольцевой канавки (в зависимости от конструкции тигля).

8. После нагрева прибора до температуры 85–90 °С выключить дополнительный нагрев и переключатель скорости подъема температуры поставить в нулевое положение.

9. Снять с блока крышку, установить тигель с исследуемым маслом, вставить воспламенитель, спираль воспламенителя должна быть ниже верхнего края тигля на 0,2–0,4 мм. Закрыть блок крышкой.

10. Поставить тумблер скорости подъема температуры в положение (**б**), включить дополнительный нагрев.

11. За 20–30 °С до предполагаемой температуры вспышки выключить дополнительный нагрев (для трансформаторного масла +135 °С). Переключатель скорости подъема температуры установить в положение, обеспечивающее скорость нарастания температуры не более 2 °С в минуту.

За 10–15 °С до предполагаемой вспышки кратковременно, в течение 6 сек. нажать кнопку вспышки. Вспышку наблюдать визуально через смотровое стекло крышки бака.

Показания измерительного прибора в момент вспышки соответствуют температуре вспышки масла. Повторное определение проводить после охлаждения блока на 20–30 °С.

Расхождение между двумя параллельными определениями не должно превышать ± 6 °С. За температуру вспышки принимается среднее значение двух определений.

При барометрическом давлении, отличающемся от нормального (760 мм рт. ст.) на 15 мм рт. ст. и более, в показанную термометром температуру вспышки вводится поправка.

Все данные по проверке и испытанию масла заносятся в протокол испытания.

Определение наличия нерастворившейся воды

Наличие нерастворившейся воды устанавливается по мути, заметной при рассмотрении масла, налитого в тонкую стеклянную пробирку, на свет.

Капельки воды появляются также на дне сосуда после отстаивания масла в течение 15–20 минут.

Порядок проведения испытания

Наливают в чистую сухую пробирку масло, подвергающееся проверке, предварительно прополоскав эту пробирку испытуемым маслом. На горелке, спиртовке или электроплитке нагревается докрасна металлический прут и опускается в пробирку с маслом. При

этом, если послышится потрескивание, то это значит, что в масле присутствует влага.

Применяется в настоящее время и другой способ для определения наличия воды в масле.

Небольшую пробирку тщательно высушивают открытым пламенем. При этом надо следить за тем, чтобы высушивание шло снизу вверх и чтобы пламя не касалось тех частей стеклянной стенки, на которые осаждается вода, отогнанная снизу, в противном случае пробирка может лопнуть. Пробу масла энергично встряхивают и вводят 5 мл испытуемого масла в немного охлажденную, но еще теплую пробирку.

Затем пробирку нагревают на открытом пламени или масляной бане до температуры 150 °С. Возникающее при этом потрескивание или шуршание свидетельствует о наличии влаги в масле.

Определить наличие влаги в масле по одному из способов, предложенных преподавателем.

Результаты занести в протокол.

Аудиторные задания

1 уровень

Изучить методы испытания трансформаторного масла. Привести в отчете методики испытаний и эскизы используемого оборудования.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Провести испытания трансформаторного масла: на температуру вспышки паров, на содержание механических примесей, на содержание взвешенного углерода, на наличие влаги, составить протоколы проведения опытов. Дать заключение о пригодности масла к эксплуатации.

Лабораторная работа

«Определение электрической прочности жидких и газообразных диэлектриков»

Общие сведения

Трансформаторное масло – жидкость от почти бесцветной до темно-желтого цвета, по химическому составу представляющая собой смесь различных углеводородов. Трансформаторное масло получают из нефти путем ее ступенчатой перегонки.

Достоинства трансформаторного масла:

1) высокая электрическая прочность;

2) доступность и малая стоимость.

Недостатки:

1. Пожароопасность.

2. Взрывоопасность (под действием высоких температур масло разлагается с образованием водорода – 70 % (по объему), ацетилен – 22 %, метана – 5 %, этилена – 3 %. В смеси с воздухом при некотором определенном соотношении объемов этих газов образуется взрывчатая смесь).

3. Высокая гигроскопичность.

Масло достаточно легко воспринимает влагу. Причем вода в масле может быть в различных видах: в растворе – в виде мельчайших взвешенных капелек (эмульсия) или в виде избыточной воды, которая не смешивается с маслом и осаждается на дно сосуда. Примесь воды в количестве до 0,01 % (особенно в виде эмульсии) снижает электрическую прочность масла настолько, что делает его непригодным для работы в электрических аппаратах даже при низком напряжении. Такая большая зависимость электрической прочности масла от содержания влаги объясняется тем, что диэлектрическая проницаемость воды (около 80) значительно больше, чем масла (2,1–2,4).

Под влиянием сил электрического поля капельки воды приобретают удлиненную форму в направлении силовых линий и втягиваются в места с наибольшей напряженностью поля.

Волокнистые примеси еще в большей степени снижают электрическую прочность масла. Они более гигроскопичны, чем масло, хорошо впитывают в себя воду и становятся при этом полупроводящими частицами.

4. Недостаточная стабильность.

С течением времени, особенно в работающем аппарате, качество даже совершенно чистого масла ухудшается. В результате действия температуры, влияния воздуха (озона), соприкосновения масла с металлами появляются продукты распада. Масло теряет свою прозрачность, темнеет, в нем появляются механические примеси, взвешенный углерод, вода, кислоты, смолы. Масло стареет.

В соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации (ПТЭ) масло трансформаторов подвергается испытаниям в следующие сроки:

1) не реже одного раза в 3 года у трансформаторов, работающих с термосифонным фильтром (сокращенный анализ);

2) один раз в год для трансформаторов, работающих без термосифонного фильтра (сокращенный анализ);

3) после капитальных ремонтов

Газообразными диэлектриками являются все газы и их смеси, в том числе и воздух. Электропроводность газообразных диэлектриков обусловлена наличием в них электрически заряженных частиц – электронов и ионов.

При приложении к слою газа электрического напряжения в нем возникает ток проводимости. С дальнейшим повышением напряжения наступает пробой газа, который в однородном электрическом поле происходит в виде искрового разряда (искры).

Пробой газообразных диэлектриков в неоднородных электрических полях проходит ряд промежуточных стадий неполного пробоя газа (электрическая корона, кистевой разряд). Типичными электродами, образующими неоднородные (неравномерные) электрические поля, являются: острие–плоскость; острие–острие; цилиндр внутри цилиндра и др. Наибольшая неоднородность электрического поля создается между электродами острие–плоскость. На пробой газа в неоднородных электрических полях оказывают влияние степень неоднородности поля, полярность и форма электродов.

Пробивное напряжение газообразных диэлектриков возрастает с увеличением их плотности, зависящей от давления и температуры.

Влажность газообразных диэлектриков также оказывает влияние на величину пробивного напряжения, которое возрастает с увеличением влажности газа, но только до насыщения влагой (точка росы).

Образование капелек воды на электродах в газе вызывает понижение пробивного напряжения газа.

Явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля называется электрическим или просто пробоем. Минимальное приложенное к диэлектрику электрическое напряжение, приводящее к его пробую, получило название пробивного напряжения.

Пробой изоляции представляет собой одно из серьезнейших повреждений электротехнического оборудования и часто имеет следствием невозможность его дальнейшего использования.

Минимальная напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробую диэлектрика, получила название электрической прочности диэлектрика или пробивной напряженности:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \quad (1.25)$$

где $U_{\text{пр}}$ – минимальное значение пробивного напряжения, кВ или МВ;

h – толщина диэлектрика в месте пробоя, м.

В системе СИ $E_{\text{пр}}$ выражается в МВ/м и В/м ($1 \text{ МВ/м} = 10^6 \text{ В/м}$).

На практике чаще всего электрическая прочность выражается в кВ/мм, т. е. пробивное напряжение измеряется в кВ, а толщина диэлектрика в мм.

Электрическая прочность является одной из основных характеристик электроизоляционного материала. Ею широко пользуются при расчетах электрической изоляции машин, трансформаторов, кабелей и других устройств, а также для оценки их надежности и долговечности.

Именно она определяет величину номинального напряжения электрооборудования.

Для определения электрической прочности жидких и газообразных диэлектриков в лабораторной работе используется аппарат АИМ-80.

Описание лабораторной установки и хода выполнения лабораторной работы

Определение электрической прочности трансформаторного масла

Для получения надежных результатов методика проведения опыта по определению электрической прочности масла строго стандартизирована. Она включает следующие условия:

- 1) пробу масла следует брать в абсолютно чистую и сухую стеклянную или алюминиевую посуду, закрыть стеклянной пробкой. При взятии пробы сначала сливают отстой и эмульсию, посуду прополаскивают 3–4 раза;
- 2) используются абсолютно чистые и сухие сосуд и электроды, после чистки и промывки нельзя касаться их внутренней поверхности;
- 3) используются латунные или медные шлифованные полусферические электроды диаметром 25 мм;
- 4) разрядный промежуток устанавливается равным 2,5 мм;
- 5) испытуемое масло берется в объеме 100–200 см³;
- 6) напряжение должно подниматься со скоростью не более 1–1,5 кВ в с;
- 7) следует делать шесть пробоев, первый из которых не учитывается при расчете среднего значения пробивного напряжения.

Испытание трансформаторного масла осуществляется на маслопробойнике, например, аппарата АИМ-80.

В нерабочем состоянии сосуд для испытания следует хранить заполненным жидким диэлектриком. Если испытательный сосуд дли-

тельно не использовался, его необходимо тщательно почистить. Расстояние между электродами устанавливается при помощи прилагаемого к аппарату щупа в виде пластинки с закругленными краями, оно должно быть равным $2,5 \pm 0,1$ мм.

Внимание!

1. Прежде чем приступить к испытаниям, проверить заземление аппарата прилагаемым к нему гибким медным проводом, сечение которого не менее 4 мм^2 .

Работа без заземления запрещается!

2. Установку и выемку испытательного сосуда следует производить только после выключения сетевого выключателя аппарата!

Порядок работы с аппаратом АИМ-80 изложен в паспорте прибора.

Всего для каждого образца масла следует произвести 6 пробоев, результаты вносятся в таблицу 1.10.

Таблица 1.10 – Электрическая прочность трансформаторного масла

H , мм	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр4}$, кВ	$U_{пр5}$, кВ	$U_{пр6}$, кВ	$U_{пр\cdot ср}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм

За электрическую прочность масла принимают среднее арифметическое значение пяти последних пробоев (напряжение первого пробоя в расчет не принимается).

Вся определенная электрическая прочность относится к промежутку $2,5$ мм стандартного разрядника.

Электрическая прочность $E_{пр}$ находится по формуле (1.25)

Определение $E_{пр}$ воздуха в однородном электрическом поле

Для этого используется аппарат АИМ-80. Расстояние между электродами аппарата устанавливается при помощи щупов и производится по три пробоя.

Результаты испытаний и расчетов вносятся в таблицу 1.11.

Таблица 1.11 – Зависимость пробивного напряжения и электрической прочности воздуха в однородном электрическом поле от толщины диэлектрика

Расстояние между электродами, мм	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр\cdot ср}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм
5					
10					
15					
20					

Определение $E_{пр}$ воздуха в неоднородном электрическом поле

Для этого также используется аппарат АИМ-80. Расстояние между электродами аппарата устанавливается при помощи щупов и производится по три пробоя.

Для создания неоднородного электрического поля производится замена одного из электродов (полусфера) в аппарате АИМ-80 на электрод – игла.

Результаты испытаний и расчетов вносятся в таблицу 1.12.

Таблица 1.12 – Зависимость пробивного напряжения и электрической прочности в неоднородном электрическом поле от толщины диэлектрика

Расстояние между электродами, мм	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр\cdot ср}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм
5					
10					
15					
20					

Задания

1 уровень

1. Изучить аппарат АИМ-80 и порядок работы с ним согласно паспорту.

2. Измерить $U_{пр}$ для трансформаторного масла и воздуха в однородном и неоднородном электрических полях и внести результаты в таблицы 3.2–3.4.

3. Рассчитать $E_{пр}$ для трансформаторного масла и воздуха в однородном и неоднородном электрических полях. Результаты расчетов внести в таблицы 3.2–3.4.

2 уровень

1. Выполнить задание уровня 1.
2. Описать виды пробоев диэлектриков, привести особенности электрохимического и теплового пробоев.

3 уровень

1. Выполнить задание уровня 2.
2. Построить графические зависимости $U_{пр} = f(h)$ для воздуха в однородном и неоднородном электрических полях.
3. Дать анализ полученных результатов.

Вопросы предварительного контроля

1. Что называется электрической прочностью?
2. Какие факторы влияют на электропроводность трансформаторного масла?
3. Какие факторы, влияют на электропроводность газообразных диэлектриков?
4. Что называется электрохимическим пробоем?
5. Чем отличается тепловой пробой от электрохимического?

Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1 уровень

1. Какой принцип работы аппарата АИМ-80?
2. Назовите достоинства и недостатки трансформаторного масла.
3. Критерии пригодности трансформаторного масла к эксплуатации.
4. Назовите сроки испытания трансформаторного масла.
5. Каков механизм пробоя газа?
6. Чем обусловлена электропроводность газов?

2 уровень

1. Что влияет на пробой газа в неоднородных электрических полях?
2. Объясните, почему $E_{пр}$ в однородном электрическом поле больше, чем в неоднородном поле?
3. Влияние примесей на пробивное напряжение трансформаторного масла.

4. Объясните причину недостаточной стабильности свойств трансформаторного масла при эксплуатации.

3 уровень

1. Назовите современные жидкие диэлектрики, их основные свойства и характеристики, область применения.
2. Назовите современные газообразные диэлектрики, их основные свойства и характеристики, область применения.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПО ТЕМЕ «ГАЗООБРАЗНЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ»

1 уровень

Изучить классификацию газообразных электроизоляционных материалов и представить ее в виде реферата.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1 и дополнить реферат описанием производства и области применения газообразных диэлектриков.

3 уровень

Выполнить задание уровня 1 и дополнить реферат описанием использования вакуума в качестве диэлектрика.

ПРИМЕРЫ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ МОДУЛЯ

1 уровень

1. Какие бывают виды нефтяных масел?
2. Где применяются синтетические жидкие диэлектрики?
3. Назовите виды твердых электроизоляционных материалов.
4. Что такое элегаз?
5. Приведите формулу для определения электрической прочности диэлектриков.
6. Что называется температурой вспышки паров жидкого диэлектрика?
7. Как делятся лаки по способу сушки?
8. Перечислите основные виды искусственных смол.
9. Назовите основные характеристики трансформаторного масла.

МОДУЛЬ 3 ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2 уровень

1. Назовите достоинства газообразных диэлектриков по сравнению с твердыми.
2. Объясните явление образования коронного разряда.
3. От каких факторов зависит напряжение пробоя жидких диэлектриков?
4. Изложите методику испытания трансформаторного масла.

3 уровень

1. Дайте сравнительную характеристику твердеющих и жидких электроизоляционных материалов.
2. Дайте сравнительную характеристику синтетических жидких диэлектриков и нефтяных масел.

В результате изучения модуля студент должен

знать:

- понятия: проводниковый материал, электронная и ионная проводимость, сверхпроводник, криопроводник, температурный коэффициент удельного сопротивления;
- строение молекул проводниковых материалов, энергетическую диаграмму проводников, механизм электропроводности, классификацию проводниковых материалов, материалы высокой проводимости, сплавы высокого сопротивления, сверхпроводники;
- область применения проводниковых материалов в зависимости от их свойств;

уметь:

- выбирать необходимые проводниковые материалы и изделия, объяснить причину выбора материала, определять свойства выбранного материала и оценивать их изменение в процессе работы электроустановки, работать в малой группе;
- умение анализировать и оценивать собранные данные, работать самостоятельно.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Проводниковый материал – это материал, проводящий электрический ток.

Электронная проводимость – обусловлена движением (дрейфом) свободных электронов под воздействием электрического поля.

Ионная проводимость – обусловлена прохождением через вещества вместе с электрическими зарядами ионов.

Сверхпроводник – материал, который обладает ничтожно малым удельным электрическим сопротивлением при температурах, близких к абсолютному нулю.

Криопроводимость – достижение металлами весьма малого значения удельного сопротивления при криогенных температурах (но без перехода в сверхпроводящее состояние).

Температурный коэффициент удельного сопротивления – величина, характеризующая изменение удельного сопротивления проводника в зависимости от его температуры.

Основной теоретический материал

Лекция Проводниковые материалы и их характеристики

1. Основные свойства и характеристики проводниковых материалов.
2. Материалы высокой проводимости.
3. Материалы высокого удельного сопротивления.
4. Неметаллические проводниковые материалы.

Основные свойства и характеристики проводниковых материалов

В качестве проводников электрического тока могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях – и газы. Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются **металлы** и их **сплавы**.

Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены **металлы высокой проводимости**, имеющие удельное сопротивление ρ при нормальной температуре не более $0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, и **сплавы высокого сопротивления**, имеющие ρ при нормальной температуре не менее $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Металлы высокой проводимости используются для проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов и т. п. Металлы и сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. п.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты.

Механизм прохождения тока в металлах – как в твердом, так и в жидком состоянии – обусловлен движением (дрейфом) свободных электронов под воздействием электрического поля; поэтому металлы называют **проводниками с электронной электропроводностью** или **проводниками первого рода**. **Проводниками второго рода**, или **электролитами**, являются растворы (в частности, водные) кислот, щелочей и солей. Прохождение тока через эти вещества связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов в соответствии с законами Фарадея, вследствие чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза.

Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряжениях электрического поля не являются проводниками. Однако, если напряженность поля превзойдет некоторое критическое значение, обеспечивающее начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником с электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема представляет собой особую проводящую среду, носящую название **плазмы**.

Твердый проводник (металл) может быть представлен в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из коллективизированных (свободных) электронов. В свободное состояние от каждого атома металла переходит от одного до двух электронов. При столкновениях электронов с узлами кристаллической решетки энергия, накопленная при ускорении электронов в электрическом поле, передается металлической основе проводника, вследствие чего он нагревается.

К важнейшим характеристикам проводников относятся: удельная проводимость γ или обратная ей величина – удельное сопротивление ρ ; температурный коэффициент удельного сопротивления TK_ρ или α_ρ ; контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термоЭДС); работа выхода электронов из металла; предел прочности при растяжении σ_p и относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$.

Удельная проводимость и удельное сопротивление проводников. Связь плотности тока J (в амперах на квадратный метр) и напряженности электрического поля (в вольтах на метр) в проводнике дается известной формулой (дифференциальная форма закона Ома):

$$J = \gamma E, \quad (1.26)$$

где γ – параметр проводникового материала, называемый его **удельной проводимостью**, в сименсах на метр.

В соответствии с законом Ома у металлических проводников γ не зависит от напряженности электрического поля E при изменении последней в весьма широких пределах. Величина $\rho = 1 / \gamma$, обратная удельной проводимости и называемая **удельным сопротивлением**, для имеющего сопротивление R проводника длиной l с постоянным поперечным сечением S вычисляется по формуле:

$$\rho = RS / l. \quad (1.27)$$

Удельное сопротивление измеряется в ом-метрах (Ом·м). Для измерения ρ проводниковых материалов разрешается пользоваться внесистемной единицей Ом·мм²/м. Удельная проводимость металлических проводников согласно классической теории металлов может быть выражена следующим образом:

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2m v_T}, \quad (1.28)$$

где e – заряд электрона;

n_0 – число свободных электронов в единице объема металла;

λ – средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки;

m – масса электрона;

v_T – средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле.

Для различных металлов скорости хаотического теплового движения электронов v_T примерно одинаковы. Незначительно различаются также и концентрации свободных электронов n_0 . Поэтому значение удельной проводимости γ (или удельного сопротивления ρ) в основном зависит от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике λ , которая определяется структурой проводникового материала и дефектами кристаллической решетки.

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов. Число носителей заряда (концентрация свободных электронов) в металлическом проводнике при повышении температуры практически остается неизменным. Однако вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т. е. уменьшается средняя длина свободного пробега электрона λ , уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление. Иными словами температурный коэффициент удельного сопротивления металлов (кельвин в минус первой степени) положителен:

$$TK_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (1.29)$$

При изменении температуры в узких диапазонах на практике допустима кусочно-линейная аппроксимация зависимости $\rho(T)$; в этом случае принимают, что

$$\rho_2 = \rho_1 \left[1 + \bar{\alpha}_\rho (T_2 - T_1) \right], \quad (1.30)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления проводникового материала при температурах T_1 и T_2 соответственно (при этом $T_2 > T_1$);

$\bar{\alpha}_\rho$ – **средний температурный коэффициент удельного сопротивления** данного материала в диапазоне температур от T_1 до T_2 .

При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение удельного сопротивления ρ . Примеси и нарушения правильной структуры металлов увеличивают их удельное сопротивление.

Теплопроводность металлов. За передачу теплоты через металл в основном ответственны те же свободные электроны, которые определяют электропроводность металлов и число которых в единице объема металла весьма велико. Поэтому, как правило, коэффициент теплопроводности металлов намного больше, чем коэффициент теплопроводности диэлектриков. Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше удельная электрическая проводимость у металла, тем больше должен быть и его коэффициент теплопроводности.

Термоэлектродвижущая сила. При соприкосновении двух различных металлических проводников между ними возникает **контактная разность потенциалов**. Причина появления этой разности потенциалов заключается в различии значений работы выхода электронов из различных металлов, а также в том, что концентрация электронов и давление электронного газа у разных металлов и сплавов могут быть неодинаковыми. Из электронной теории металлов следует, что контактная разность потенциалов между металлами A и B :

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (1.31)$$

где U_A и U_B – потенциалы соприкасающихся металлов;

n_{0A}, n_{0B} – концентрации электронов в металлах A и B ;

k – постоянная Больцмана;

e – абсолютная величина заряда электрона.

Если температуры спаев одинаковы, то сумма разности потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. Иначе обстоит дело, когда один из спаев имеет температуру T_1 , а другой – температуру T_2 . В этом случае между спаями возникает термоЭДС:

$$U = \psi (T_1 - T_2), \quad (1.32)$$

где ψ – постоянный для данной пары проводников коэффициент термоЭДС.

Температурный коэффициент линейного расширения проводников. Этот коэффициент интересен при рассмотрении работы различных сопряженных материалов в той или иной конструкции (возможность растрескивания или нарушения плотного соединения со стеклами, керамикой при изменении температуры и т. д. Значение температурного коэффициента линейного расширения металлов возрастает при повышении температуры и приближении к температуре плавления. Поэтому, как правило, при нормальной температуре легкоплавкие металлы имеют сравнительно высокие, а тугоплавкие – сравнительно низкие значения коэффициента.

Материалы высокой проводимости

Материалы высокой проводимости. К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести медь и алюминий.

Медь. Преимущества меди следующие: малое удельное сопротивление; достаточно высокая механическая прочность; удовлетворительная в большинстве случаев стойкость по отношению к коррозии; хорошая обрабатываемость; относительная легкость пайки и сварки. Медь получают чаще всего путем переработки сульфидных руд. После нескольких плавок руды и обжигов с интенсивным дутьем медь, предназначенная для электротехники, обязательно проходит процесс электролитической очистки. Полученные после электролиза катодные пластины меди переплавляют в болванки массой 80–90 кг, которые прокатывают и протягивают в изделия требуемого поперечного сечения. В качестве проводникового материал используется медь марок М1 и М0. Медь марки М1 содержит 99,9 % *Си*, а в общем количестве примесей (0,1 %) кислорода должно быть более 0,08 %. Присутствие в меди кислорода ухудшает ее механические свойства. Лучшими механическими свойствами обладает медь марки М0, в которой содержится не более 0,05 % примесей, в том числе не свыше 0,02 % кислорода. Из меди марки М0 может быть изготовлена тонкая проволока. При холодной протяжке получают

твердую (твердотянутую) медь (МТ), которая благодаря влиянию наклепа имеет высокий предел прочности при растяжении и малое относительное удлинение перед разрывом, а также обладает твердостью и упругостью при изгибе; проволока из твердой меди несколько пружинит. Если же медь подвергать отжигу, т. е. нагреву до нескольких сотен градусов с последующим охлаждением, то получится **мягкая** (отожженная) медь (ММ), которая сравнительно пластична, имеет малую твердость и небольшую прочность, но весьма большое удлинение перед разрывом и (в соответствии с рассмотренными выше общими закономерностями) более высокую удельную проводимость

В отдельных случаях помимо чистой меди в качестве проводникового материала применяются ее сплавы с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием. Такие сплавы, носящие название **бронз**, при правильно подобранном составе имеют значительно более высокие механические свойства, чем чистая медь. Бронзы широко применяют для изготовления токопроводящих пружин и т. п. Сплав меди с цинком – латунь обладает достаточно высоким относительным удлинением перед разрывом при повышенном, по сравнению с чистой медью пределе прочности при растяжении. Это дает латуни технологические преимущества перед медью при обработке штамповкой, глубокой вытяжкой и т. п. В соответствии с этим латунь применяют в электротехнике для изготовления всевозможных токопроводящих деталей.

Алюминий является вторым по значению (после меди) проводниковым материалом. Это важнейший представитель так называемых легких металлов. Алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди. Температурный коэффициент расширения, удельная теплоемкость и теплота плавления алюминия больше, чем меди. Вследствие высоких значений удельной теплоемкости и теплоты плавления для нагрева алюминия до температуры плавления и перевода в расплавленное состояние требуется большая затрата теплоты, чем для нагрева и расплавления такого же количества меди, хотя температура плавления алюминия ниже, чем меди.

Алюминий обладает пониженными по сравнению с медью свойствами – как механическими, так и электрическими. При одинаковых сечениях и длине электрическое сопротивление алюминиевого провода больше, чем медного в 1,63 раза. Следовательно, чтобы получить алюминиевый провод такого же электрического сопротивления, как и медный, нужно взять его сечение в 1,63 раза больше, т. е. диаметр должен быть в 1,3 раза больше диаметра медного провода.

Отсюда понятно, что если ограничены габариты, то замена меди алюминием затруднена.

Для электротехнических целей используют алюминий, содержащий не более 0,5 % примесей, марки А1. Еще более чистый алюминий марки А000 (не более 0,03 % примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги, электродов и корпусов оксидных конденсаторов. Алюминий наивысшей чистоты АВ0000 имеет содержание примесей, не превышающее 0,004 %.

Прокатка, протяжка и отжиг алюминия аналогичны соответствующим операциям над медью.

Алюминий весьма активно окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Эта пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов и делает невозможной пайку алюминия обычными методами. Для пайки алюминия применяются специальные пасты-припои или используются ультразвуковые паяльники.

Железо (сталь) как наиболее дешевый и доступный металл, обладающий к тому же высокой механической прочностью, представляет большой интерес для использования в качестве проводникового материала. Однако даже чистое железо имеет значительно более высокое сравнительно с медью и алюминием удельное сопротивление ρ (около 0,1 мкОм·м); значение ρ стали еще выше.

Сталь как проводниковый материал используется также в виде шин, рельсов трамваев электрических железных дорог (включая «третий рельс» метро) и пр. Для сердечников сталеалюминиевых проводов воздушных линий электропередачи применяется особо прочная стальная проволока. Обычная сталь обладает малой стойкостью к коррозии; даже при нормальной температуре, особенно в условиях повышенной влажности, она быстро ржавеет; при повышении температуры скорость коррозии резко возрастает. Поэтому поверхность стальных проводов должна быть защищена слоем более стойкого материала. Обычно для этой цели применяют покрытие цинком.

Материалы с высоким удельным сопротивлением

К материалам данной группы относятся сплавы на основе меди – манганин, константан; на основе железа – нихром, фехраль. Они предназначены для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. д.

При использовании этих сплавов для электроизмерительных приборов и образцовых резисторов, помимо высокого удельного сопротивления ρ , требуется высокая стабильность во времени, малый температурный коэффициент удельного сопротивления и малый коэффициент термоЭДС в паре данного сплава с медью. Сплавы для электронагревательных элементов должны длительно работать на воздухе при высоких температурах (иногда до 1 000 °С и даже выше). Кроме того, во многих случаях требуется технологичность сплавов – возможность изготовления из них гибкой проволоки, иногда весьма тонкой (диаметром порядка сотых долей миллиметра). Наконец, желательны, чтобы сплавы, используемые для приборов, производимых в больших количествах, – реостатов, электроплиток, электрических чайников, паяльников, – были дешевыми и по возможности не содержали дефицитных компонентов.

Манганин. Это наиболее типичный и широко применяемый для изготовления образцовых резисторов сплав. Примерный состав его: $Cu - 85 \%$, $Mn - 12 \%$, $Ni - 3 \%$; название происходит от наличия в нем марганца (от лат. – ‘*manganum*’); желтоватый цвет объясняется большим содержанием меди.

Манганин выпускается в виде проволоки диаметром от 0,02 до 1 мм и применяется для изготовления проволочных сопротивлений и в электроизмерительной технике. Достоинство – слабая зависимость сопротивления от температуры, что необходимо для обеспечения постоянства сопротивления в электроизмерительных устройствах. Кроме того, манганин имеет малое значение термоЭДС в контакте с медью, благодаря чему снижается погрешность при точных измерениях. Манганиновая проволока выпускается также с эмалевой и шелковой изоляцией и применяется для изготовления образцовых сопротивлений.

Константан – сплав, содержащий около 60 % меди и 40 % никеля. Он обладает весьма малой величиной температурного коэффициента сопротивления, часто принимаемой равной нулю. Однако в паре с медью он создает большую термоЭДС, что не позволяет использовать ее в качестве естественной изоляции между витками в реостатах. Константановая проволока выпускается также с эмалевой, эмалево-шелковой и эмалево-хлопчатобумажной изоляцией.

Нихром и фехраль являются жаростойкими материалами, применяемыми в электронагревательных приборах и печах, где необходима длительная работа при температурах от 800 до 1200 °С, что обеспечивает стойкость к окислению при высоких температурах. В процессе работы на поверхности проволоки или ленты образуется

плотная защитная оксидная пленка, предохраняющая материал от дальнейшего окисления и разрушения. Для повышения длительности работы электронагревательных элементов жаростойкий материал помещают в трубку из металла, стойкого к окислению, и заполняют промежуток между проволокой и трубкой диэлектриком с высокой теплопроводностью (MgO). За счет дополнительной протяжки трубки ее внешний диаметр уменьшается, а диэлектрик уплотняется, образуя прочную изоляцию проводника высокого сопротивления. Таким методом изготавливают нагревательные элементы печей, элементы бытовых приборов (утюгов, кипятильников). Недостатком рассматриваемых материалов является повышенная хрупкость и твердость, зависящая от процентного содержания хрома и железа. Поэтому проволоку диаметром от 0,01 до 0,2 мм изготавливают из сплава с содержанием хрома менее 20 %. Проволоку диаметром больше 0,2 мм и ленты толщиной более 0,2 мм изготавливают из нихромов других марок или из фехралей. Проволоку и ленту больших сечений используют в электронагревательных устройствах большой мощности и промышленных электронагревательных печах.

Неметаллические проводниковые материалы

Электротехнический уголь относится к твердым неметаллическим проводниковым материалам, сырьем для его производства служит сажа, графит, антрацит. Он широко применяется для изготовления щеток электрических машин, электродов и прожекторов, дуговых электрических печей и электролитических ванн, анодов гальванических элементов, в микрофонах, непроволочных высокоомных резисторах.

Вопросы для самоконтроля

1. Как делятся проводниковые материалы по агрегатному состоянию и что в них является носителями зарядов?
2. Назовите материалы высокой проводимости и их характеристики.
3. Назовите материалы высокого сопротивления и их характеристики.
4. В чем заключается явление сверхпроводимости?
5. Назовите проводниковые материалы различного назначения.
6. Какие материалы применяются в качестве неметаллических?

7. Какие требования предъявляются к твердым проводниковым материалам?

8. Какие требования предъявляются к материалам высокого сопротивления?

9. Назовите проводниковые материалы различного назначения и область их применения.

10. Напишите формулу величины удельного электрического сопротивления металлических проводников на основании электронной теории металлов и дайте объяснение.

11. Перечислите основные характеристики проводниковых материалов.

12. Какие материалы относятся к криопроводникам?

13. Виды неметаллических проводниковых материалов и их получение.

14. Что представляют собой жаростойкие проводниковые материалы и где они применяются?

15. Назовите сверхпроводящие проводниковые изделия и возможную область их применения.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ И ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа

«Электрические кабели, провода и шнуры»

Теоретический материал

Проводниковые материалы – это материалы, проводящие электрический ток. По агрегатному состоянию они делятся на твердые, жидкие и газообразные.

Для изготовления жил проводов, шнуров и кабелей применяют следующие проводниковые материалы:

- электротехническая медь – ММ (медь мягкая);
- электротехнический алюминий (алюминий мягкий).

Провод – одна неизолированная или одна и более изолированных жил, поверх которых в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может быть неметаллическая оболочка, обмотка или оплетка волокнистыми материалами или проволокой.

Провода подразделяют на изолированные и неизолированные. Неизолированные провода имеют одну токопроводящую жилу, состоящую из семи и более проволок (медные могут быть из одной) и применяются для монтажа воздушных линий.

могут быть наложены неметаллическая оболочка и защитные покрытия.

Шнур предназначен для подключения электрических бытовых приборов к электрической сети марки – ШПП, ШВП, ШВВП.

Кабель – одна или более изолированных жил (проводников), заключенных, как правило, в металлическую или неметаллическую оболочку, поверх которой в зависимости от условий прокладки и эксплуатации может иметься соответствующий защитный покров, в который может входить броня.

Кабели подразделяются в основном на силовые (предназначенные для передачи электрической энергии промышленной частоты в силовых цепях) и контрольные (предназначенные для передачи сигналов во вспомогательных цепях: управления, защиты и сигнализации).

Силовые кабели предназначены для передачи по ним на расстояние электроэнергии, используемой для питания электрических установок. Они состоят из следующих основных элементов: токопроводящих жил, изоляции, оболочек и защитных покровов. Помимо основных элементов в конструкцию силовых кабелей могут входить экраны, нулевые жилы, жилы защитного заземления и заполнители (рисунок 4.2).

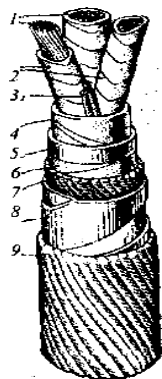


Рисунок 1.12 – Электрический кабель с секторными жилами и поясной изоляцией:

1 – алюминиевые или медные токоведущие жилы; 2 – бумага, пропитанная маслом, – фазная изоляция; 3 – джутовые заполнители; 4 – бумага, пропитанная маслом, – поясная изоляция, 5 – свинцовая оболочка; 6 – бумажная лента; 7 – прослойка из джута; 8 – стальная ленточная броня; 9 – джутовый покров

Токопроводящие жилы предназначены для прохождения электрического тока, они бывают основными и нулевыми. Основные жилы применяются для выполнения основной функции кабеля –

передачи по ним электроэнергии. Нулевые жилы предназначены для протекания разности токов фаз (полюсов) при неравномерной их нагрузке. Они присоединяются к нейтрали источника тока.

Жилы защитного заземления являются вспомогательными жилами кабеля и предназначены для соединения не находящихся под рабочим напряжением металлических частей электроустановки, к которой подключен кабель, с контуром защитного заземления источника тока.



Рисунок 1.13 – Кабели: двухжильные с круглыми (а) и сегментными (б) жилами, трехжильные с секторными (в) жилами

Силовые кабели бывают 1-5-жильные с сечением жилы 2,5–800 мм², контрольные с числом жил 4–37 с сечением жилы 0,75–10 мм².

Наиболее широко применяют контрольные кабели марок: КВВГ, КРНГ, КРВГ и др.

Таблица 1.13 – Буквенные символы в обозначении марок силовых кабелей

Конструктивный элемент кабеля и место символа в обозначении марки кабеля	Значение символа
Токопроводящая жила (символ в начале обозначения): А Нет символа	Алюминий Медь

Окончание таблицы 1.13

Конструктивный элемент кабеля и место символа в обозначении марки кабеля	Значение символа
Изоляция жил (символ в середине обозначения): Р В П Ц	Резина Поливинилхлоридный пластикат Полиэтилен Бумага, пропитанная церезином
Оболочка (символы в середине обозначения): С А В П	Свинец Алюминий Поливинилхлорид Полиэтилен
Защитное покрытие (символы в конце обозначения): Б Л П В Шп Шв Г	Броня Подушка: – из битумного состава; – из пропитанной пряжи; – из вязкого подклеивающего состава Без подушки: Шланг полиэтиленовый защитный; Шланг поливинилхлоридный защитный; Голый (без джутового покрытия)
Кабель специального назначения (символ в конце обозначения): С	Для сельского хозяйства

Задание 1

Ознакомиться с образцами проводниковых изделий, представленных в лаборатории, разделить их на группы в зависимости от назначения и заполнить таблицу по форме таблицы 1.14.

Таблица 1.14

Вид проводникового изделия	Материал токопроводящей жилы	Вид изоляции	Область применения

Задание 2

Изучить устройство, область применения, маркировку проводниковых изделий и заполнить таблицу по форме таблицы 1.15.

Таблица 1.15

Вид проводникового изделия	Маркировка проводникового изделия	Расшифровка маркировки	Область применения

Лабораторная работа**«Электрические свойства проводниковых материалов»****Общие сведения**

В качестве проводниковых материалов могут использоваться твердые тела, жидкости и газы. Среди твердых проводниковых материалов наиболее часто в электротехнике применяются металлы и сплавы.

По удельному электрическому сопротивлению металлические проводниковые материалы делят на две основные группы:

- металлы высокой проводимости ($\rho < 0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$);
- материалы высокого сопротивления ($\rho > 0,3 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$).

Проводниковые материалы первой группы (медь, алюминий, серебро и т. д.) применяют в основном для изготовления жил проводов и кабелей, шин и т. д. Проводниковые материалы второй группы манганин, константан, нихром используют при производстве резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания.

Особая группа – сверхпроводники – материалы, которые обладают ничтожно малым удельным электрическим сопротивлением при температурах, близких к абсолютному нулю.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и электролиты, кислоты, щелочи, растворы солей.

Твердые проводниковые материалы – это проводники с электронной проводимостью; они являются проводниками первого рода. В проводниках второго рода или электролитах основным носителем заряда являются ионы вещества.

Если газ или пары металла сильно ионизированы, то при равенстве в единице объема числа отрицательно заряженных электронов числу положительных ионов наблюдается особое состояние вещества, получившее название плазма, т. е. газ становится проводником с электронной и ионной электропроводностью.

Твердые проводниковые материалы применяют для изготовления контактов. К этим материалам предъявляются следующие требования: устойчивость против коррозии, стойкость к свариванию и действию электрической эрозии, стойкость к действию сжимающих и ударных нагрузок, высокая проводимость и теплофизические свойства, хорошая технологичность и способность прирабатываться друг к другу.

Проводниковые материалы обладают высокой проводимостью из-за наличия значительного количества свободных электронов. Температурный коэффициент удельного сопротивления определяется по формуле:

$$\alpha_p = \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_K - \rho_H}{T_K - T_H}, \quad (1.33)$$

где ρ_0 – табличное значение удельного сопротивления проводникового материала;

ρ_H – удельное сопротивление при температуре T_H , принятой за начальную;

ρ_K – удельное сопротивление при температуре T_K , принятой за конечную.

Удельное электрическое сопротивление определяется по формуле:

$$\rho = \frac{RS}{l}, \quad (1.34)$$

где R – электрическое сопротивление, Ом;

S – площадь сечения материала, мм²;

l – длина образца, м.

Используя значение коэффициента α_p , определенное для интервала температур $T_K - T_H$, можно достаточно точно определить удельное сопротивление ρ_x для любой температуры T_2 внутри этого интервала:

$$\rho_x = \rho_0 [1 + \alpha_p (T_K - T_H)]. \quad (1.35)$$

Для металлов значение α_p достаточно велико ($4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$), а у большинства сплавов – значительно меньше ($10^{-4} - 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

Описание лабораторной установки и хода выполнения лабораторной работы

С помощью моста Р333 измеряется при различной температуре сопротивление образцов проводниковых материалов и результаты вносятся в таблицу 1.16.

Таблица 1.16 – Характеристики проводниковых материалов

Проводниковый материал	Длина образца, м	Диаметр, мм	R_H , Ом	R_K , Ом	ρ_0 , Ом·мм ² /м	ρ_H , Ом·мм ² /м	ρ_K , Ом·мм ² /м	α_p	ρ_x , Ом·мм ² /м
Медь	0,8	0,4			0,0172				
Алюминий	0,8	0,6			0,028				
Константан	0,8	0,4			0,5				

Задания

1 уровень

Изучить порядок работы с прибором «Мост постоянного тока Р333», используя паспорт прибора. Включить в сеть установку, в которой помещены образцы, и нагреть их до температуры указанной преподавателем. С помощью моста Р333 измерить сопротивление материалов при комнатной температуре и температуре 50 °С и результаты измерений занести в таблицу 1.16. По формулам 1.33, 1.34 и 1.35 определить температурный коэффициент удельного электрического сопротивления и удельное сопротивление образцов при заданной температуре и результаты расчетов занести в таблицу 1.16.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1 и проанализировать характеристики проводниковых материалов в сравнении со справочными величинами, выводы представить в отчете.

3 уровень

Выполнить задание уровня 2. По справочной литературе определить удельную теплоемкость представленных проводниковых материалов. Рассчитать время нагрева каждого из материалов на 10 °С и сравнить полученные значения с экспериментальными.

Вопросы предварительного контроля

1. Как делятся проводниковые материалы по удельному сопротивлению.
2. Какие материалы относятся к проводникам первого рода?
3. Какие материалы относятся к проводникам второго рода?
4. Какие компоненты входят в состав манганина и константана?
5. Какие марки меди и алюминия применяются при изготовлении проводниковых изделий?

Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1 уровень

1. От каких факторов зависит удельная электрическая проводимость проводников?
2. В чем заключается сущность явления сверхпроводимости?
3. Приведите формулу для расчета температурного коэффициента удельного сопротивления.
4. Где применяется константан и какими особенностями он обладает?
5. Назовите материалы, применяемые в качестве контактных.
6. Какие материалы относятся к твердым неметаллическим проводниковым материалам?

2 уровень

1. Приведите основные характеристики, свойства, область применения материалов высокой проводимости.
2. Приведите основные характеристики, свойства, область применения материалов высокого сопротивления.
3. Какие требования предъявляются к контактному материалу?
4. От чего зависит средняя длина свободного пробега электронов в металле?
5. Почему медь заменяется алюминием? Какие он имеет преимущества и недостатки?
6. Где применяются твердые неметаллические проводниковые материалы?

3 уровень

1. Что представляют собой металлокерамические материалы и где они применяются?
2. Что представляют собой жаростойкие проводниковые материалы и где они применяются?
3. Каковы основные свойства и область применения бронз и латуни в качестве проводников?

ЗАДАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1 уровень

Провести сопоставление предложенных проводниковых материалов, выявить их достоинства и недостатки, различие в электрических характеристиках и оформить в виде реферата.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Дополнительно проанализировать возможность использования проводниковых материалов в электрооборудовании и оформить в виде реферата.

3 уровень

Выполнить задание уровня 2. Дополнительно выяснить перспективные направления их получения, применения и взаимозаменяемости и оформить в виде реферата.

Варианты индивидуальных заданий

1. Материалы для изготовления термопар.
2. Материалы для изготовления нитей накаливания.
3. Материалы для плавких вставок.
4. Материалы для оболочек силовых кабелей с бумажной изоляцией.
5. Материалы для экранов силовых кабелей.
6. Биметаллы.
7. Контактные проводниковые материалы.

ПРИМЕРЫ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО МОДУЛЮ 3

1 уровень

1. Когда возникает термоЭДС в проводниковых материалах?
2. Перечислите физические характеристики проводниковых материалов.
3. Как классифицируются проводниковые материалы?
4. Назовите, как делятся по назначению провода и где применяются?
5. Назовите, как делятся по назначению кабели и где применяются?
6. Что называется шнурами и где они применяются?
7. Как рассчитывается удельное электрическое сопротивление для проводниковых материалов?

2 уровень

1. Приведите энергетическую диаграмму проводниковых материалов.
2. Приведите формулу для расчета контактной разности потенциалов.
3. Как получается электротехническая медь?
4. Как получается электротехнический алюминий?
5. В чем состоит преимущество обмоточных проводов с эмалевой изоляцией?
6. Каковы отличительные особенности контрольных кабелей?
7. Какова структура условного обозначения установочных проводов?
8. Как классифицируются установочные провода
9. Как устроен силовой кабель с бумажной изоляцией?

3 уровень

1. Какова технология получения биметаллов и возможные направления их применения в электротехнике?
2. Какова маркировка биметаллов и основные направления их совершенствования?
3. Классификация и области применения сверхпроводников в современных электроустановках.
4. Как классифицируются и обозначаются обмоточные, монтажные и установочные провода?
5. Как классифицируются и обозначаются силовые и контрольные кабели?

МОДУЛЬ 4 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В результате изучения модуля студент должен:

знать:

- понятия: полупроводниковый материал, электронная и дырочная проводимость, дырка, вакансия, ловушка;
- строение молекул полупроводниковых материалов, энергетическую диаграмму полупроводников, классификацию полупроводниковых материалов, зависимость электропроводности от различных факторов, фотопроводимость, гальваномагнитные эффекты в полупроводниках, свойства $p-n$ -перехода в полупроводниках;
- область применения полупроводниковых материалов в зависимости от их свойств;

уметь:

- выбирать необходимые полупроводниковые материалы и изделия;
- объяснять причину выбора материала;
- определять свойства выбранного материала и оценивать их эффективность, работать в малой группе;
- анализировать и оценивать собранные данные, работать самостоятельно.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ 4

Словарь основных понятий

Полупроводниковый материал – электротехнический материал, занимающий промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Электронная проводимость – проводимость полупроводника, обусловленная в основном перемещением электронов.

Дырочная проводимость – проводимость полупроводника, обусловленная перемещением дырок.

Дырка – избыточный положительный заряд, возникающий в полупроводниках.

Ловушка – это энергетический уровень, возникающий в запрещенной зоне полупроводника.

Основной теоретический материал

Лекция Полупроводниковые материалы и их характеристики

1. Электропроводность и другие характеристики полупроводников.
2. Электронно-дырочный переход.
3. Полупроводниковые химические соединения.

Электропроводность и другие характеристики полупроводников

Полупроводники по удельному сопротивлению, которое при комнатной температуре лежит в пределах 10^{-6} – 10^9 Ом·см, занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Полупроводники обладают рядом характерных только для них свойств, резко отличающихся от проводников:

- в большом интервале температур их удельное сопротивление уменьшается, т. е. они имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления;
- при введении в полупроводник ничтожного количества примесей их удельное сопротивление резко изменяется;
- полупроводники чувствительны к различного рода внешним воздействиям – свету, ядерному излучению, электрическому и магнитному полям, давлению и т. д.

Полупроводниковыми свойствами обладает целый ряд материалов – природных и синтетических, органических и неорганических, простых и сложных по химическому составу.

К простым полупроводникам относятся германий, кремний, селен, теллур, бор, углерод, фосфор, сера, сурьма, мышьяк, серое олово, йод.

Полупроводниками являются сложные соединения различных элементов таблицы Д.И. Менделеева: двойные (бинарные) соединения; тройные соединения; твердые растворы.

Как и в металлах, электрический ток в полупроводниках связан с дрейфом носителей заряда. Но если в металлах наличие свободных электронов обусловлено самой природой металлической связи, то появление носителей заряда в полупроводниках определяется рядом факторов, важнейшими из которых являются чистота материала и температура. В зависимости от степени чистоты полупроводники подразделяют на собственные и примесные.

Полупроводник, в котором в результате разрыва связей образуется равное количество свободных электронов и дырок, называется **собственным**.

Каждый атом кремния на своей внешней оболочке содержит четыре электрона. Каждый из этих четырех электронов создает пару с электроном соседнего атома, образуя ковалентную связь. Ковалентная связь достаточно прочная, и для того чтобы освободить электрон, требуется определенная энергия.

С повышением температуры из-за увеличения тепловой энергии некоторые электроны разрывают ковалентную связь и появляются в зоне проводимости. В кристалле собственного полупроводника каждому электрону в зоне проводимости соответствует одна дырка, оставленная им в валентной зоне. В этом случае свободный электрон обладает энергией, большей той, которую он имел в связанном состоянии, на величину не менее энергии ширины запрещенной зоны.

Так как при каждом акте возбуждения в собственном полупроводнике одновременно создаются два носителя заряда противоположных знаков, то общее количество носителей заряда будет в два раза больше числа электронов в зоне проводимости, т. е. концентрации электронов и дырок $n_i = p_i$; $n_i + p_i = 2n_i$.

При приложении к кристаллу внешнего электрического поля свободные электроны будут перемещаться против поля (из-за отрицательного заряда), а дырки – в направлении поля. Но электроны, хотя и движутся в противоположном направлении, создают обычный ток, совпадающий с внешним приложенным полем. Следовательно, электронный и дырочный токи текут в одном и том же направлении и поэтому складываются.

Электропроводность собственных полупроводников определяется обоими типами носителей зарядов, поэтому их иногда называют полупроводниками с биполярной проводимостью. Удельная проводимость собственного полупроводника определяется выражением:

$$\gamma = qn_i u_n + qp_i u_p = qn_i(u_n + u_p), \quad (1.36)$$

где u_n , u_p – подвижности носителей заряда (электронов и дырок).

Подвижности электронов и дырок не одинаковы и обычно $u_n > u_p$, поэтому электропроводность собственных полупроводников имеет слабо преобладающий электронный характер.

Для большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники.

Полупроводник, имеющий примеси, называется **примесным**, и проводимость, созданная введенной примесью, носит название примесной проводимости.

Примесями могут быть чужеродные атомы; собственные – избыточные по стехиометрическому составу; дефекты кристаллической

решетки в виде пустых узлов, атомов или ионов в междузлиях; дислокации – нарушения периодичности структуры и т. д.

Обычно примеси вводят в вещество специально, чтобы обеспечить нужный тип и величину проводимости. Введение примесей называют **легированием полупроводника**. Различают **примеси внедрения**, когда чужеродные атомы закрепляются в междузлиях, и **примеси замещения**, когда они замещают матричные атомы в узлах решетки.

Атомы примеси способны легко отдавать электроны в свободную зону, либо захватывать электроны из валентной зоны, достраивая тем самым свою наружную оболочку до устойчивого состояния.

Полупроводник с примесью, имеющей концентрацию электронов, большую, чем концентрация дырок, появившихся за счет перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, называют **полупроводником n-типа**, а примеси, поставляющие электроны в зону проводимости, – **донорами**.

Полупроводник, имеющий концентрацию дырок, большую, чем концентрация электронов, перешедших из валентной зоны в зону проводимости, называют **полупроводником p-типа**. Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, называют **акцепторами**.

Сравнивая собственные и примесные полупроводники следует подчеркнуть, что в последних электропроводность проявляется при более низких температурах.

В электронном полупроводнике электронов значительно больше дырок, поэтому электроны называют основными, а дырки – неосновными носителями заряда. В акцепторном же полупроводнике основными носителями являются дырки, а неосновными – электроны.

Фотопроводимость полупроводников *Фотопроводимостью* называют увеличение электрической проводимости вещества под действием электромагнитного излучения, в том числе света.

При поглощении света собственным полупроводником энергия фотона E_{ϕ} захватывается электроном валентной зоны. Электрон, поглотивший фотон, способен перейти из зоны проводимости в свободную зону. В результате образуется электронно-дырочная пара свободных носителей заряда, называемых фотоносителями, которые при приложении внешнего поля обеспечивают появление фототока. Образование фотоносителей и появление фотопроводимости называется внутренним фотоэффектом.

Пороговая длина волны, при которой появляется фотопроводимость, называется красной границей фотоэффекта.

Фотопроводимость зависит от интенсивности облучения, т. е. от потока квантов света Φ . С ростом Φ увеличивается число носителей, в то же время растет вероятность их рекомбинации. Поэтому зависимость удельной проводимости γ_{ϕ} от интенсивности облучения Φ нелинейна (рисунок 1.14) и определяется выражением:

$$\gamma_{\phi} = B\Phi^x, \quad (1.37)$$

где $B = \text{const}$, а $1 > x > 0$.

Фотопроводимость зависит также от приложенного напряжения (рисунок 1.15).

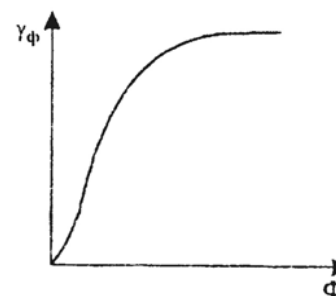


Рисунок 1.14 – Зависимость удельной фотопроводимости от интенсивности

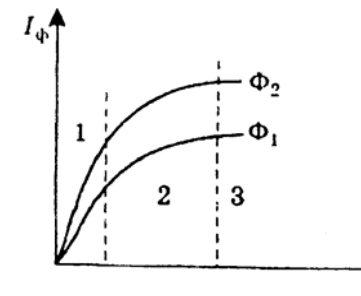


Рисунок 1.15 – Вольт-амперная характеристика фотопроводимости облучения

Электронно-дырочный переход (p–n-переход)

Основным элементом структуры большинства типов полупроводниковых приборов является электрический переход – переходный слой в полупроводниковом материале между двумя областями с различными типами электропроводности или разными значениями удельной электропроводности.

Электрический переход между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электропроводность p-типа, а другая – n-типа, называют электронно-дырочным переходом или p–n-переходом. Создать p–n-переход механическим соединением двух полупроводников с различным типом электропроводности невозможно, электронно-дырочные переходы получают путем введения в полупроводник донорной и акцепторной примесей таким образом, чтобы одна часть полупроводника обладала электронной, а другая – дырочной электропроводностью (рисунок 5.3).

Основные носители заряда в полупроводнике n -типа – электроны (обозначенные знаком минус), а в полупроводнике p -типа – дырки (обозначенные знаком плюс). Ионизированные атомы донорной и акцепторной примеси обозначены соответственно знаками плюс и минус в кружочках. Неосновные носители в электронном и дырочном полупроводниках не обозначены, так как их концентрация очень мала в сравнении с концентрацией основных носителей.

Условно будем считать, что n - и p -полупроводники приведены в идеальное соприкосновение. Так как в n -полупроводнике много электронов, а в p -полупроводнике много дырок, между полупроводниками начнется интенсивный обмен носителями заряда. За счет разности концентраций электроны из полупроводника n -типа диффундируют в полупроводник p -типа, оставляя в приконтактной области полупроводника n -типа некомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси.

Дырки, в свою очередь, диффундируют в полупроводник n -типа, в результате чего в приконтактном слое полупроводника p -типа возникнет отрицательный заряд ионов акцепторной примеси. Таким образом, область раздела полупроводников n - и p -типа окажется обедненной свободными носителями заряда и, несмотря на малую ширину ($\delta = 10^{-6} - 10^{-8}$ м), будет обладать большим сопротивлением, во много раз превышающим сопротивление остальной части полупроводников. Наличие отрицательного и положительного объемного зарядов приводит к образованию электрического поля, которое препятствует дальнейшему диффузионному потоку носителей зарядов. В равновесное состояние система приходит при условии равенства потоков свободных носителей заряда, вызванных градиентом их концентраций и электрическим полем объемного заряда. Теперь рассмотрим, что произойдет, если к p - n -переходу приложить внешнее напряжение. Пусть к p -области присоединен положительный полюс питания, а к n -области – отрицательный. Такое внешнее поле будет направлено навстречу электрическому полю, обусловленному объемными зарядами. При этом основные носители заряда в p - и n -полупроводниках, имеющие наибольшую энергию, получают возможность проникать через обедненный слой в области, где они оказываются неосновными носителями заряда и рекомбинируют. Такое направленное движение носителей заряда является электрическим током, и можно сказать, что электронно-дырочный переход при такой полярности внешнего напряжения будет «открыт» и через него потечет прямой ток.

При смене полярности внешнего напряжения электрическое поле объемных зарядов и внешнее поле будут совпадать по направлению. В результате действия суммарного электрического поля основные носители будут двигаться от перехода и пересечь переход смогут только неосновные носители. Так как количество неосновных носителей во много раз меньше основных, то и ток, ими обусловленный, будет мал по сравнению с тем, который получится при прямом включении. При данном включении электронно-дырочный переход «заперт» и через него может протекать только малый обратный ток неосновных носителей.

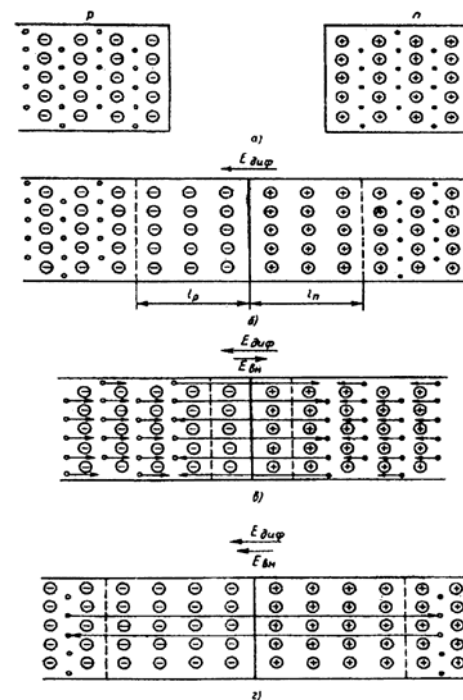


Рисунок 1.16 – Распределение носителей заряда в областях полупроводника с p - и n -типами проводимости:

- a – отдельные области; b – области в одном кристалле при отсутствии внешнего электрического поля; c – внешнее поле направлено навстречу диффузионному; d – внешнее поле совпадает по направлению с диффузионным

На рисунке 1.17 показана зависимость между током, текущим через p - n -переход, и внешним напряжением, которая называется вольт-амперной характеристикой.

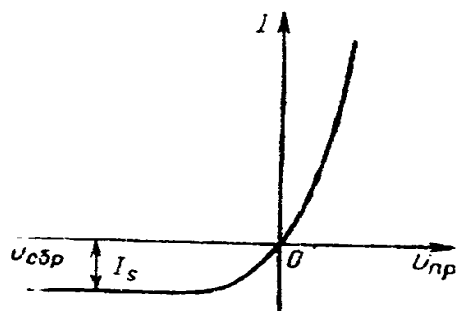


Рисунок 1.17 – Вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода

По фазовому состоянию и компонентному составу исходной фазы методы получения монокристаллов делятся на три группы:

- выращивание из расплава;
- выращивание из раствора;
- выращивание из газовой фазы.

Существует несколько групп методов выращивания монокристаллов из газовой фазы:

- молекулярных пучков (напыление, сублимация);
- химических реакций;
- химического переноса.

Полупроводниковые химические соединения

Кремний. Кристаллический кремний имеет решетку типа алмаза. Каждый его атом соединен валентными связями с четырьмя соседними, расположенными в вершинах тетраэдра.

Основными материалами для получения чистого кремния являются галогениды $SiCl_4$, $SiHCl_3$, SiI_4 и силан SiH_4 . Чаще всего используют метод восстановления парами цинка тетрахлорида кремния при температуре порядка 1000 °С.

Для получения кремния *p*-типа проводят легирование акцепторными примесями – алюминием или бором.

Кремний *n*-типа получают легированием донорными примесями мышьяком, сурьмой, фосфором.

Достоинством кремния является большая ширина запрещенной зоны $\Delta E = 1,12$ эВ, что обеспечивают работу приборов при доста-

точно высоких температурах – 120–200 °С. Недостатками являются низкие значения подвижностей электронов и дырок и высокая стоимость. Кремний используют для изготовления мощных диодов, транзисторов, тиристоров, интегральных схем, солнечных батарей, тензопреобразователей и т. д.

Германий. Из исходного сырья получают тетрахлорид германия $GeCl_4$ и путем дальнейшей переработки – диоксид германия GeO_2 , из которого восстановлением в водородной печи при температуре 650–700 °С получают элементарный германий в виде серого порошка.

Германий является высокочастотным материалом и используется в ВЧ и СВЧ транзисторах, а также в тензо-, магниточувствительных и холловских датчиках. Обладает хорошими оптическими свойствами и используется в фотодиодах, фототранзисторах. Из него изготавливают оптические линзы с большой светосилой для ИК-спектра, оптические фильтры, модуляторы света и т. д.

Недостатками является малый диапазон рабочих температур из-за малой ширины запрещенной зоны и высокая стоимость.

Число полупроводников на основе химических соединений велико. Они могут обладать самыми разнообразными электрофизическими свойствами, в ряде случаев превосходящими свойства простых полупроводников.

Карбид кремния – соединение типа $A^{IV}B^{IV}$, получают в электрических печах путем восстановления диоксида кремния углеродом при температуре до 200 °С:



Из монокристаллов изготавливают выпрямители на рабочие температуры до 500 °С, световоды. Из порошка SiC изготавливают варисторы для автоматики и вычислительной техники.

Из оксидных соединений чаще всего используют закись меди Cu_2O для изготовления выпрямителей и фотоэлементов.

На основе полупроводниковых материалов изготавливаются различные приборы, работа которых основана на использовании их основного свойства – зависимости электропроводности:

- от температуры – термисторы;
- от электрического поля – варисторы;
- от электромагнитного излучения – фоторезисторы и т. д.;
- от механических нагрузок – тензорезисторы.

Возможность создания в одном полупроводниковом материале двух областей (слоев) с разной электропроводностью позволяет получать *p-n*-переход, обладающий выпрямляющими свойствами. Это

используется для маломощных и мощных выпрямителей. Система переходов позволяет изготавливать транзисторы и на их основе усилители и генераторы, а также интегральные схемы различного назначения.

Кроме того, полупроводниковые материалы можно использовать для преобразования различных видов энергии. С этой целью изготавливают солнечные батареи, термоэлектрические генераторы, различные датчики. На основе полупроводниковых материалов изготавливают также нагреватели.

Благодаря использованию полупроводниковых материалов приборы на их основе имеют:

- большой срок службы;
- малые габариты и вес;
- простоту и надежность конструкции;
- высокую механическую прочность;
- малую потребляемую мощность;
- малую инерционность.

Вопросы для самоконтроля

1 уровень

1. Что такое полупроводник?
2. Какие носители зарядов имеются в полупроводнике?
3. Перечислите химические элементы со свойствами полупроводников.
4. Что называется собственными и примесными полупроводниками?
5. Что называется донорными и акцепторными примесями?

2 уровень

1. От чего зависят свойства полупроводниковых материалов?
2. Перечислите основные полупроводниковые материалы, назовите область их применения.
3. Сущность p - n -перехода.
4. Как влияет на электропроводность полупроводников деформация?
5. Что называется фотопроводимостью полупроводников?
6. Что называется красной границей фотоэффекта?
7. От каких факторов зависит фотопроводимость полупроводников?
8. Перечислите методы получения монокристаллов.
9. Приведите энергетическую диаграмму для полупроводников.

3 уровень

1. Создание, свойства и вольт-амперная характеристика p - n -перехода.
2. Назовите перспективные полупроводниковые материалы и возможную область их применения.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа

«Устройства с использованием простых полупроводников»

Общие сведения

Беспереходные полупроводниковые приборы Влияние температуры, излучений, электрических и магнитных полей, воздействие частиц, деформаций и других факторов на проводимость полупроводникового материала используется при создании различных полупроводниковых приборов.

Термисторы (терморезисторы, термосопротивления) – это приборы на основе полупроводника, сопротивление которых существенно зависит от температуры. Наибольшее распространение получили термисторы, действие которых основано на образовании в полупроводнике неравновесных пар носителей заряда в результате нагрева.

Для термисторов температурный коэффициент сопротивления является отрицательным ($\alpha_T = -(0,02 - 0,08) \text{ град}^{-1}$), его численное значение на один–два порядка выше, чем для металлов.

Термисторы оформляются в виде стержней, дисков, шайб, миниатюрных бусинок, тонких пластинок или пленок на платах малого размера, защищенных влагостойким покрытием или металло-стеклянным корпусом.

Термисторы, характеризующиеся большим положительным коэффициентом сопротивления ($\alpha_T = (0,7 - 1) 10^{-2} \text{ град}^{-1}$) в определенной области температур, называют **позисторами**. При температурах больше и меньше рабочей значение ТКС для них является отрицательным и малым.

В полупроводниковых резисторах, называемых **тензорезисторами**, электрическое сопротивление изменяется в результате деформаций. Основным параметром их является коэффициент тензочувствительности K , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины тензорезистора. Значе-

ния K лежат в пределах от -150 до 200 . Для тензорезисторов из полупроводника n -типа $K < 0$, из полупроводника p -типа $-K > 0$.

Магниторезисторы являются полупроводниковыми резисторами, в которых имеет место изменение сопротивления под воздействием магнитного поля (в результате эффекта Холла). Магниторезисторы изготавливают в виде дисков (диски Корбино) или пластин, ширина которых во много раз больше длины.

Полупроводниковые диоды K полупроводниковым диодам относят электропреобразовательные приборы с одним электрическим переходом (обычно с p - n -переходом) и двумя электродами.

Рассмотрим следующие виды полупроводниковых диодов: выпрямительные, универсальные высокочастотные, импульсные, стабилитроны, варикапы, туннельные, обращенные.

Выпрямительными называют диоды, в которых используется явление односторонней проводимости p - n -перехода. Эти диоды предназначены для выпрямления переменного тока частотой 50 Гц– 10 кГц. Основными их параметрами являются: максимально допустимые прямой ток $I_{пр\ max}$ и обратное напряжение $U_{обр\ max}$, постоянный обратный ток $I_{обр}$ при заданном обратном напряжении, постоянное прямое напряжение на диоде $U_{пр}$ при заданном прямом токе. Диапазон максимально допустимых значений выпрямленных токов и максимально допустимых обратных напряжений для приборов этого класса очень широк: от десятков миллиампер до килоампер для тока и от единиц вольт до киловольт для напряжения. **Универсальные высокочастотные диоды** предназначаются для использования в выпрямителях токов низких и высоких частот, детекторах, умножителях и преобразователях частоты и т. д. Переходы этих диодов характеризуются малыми площадями и емкостями. Величины выпрямленных токов универсальных диодов не превосходят десятков миллиампер, а обратные напряжения – десятков вольт.

Импульсные диоды приспособлены для быстрых переключений (длительностью в 1 мкс и даже меньше) из проводящего состояния в непроводящее, имеют малые площадь и емкость перехода.

Стабилитроны – это диоды, вольт-амперные характеристики которых имеют крутой участок для прямых напряжений. Применяются в цепях низковольтных стабилизаторов напряжения.

Стабилитроны изготавливают на основе кремния. В основе их действия лежит механизм электрического лавинного пробоя p - n -перехода. Ветвь вольт-амперной характеристики для обратного напряжения отличается большей крутизной. В пределах этого участка небольшие изменения обратного напряжения оказывают значитель-

ное воздействие на обратный ток. Напряжение пробоя перехода является напряжением стабилизации $U_{ст}$. Ток, соответствующий началу устойчивого пробоя, является минимальным током стабилизации $I_{ст.min}$, максимально допустимый обратный ток – максимальным током стабилизации $I_{ст.max}$. Напряжение стабилизации полупроводниковых стабилитронов составляет обычно единицы – десятки вольт. В последние годы созданы стабилитроны, напряжение стабилизации которых равно сотням вольт.

Варикапы – это полупроводниковые диоды, предназначенные для использования в качестве электрических конденсаторов, управляемых обратным напряжением. Барьерная емкость некоторых типов варикапов составляет сотни пикофард. Они могут быть применены в качестве конденсаторов с управляемой емкостью в колебательных контурах радиоприемников.

Переход в **туннельном** диоде образуется между областями полупроводника проводимостью p - и n -типа с высокой концентрацией примесей (порядка 10^{22} – 10^{23} м⁻³). Толщина перехода составляет около $0,01$ мкм, т. е. переход является тонким. В нем имеет место туннельный эффект. Ток проходит как в прямом, так и в обратном направлении.

Диоды этого типа нашли применение в переключателях тока, усилителях и генераторах колебаний, в преобразователях частоты и других устройствах.

В **обращенных диодах** p - n -переход возникает в месте контакта сильнолегированных, но не вырожденных полупроводниковых материалов. Механизм пробоя перехода – туннельный, пробой происходит при обратных напряжениях всего в десятки милливольт. Диоды этого типа применяются в детекторах, смесителях сигналов.

Полупроводниковые транзисторы *Полевым транзистором* называется трехэлектродный полупроводниковый прибор, в котором ток создается основными носителями заряда, движущимися под действием продольного электрического поля в проводящем канале, а управление величиной тока осуществляется в результате воздействия поперечного электрического поля. Название транзистора отражает факт управления током посредством электрического поля. В полевых транзисторах в создании тока участвуют основные носители заряда в полупроводнике, неосновные существенной роли не играют. Поэтому транзисторы этого типа называют также **униполярными**.

Слой полупроводника полевого транзистора, в котором регулируется величина тока, называется **каналом**. Область полупроводника, от которой начинают движение основные носители внутри кана-

ла, называется **истоком**, область, к которой они движутся, – **сток**, а область, к которой подводят управляющее напряжение, – **затвором**. Источник питания, обеспечивающий протекание тока в канале, включается между истоком и стоком, источник управляющего напряжения – между истоком и затвором.

Поперечное электрическое поле в полупроводнике может влиять на площадь поперечного сечения проводящего слоя полупроводника либо на удельную проводимость этого слоя. Соответственно различают две разновидности полевых транзисторов: а) транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом или с барьером Шотки (ширина канала регулируется под действием поля); б) транзисторы с изолированным затвором или МДП-транзисторы (МДП: металл–диэлектрик–полупроводник), в которых под влиянием поля происходит обогащение или обеднение канала носителями заряда. Если диэлектрик является оксидом, применяется название МОП-транзисторы (МОП: металл–оксид–полупроводник). МДП-транзисторы подразделяют на транзисторы со встроенным (собственным) каналом и индуцированным.

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя $p-n$ -переходами и тремя или более выводами. Ток в нем возникает при движении носителей зарядов двух знаков – электронов и дырок.

Кристалл биполярного транзистора содержит две области проводимостью одного и того же типа, разделенные тонким слоем электропроводностью противоположного типа. Эти области называют соответственно **эмиттером (Э)**, **коллектором (К)** и **базой (Б)**. В зависимости от порядка чередования областей с проводимостью n - и p -типа различают транзисторы структуры $n-p-n$ (рисунок 1.18, а) и $p-n-p$ (рисунок 1.18, б).

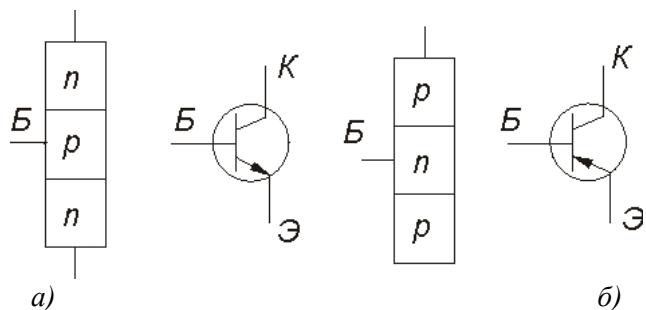


Рисунок 1.18 – Структуры и условные обозначения транзисторов $n-p-n$ -типа (а) и $p-n-p$ -типа (б)

Имеющийся между эмиттером и базой $p-n$ -переход называют **эмиттерным**, между коллектором и базой – **коллекторным**. Концентрация носителей заряда в эмиттере является высокой, в области коллектора – более низкой, а в области базы – на два-три порядка ниже, чем в эмиттере.

Различают транзисторы бездрейфовые и дрейфовые. В **бездрейфовых транзисторах** примеси в области базы распределены равномерно. Движение попадающих в область базы носителей заряда (если пренебречь создаваемым ими полем) происходит благодаря диффузии из-за возникающей в базе градиента концентрации носителей **заряда**. В **дрейфовых транзисторах** примеси в области базы распределяются так, что концентрация их убывает в направлении к коллектору. В результате в базе создается внутреннее электрическое поле, которое ускоряет перемещение инжектированных из эмиттера в область базы носителей заряда.

Задание 1

Ознакомиться с классификацией полупроводниковых приборов и представить ее в виде таблицы по форме таблицы 1.18.

Таблица 1.18

Наименование приборов	Материал	Область применения

Задание 2

Выполнить задание 1. Изучить устройство и принцип работы полупроводниковых приборов, используя образцы, представленные в лаборатории. Результаты представить в таблице по форме таблицы 1.9.

Таблица 1.19

Наименование приборов	Материал	Назначение и устройство прибора	Краткое описание работы

Лабораторная работа «Электрические свойства полупроводниковых материалов»

Общие сведения

Полупроводники по удельному сопротивлению занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Полупроводники обладают рядом характерных только для них свойств, резко отличающихся от проводников:

- ✓ при введении в полупроводники ничтожно малого количества примесей их удельное сопротивление резко изменяется;
- ✓ полупроводники чувствительны к различного рода внешним воздействиям – свету, температуре, ядерному излучению, электрическому и магнитному полям, давлению и т. д.

В полупроводниках наблюдается ряд физических явлений, на которых основана работа многих полупроводниковых приборов, измерительных и других устройств. С точки зрения использования в электротехнике важнейшими являются эффекты выпрямления (диоды), усиления (транзисторы), фотоэлектрический (фоторезисторы), термоэлектрический (терморезисторы) и др.

Например, большая зависимость удельной электрической проводимости полупроводников от температуры используется для создания температурно-зависимых резисторов – терморезисторов, в том числе датчиков температуры. Зависимость удельной проводимости некоторых полупроводников от напряжения используется для создания варисторов. Варисторы широко используются для искрогашения на контактах реле и защиты от перенапряжений элементов электрических цепей.

Описание лабораторной установки и хода выполнения лабораторной работы

Лабораторный стенд для снятия вольт-амперных характеристик полупроводниковых элементов состоит из автотрансформатора, выпрямительного моста, вольтметра, миллиамперметра и полупроводниковых элементов.

Собранная схема предьявляется преподавателю для проверки и с его разрешения включается в сеть.

При помощи автотрансформатора устанавливается напряжение на полупроводниковом элементе от 30 до 130 вольт с шагом 10 вольт (контроль напряжения производится по вольтметру). При каждом значении напряжения фиксируется показание миллиамперметра и результаты измерений вносятся в таблицу 1.20.

Таблица 1.20 – Вольтамперные характеристики резистора и варистора

Элементы и сила тока, мА	Напряжение, В	30	40	...	130
Резистор					
Варистор					

Для исследования зависимости полупроводниковых элементов от температуры используется схема, приведенная на крышке моста постоянного тока. В ходе исследования производится нагрев полупроводниковых элементов, помещенных в трансформаторное масло, при помощи встроенного электронагревателя, который подключается на напряжение 220 В. Контроль температуры осуществляется с помощью термометра. При значениях температуры 20, 40, 60 и 80 °С производятся измерения сопротивления полупроводниковых элементов при помощи моста постоянного тока Р333. Результаты измерений вносятся в таблицу 1.21.

Таблица 1.21 – Зависимость сопротивления резистора и термистора от температуры

Температура, °С	исходная	40	60	80
Сопротивление резистора, Ом				
Сопротивление термистора, Ом				

Задания

1 уровень

1. Составить и вычертить схему для снятия вольт-амперных характеристик полупроводниковых элементов. В соответствии с описанием хода лабораторной работы получить вольт-амперные характеристики для резистора и варистора (таблица 1.20)

2. Изучить устройство и порядок работы с прибором «Мост постоянного тока измерительный Р333», используя паспорт прибора. В соответствии с описанием процесса исследования температурных характеристик резистора и термистора произвести измерения и результаты внести в таблицу 1.21.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Построить графики зависимостей $I = f(U)$ для резистора и варистора и $R = f(T)$ для резистора и термистора. Провести анализ полученных результатов.

3 уровень

Выполнить задание уровня 2. На основании полученных данных рассчитать температурный коэффициент удельного сопротивления полупроводниковых элементов.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1 уровень

Изучить классификацию и назначение оптоэлектронных приборов и оформить в виде реферата.

2 уровень

Выполнить задания уровня 1. Изучить устройство и принцип работы предложенного вида полупроводникового прибора и оформить в виде реферата.

3 уровень

Выполнить задание уровня 2. Изучить основные характеристики и маркировку предложенного полупроводникового прибора.

Варианты индивидуальных заданий

1. Тиристоры.
2. Симисторы.
3. Динисторы.
4. Тринисторы.
5. Фоторезисторы.
6. Фотодиоды.
7. Фототранзисторы.
8. Светодиоды.
9. Оптроны.

ПРИМЕРЫ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

1 уровень

1. Назовите простые полупроводниковые материалы.
2. От чего зависят свойства полупроводниковых материалов?
3. Назовите полупроводниковые приборы.
4. Как классифицируются полупроводниковые материалы?
5. Где применяются варисторы и термисторы?

2 уровень

1. Как влияют на электропроводность полупроводников температура, деформация, освещение, электрическое поле?
2. Сущность электронно-дырочного перехода ($p-n$ -перехода).
3. Чем определяется электропроводность полупроводников?
4. Где в электротехнике применяются простейшие полупроводниковые элементы?
5. Опишите методы получения монокристаллов.

3 уровень

1. В чем заключается эффект выпрямления на $p-n$ -переходе?
2. Устройство и принцип работы полупроводникового диода.
3. Структура маркировки варисторов и термисторов.
4. Применение оптоэлектронных приборов в системах автоматизации.

Модуль 5 МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В результате изучения модуля студент должен **знать:**

- понятия: магнитный материал, домен, диамагнетик, парамагнетик, ферромагнетик, ферримагнетик, антиферромагнетик, гистерезис, магнитострикция;
- доменную структуру магнитных материалов, кривую намагничивания ферромагнетиков, петлю гистерезиса, магнитомягкие материалы, магнитотвердые материалы;
- область применения магнитных материалов в зависимости от их свойств;

уметь:

- выбирать необходимые магнитные материалы;
- объяснять причину выбора материала;
- определять свойства выбранного материала и оценивать их эффективность, работать в малой группе;
- анализировать и оценивать собранные данные, работать самостоятельно.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Магнитный материал – любое вещество, помещенное в магнитное поле.

Домен – макроскопическая область, электронные спины, в пределах которой оказываются ориентированными параллельно друг другу и одинаково направленными.

Диамагнетик – вещество, которое состоит из атомов с полностью заполненными оболочками, т. е. не обладающих магнитными моментами.

Парамагнетик – вещество, которое состоит из атомов с не полностью заполненными оболочками, т. е. обладающих магнитными моментами.

Ферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Антиферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю.

Ферримагнетик – кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля

Гистерезис – это явление, при котором особенностью протекания процесса намагничивания магнетиков является его отставание от изменения напряженности внешнего поля.

Магнитострикция – это изменение формы и размеров образца (монокристалла) при изменении его магнитного состояния.

ОСНОВНОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Лекция Магнитные материалы и их характеристики

1. Классификация магнитных материалов.
2. Магнитомягкие материалы.
3. Магнитотвердые материалы.
4. Ферриты.

Классификация магнитных материалов

Магнитные свойства материалов обусловлены внутренними скрытыми формами движения электрических зарядов, представляющими собой элементарные круговые токи. Такими круговыми токами являются: вращение электронов вокруг собственных осей – **электронные спины** и орбитальное вращение электронов в атомах.

Электрон обладает орбитальным и спиновым магнитными моментами, которые, геометрически складываясь, создают результирующий момент атома. Следует подчеркнуть, что на полностью заполненных электронами орбитах спиновой и орбитальный моменты скомпенсированы и, таким образом, магнитный момент атома определяется только электронами на не полностью заполненных внутренних орбитах.

Явление ферромагнетизма связано с образованием внутри некоторых материалов ниже определенной температуры (точки Кюри) таких кристаллических структур, при которых в пределах макроскопических областей, называемых **магнитными доменами**, электронные спины оказываются ориентированными параллельно друг другу и одинаково направленными. Таким образом, характерным для ферромагнитного состояния вещества является наличие в нем

самопроизвольной (спонтанной) намагниченности без приложения внешнего магнитного поля. Однако, хотя в ферромагнетике и образуются самопроизвольно намагниченные области, но направления магнитных моментов отдельных доменов получаются самыми различными. Магнитный поток такого тела во внешнем пространстве будет равен нулю. Возможные размеры доменов для некоторых материалов составляют около $0,001\text{--}10\text{ мкм}^3$ при толщине пограничных слоев между ними в несколько десятков – сотен атомных расстояний.

Магнитострикционными являются ферромагнетики, обладающие магнитной анизотропией, выражающейся в различной способности намагничиваться по различным осям кристалла.

Магнитострикция – это изменение формы и размеров образца (монокристаллов) при изменении его магнитного состояния.

Магнитострикция используется в генераторах звуковых и ультразвуковых частот, в устройствах стабилизации частоты и электро-механических фильтрах.

С технической точки зрения в качестве магнитных материалов наибольший интерес представляют ферро-, антиферро- и ферримагнетики.

Ферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Антиферромагнетик – кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю.

Ферримагнетик – кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Схематично доменная структура и магнитный порядок магнетиков может быть представлен в следующем виде (рисунок 1.19).

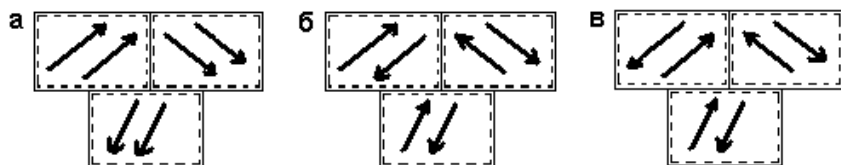


Рисунок 1.19 – Доменная структура магнетиков:

a – ферромагнетики; *б* – антиферромагнетики; *в* – ферримагнетики

Несмотря на различия в строении и магнитных свойствах, при помещении во внешнее магнитное поле процессы ориентации магнитных моментов характеризуются одними и теми же закономерностями, т. е. процессы намагничивания магнетиков аналогичны. Поэтому нет необходимости рассматривать их отдельно за исключением особых случаев.

При отсутствии внешнего магнитного поля отдельные домены со своим собственным направлением магнитного момента расположены хаотически, их моменты взаимно компенсируются, и результирующее внутреннее магнитное поле равно нулю. При помещении магнетика во внешнее магнитное поле происходит его намагничивание. Процесс намагничивания характеризуется зависимостью магнитной индукции B от напряженности внешнего поля H (рисунке 1.20).

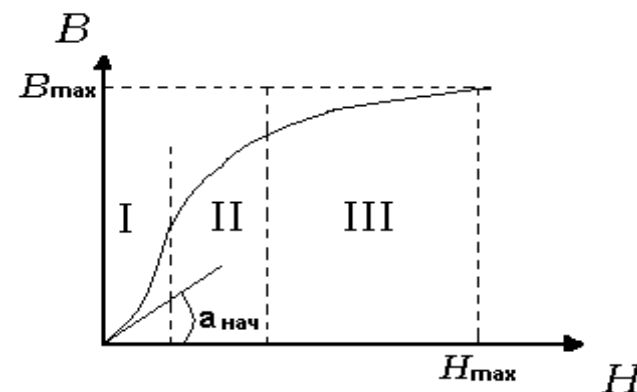


Рисунок 1.20 – Кривая намагничивания магнетика

При слабых внешних полях (участок I) намагничивание начинается за счет ориентации магнитных моментов доменов, имеющих минимальный угол с направлением внешнего поля. Затем происходит смещение границ доменов, у которых направления моментов близки к направлению внешнего поля. При этом их объем увеличивается за счет уменьшения объемов доменов, достаточно сильно отличающихся по направлению магнитного момента от направления поля. Принято считать, что участок I характеризуется смещением доменных границ, а процесс намагничивания – обратимым, т. е. при снятии внешнего поля доменная структура возвращается в исходное состояние.

На участке II происходит вращение доменов, в результате которого все диполи ориентируются по направлению внешнего поля.

После снятия магнитного поля домены будут стремиться вернуться в исходное состояние, что и происходит, если отклонение диполей от исходного состояния было небольшим. При достаточно больших отклонениях домены могут не вернуться в исходное состояние. Это новое состояние будет характеризовать остаточную намагниченность вещества.

На участке III процесс намагничивания происходит за счет дополнительной ориентации спиновых моментов отдельных электронов вдоль поля. Когда все магнитные моменты доменов сориентированы по направлению поля, магнитная проницаемость достигает максимального значения, соответствующего состоянию насыщения, когда магнитная индукция максимальна. При дальнейшем увеличении H магнитная индукция уже не растет.

Магнитная индукция B связана с напряженностью внешнего поля H соотношением:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (1.39)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ – относительная магнитная проницаемость вещества или просто магнитная проницаемость, характеризующая способность вещества намагничиваться.

При изменении температуры происходит изменение магнитного состояния вещества. Рост температуры усиливает тепловые колебания атомов, которые стремятся разрушить состояние самопроизвольной намагниченности магнетика. Температура, при которой происходит потеря магнитных свойств, называется точкой Кюри.

Особенностью протекания процесса намагничивания магнетиков является его отставание от изменения напряженности внешнего поля. Это явление называется **гистерезисом**. Поэтому в переменном магнитном поле зависимость магнитной индукции от напряженности внешнего поля представляет собой **петлю гистерезиса** (рисунок 1.21).

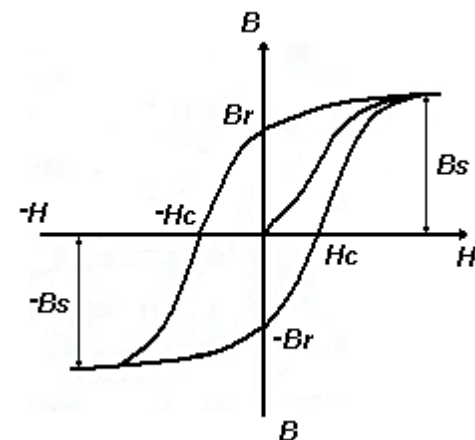


Рисунок 1.21 – Петля магнитного гистерезиса

Петля гистерезиса является очень важной характеристикой магнитного материала, поскольку она имеет ряд характерных точек, позволяющих количественно оценивать свойства магнетика. К ним относятся:

- коэрцитивная сила H_c – напряженность внешнего поля, которую надо приложить, чтобы индукция внутреннего поля стала равной нулю, т. е. чтобы полностью размагнитить материал;
- остаточная индукция B_r – значение индукции внутреннего магнитного поля при напряженности внешнего поля, равной нулю;
- максимальная магнитная индукция $\pm B_{\max} = B_s$;
- напряженность магнитного поля при насыщении $\pm H_{\max} = H_s$;

Материалы с малым значением H_c и большой магнитной проницаемостью называются **магнитомягкими** материалами. Материалы с большой коэрцитивной силой и сравнительно малой проницаемостью называются **магнитотвердыми** материалами.

По площади петли гистерезиса можно судить о магнитных потерях при перемагничивании. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше энергии внешнего поля затрачивается на нагревание материала в процессе перемагничивания.

Наиболее существенными видами потерь являются потери на гистерезис, т. е. перемагничивание, и потери на вихревые токи, т. е. токи Фуко.

При перемагничивании происходит смещение границ доменов и вращение магнитных диполей, для чего требуется затрата энергии внешнего поля. Это и есть потери на гистерезис, которые пропорциональны частоте внешнего магнитного поля.

Потери на вихревые токи связаны с нагревом материала, а величина потерь пропорциональна квадрату частоты внешнего магнитного поля.

Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы, обладая высокой магнитной проницаемостью, небольшой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис, используются в качестве сердечников трансформаторов, электромагнитов, в измерительных приборах и в других случаях, где необходимо при наименьшей затрате энергии достигнуть наибольшей индукции. Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах используют магнитомягкие материалы с повышенным удельным электрическим сопротивлением; обычно применяются магнитопроводы, собранные из отдельных изолированных друг от друга тонких листов.

Наиболее широко применяемыми магнитомягкими материалами являются технически чистое железо, листовая электротехническая сталь, сплавы $Fe-Ni$ с различным содержанием Ni , называемые пермаллоями, сплавы $Fe-Si-Al$, называемые альсиферами.

Наиболее применимой является низкоуглеродистая сталь – разновидность технически чистого железа.

У чистого железа мало удельное объемное сопротивление ρ_v , поэтому оно применяется редко. Электролитическое железо также редко применяется ввиду высокой стоимости.

Кремнистые стали представляют собой твердый раствор кремния в железе. Введение Si производят с целью повышения ρ_v . При этом возрастает μ и уменьшается H_c . Увеличение процентного содержания Si снижает механические свойства материала, поэтому обычно его доля не превышает 5 %.

На основе кремнистых сталей изготавливают электротехнические стали различных марок, подразделяемых по содержанию Si , по способу изготовления, магнитным и электрическим свойствам. Они обладают высокой индукцией, малыми значениями H_c и потерями на гистерезис. Поэтому их широко применяют для изготовления статоров и роторов электрических машин, сердечников силовых трансформаторов, магнитопроводов различных аппаратов и устройств.

Низкокоэрцитивные сплавы (пермаллои) являются сплавами Fe и Ni с легирующими добавками хрома, кобальта, кремния, меди, марганца, которые изменяют количественные и качественные характеристики материала, а именно, повышают ρ_v , и максимальная магнитная проницаемость μ_{max} , улучшают механические свойства и температурную стабильность. Область применения – измерительные приборы, сердечники малогабаритных силовых и импульсных трансформаторов и дросселей.

Недостатками пермаллоев являются высокая чувствительность к механическим воздействиям, низкое значение ρ_v и зависимость магнитной проницаемости от частоты. Поэтому на повышенных частотах предпочтительнее низконикелевые пермаллои.

Альсиферы – тройные сплавы $Al-Si-Fe$, обладающие хорошими магнитными свойствами. Однако они отличаются высокой хрупкостью, твердостью и теряют свойства при механической обработке. Поэтому детали из них изготавливают литьем. Альсиферы используют в виде порошков для изготовления ВЧ сердечников методом прессования.

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы (МТМ) характеризуются широкой петлей гистерезиса, т. е. высоким значением коэрцитивной силы H_c (до 800 кА/м) и применяются для изготовления постоянных магнитов, создающих магнитное поле в зазоре магнитопровода, а также записи и длительного хранения звуковой и другой информации.

Магнитная проницаемость $\mu_{МТМ}$ меньше, чем у МММ, причем с увеличением H_c она понижается.

По составу и способу получения магнитотвердые материалы классифицируются на:

- литые магнитотвердые сплавы;
- порошковые МТМ;
- прочие МТМ.

Магнитотвердые литые сплавы характеризуются высокими магнитными и низкими механическими свойствами. При их изготовлении применяют термомагнитную обработку, заключающуюся в охлаждении сплава от 1250 °С до 500 °С в магнитном поле. Этим достигается кристаллическая магнитная текстура. Кроме того, в процессе изготовления используют направленную кристаллизацию. Материалы данной группы составляют 80 % всех потребляемых МТМ.

Металлокерамические магниты получают из порошков сплавов различного состава путем прессования без связующего материала и последующего спекания при высокой температуре. По своим свойствам эта группа близка к литым сплавам, однако, дороже по стоимости.

Металлопластические магниты изготавливают аналогично металлокерамическим, но они прессуются с изолирующей добавкой (связкой) и спекаются при невысокой температуре, достаточной для полимеризации связующего вещества. По своим свойствам эта группа материалов несколько хуже литых сплавов. Однако они имеют большое удельное сопротивление ρ_v за счет диэлектрической связи и относительно дешевы.

Ферриты получили наибольшее распространение, так как они легко изготавливаются, хотя технология их производства имеет жесткие ограничения на состав и соблюдение режимов. Особенностью изготовления ферритов с ППГ является высокая температура окончательного обжига (до 1400 °С) и воздушная закалка после спекания, заключающаяся в естественном охлаждении на воздухе сразу же после обжига.

Наибольшее распространение получили ферриты на основе $Mg-Mn$, а также ферриты, содержащие Li , что обеспечивает высокую температурную стабильность.

Технология изготовления ферритов оказывает весьма существенное влияние на свойства готовых изделий. Технологический процесс производства ферритовых изделий вкратце сводится к тому, что предварительно получают ферритовый порошок, состоящий из тонко измельченных, тщательно перемешанных и предварительно обожженных оксидов соответствующих металлов. В него добавляют пластификатор – обычно раствор поливинилового спирта, и из полученной массы прессуют под большим давлением изделия требуемой формы. Изделия подвергают обжигу при температуре 1100–1400 °С. При этом происходит спекание и образование твердых растворов ферритов. Обжиг должен производиться обязательно в окислительной среде (обычно в воздухе). Присутствие даже в небольшом количестве водорода в рабочем пространстве печи может вызвать частичное восстановление оксидов, что приведет к резкому увеличению потерь. Усадка ферритов при обжиге может достигать 20 %. Ферриты – твердые и хрупкие материалы, не позволяющие производить обработку резанием и допускающие только шлифовку и полировку.

Магнитомягкие ферриты с высокой магнитной проницаемостью имеют максимальную индукцию свыше 0,3 Тл и малую коэрцитивную силу, около 16 А/м. Ферриты с большим значением μ_r обладают и большим значением потерь, быстро растущих с увеличением частоты. Основные физические характеристики ферритов следующие: плотность 4–5 Мг/м³, удельная теплоемкость около 0,7 кДж/(кг. К), коэффициент теплопроводности примерно 5 Вт/(м.К), температурный коэффициент линейного расширения около 10^{-5} К^{-1} , удельное сопротивление $10^{-3}–10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Ферриты имеют относительно большую диэлектрическую проницаемость, зависящую от частоты и состава ферритов. С повышением частоты диэлектрическая проницаемость ферритов падает. Тангенс угла потерь ферритов – от 0,005 до 0,1. В ферритах наблюдается явление магнитострикции. У различных ферритов этот эффект проявляется по-разному. Ферриты с низкой температурой Кюри обладают меньшим магнитострикционным эффектом.

В настоящее время применяются следующие группы смешанных ферритов: марганец – цинковые, никель – цинковые и литий – цинковые. Наиболее распространенная маркировка магнитомягких ферритов отражает следующее. Первое число означает величину $\mu_{тн}$, затем идут буквы, обозначающие частотный диапазон применения, ограничиваемый сверху значением $f_{гр}$. Под **границей частотой** понимают частоту, при которой начинается быстрый рост тангенса угла потерь феррита. Ферриты для звуковых, ультразвуковых и низких радиочастот для кратности обозначают буквой Н (низкочастотные). Граничная частота их для разных марок изменяется от 0,1 до 50 МГц. В маркировке высокочастотных ферритов имеются буквы ВЧ, граничная частота их – от 50 до 600 МГц. Далее в маркировке магнитомягких ферритов следуют буквы, обозначающие состав материала: М – марганцево-цинковый, Н – никелево-цинковый и т. п. В маркировку СВЧ-ферритов введены цифровые индексы разновидностей этих материалов.

Вопросы для самоконтроля

1. Как классифицируются магнитные материалы?
2. Какие материалы называются магнитомягкими?
3. Какие материалы называются магнитотвердыми?
4. Что называется коэрцитивной силой?
5. Назовите основные характеристики магнитных материалов.
6. Чем обусловлены магнитные свойства материалов?

7. Что называется магнитными доменами?
8. Что называется пермаллоями и где они применяются?
9. Что называется альсиферами и где они применяются?
10. Какова особенность изготовления ферритов?
11. Как классифицируются магнитотвердые материалы по составу и способу получения?
12. Что называется магнитострикцией?
13. Назовите основные характеристики пермаллоев.
14. Какие сплавы называются пермендюритами и где они применяются?
15. Назовите разновидности термомагнитных сплавов.
16. Как влияют на пермаллои легирующие добавки?
17. Структура маркировки ферритов.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ И ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа «Магнитные материалы в электроустановках»

Общие сведения

Электрический аппарат – это электротехническое устройство, которое используется для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты управления и регулирования установок, предназначенных для передачи, преобразования, распределения и потребления электроэнергии.

Под электрическими аппаратами понимается широкий круг всевозможных устройств, применяемых в быту, промышленности и энергетике.

В настоящей работе рассмотрены основные материалы, которые применяются при изготовлении рубильников, автоматических воздушных выключателей, предохранителей.

Рубильники – предназначены для ручного непосредственного или дистанционного замыкания и размыкания электрических цепей.

Пакетные выключатели и переключатели – предназначены для осуществления достаточно сложных переключений одновременно в нескольких электрических цепях.

Плавкий предохранитель – аппарат, автоматически отключающий электрическую цепь при коротком замыкании или перегрузке в ней.

Автоматический воздушный выключатель (автомат) – аппарат, предназначенный для автоматического размыкания электриче-

ских цепей при ненормальных режимах работы и для редких оперативных переключений при нормальных режимах работы.

Основную массу электрических машин, эксплуатируемых в сельском хозяйстве, составляют асинхронные короткозамкнутые односкоростные двигатели трехфазного тока.

Электрический двигатель состоит из неподвижной части (статора) и подвижной (ротора). Активными частями статора являются магнитопровод, обмотка и корпус.

Магнитопровод статора изготавливают из штампованной электротехнической стали, набранной в пакет, скрепляют его и запрессовывают в корпус. В качестве изоляции между листами стали используют слой оксидной пленки (толщиной 3–5 мкм) или лаковой пленки (толщиной 15–20 мкм).

Ротор представляет собой укрепленный на валу цилиндр, собранный так же, как и статор, из листов электротехнической стали.

Материал корпуса и магнитопровода электрических двигателей определяется, исходя из их серии и высоты оси вращения (это расстояние от плоскости, на которой установлен электродвигатель до осевой линии его вала).

Магнитопроводы двигателей серии АИР выполнены из холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,5 мм, причем, если двигатели с $h = 45–63$ мм – из стали марки 2013, с $h = 71–160$ мм – марки 2214, с $h = 160–250$ мм – марки 2212 или 2214 и с $h = 280–355$ мм – из стали марки 2312 или 2412.

Отдельные элементы конструкции двигателей несколько различаются в зависимости от высоты оси вращения.

Сталь электротехническую тонколистую подразделяют и маркируют:

- а) по структурному состоянию и виду прокатки на классы (первая цифра марки): 1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная, 3 – холоднокатаная изотропная с ребровой структурой;
- б) по содержанию кремния (вторая цифра марки): 0 – с содержанием кремния до 0,4 % включительно (нелегированная), 1 – свыше 0,4 до 0,8 % включительно, 2 – свыше 0,8 до 1,8 % включительно, 3 – свыше 1,8 до 2,8 % включительно, 4 – свыше 2,8 до 3,8 % включительно, 5 – свыше 3,8 до 4,8 % включительно;
- в) по основной нормируемой характеристике на группы (третья цифра в марке): 0 – удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$); 1 – при 1,5 Тл и 50 Гц ($P_{1,5/50}$); 2 – при 1,0 Тл и 400 Гц ($P_{1,0/400}$); 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при

напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при 10 А/м ($B_{0,4}$).

Сталь маркируется четырьмя цифрами. Вместе первые три цифры означают тип стали; четвертая – порядковый номер типа стали.

Плотность и удельное электрическое сопротивление электротехнической стали зависят от степени ее легирования кремнием, как это показано в таблицах 1.22, 1.23.

Таблица 1.22 – Предельное значение удельных потерь и магнитной индукции электротехнической стали класса 2

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м, не менее				
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10 000	30 000
2013	0,65	3,10	7,0	1,53	1,64	1,74	1,85	2,05
	0,50	2,50	5,6	1,54	1,65	1,75	1,85	2,05
2112	0,65	3,50	8,0	1,46	1,59	1,67	1,77	2,02
	0,50	2,60	6,0	1,46	1,60	1,68	1,77	2,02
2212	0,65	2,60	6,3	1,42	1,58	1,67	1,77	2,00
	0,50	2,20	5,0	1,42	1,60	1,68	1,77	2,00
2312	0,65	2,40	5,6	1,38	1,54	1,64	1,72	1,96
	0,50	1,75	4,0	1,40	1,56	1,66	1,74	1,96
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95

Таблица 1.23 – Предельное значение удельных потерь и магнитной индукции электротехнической стали класса 3

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м, не менее		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500
3411	0,50	1,10	2,25	3,20	–	–	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	–	–	1,75
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,90

Аудиторные задания

1 уровень

Используя представленные в лаборатории образцы электрических машин и аппаратов, ознакомьтесь с их устройством и изобразить эскизы по указанию преподавателя. Изучить магнитные материалы, используемые в конструкции представленного электрооборудования. Результаты представить по форме таблицы 1.24.

Таблица 1.24

Наименование оборудования	Составные части магнитной системы оборудования	Вид магнитного материала	Наименование материала

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Изучить маркировки и характеристики магнитных материалов, используемых в конструкциях представленного оборудования с использованием справочной литературы и настоящих методических указаний. Результаты представить по форме таблицы 1.25.

Таблица 1.25

Наименование оборудования	Составные части магнитной системы оборудования	Вид магнитного материала	Наименование и марка материала	Основные характеристики

Лабораторная работа

«Исследование электрических и магнитных характеристик магнитопровода трансформатора»

Общие сведения

О магнитных свойствах материалов судят по магнитному потоку, магнитной индукции, магнитной проницаемости и напряженности магнитного поля.

На практике чаще всего используют понятие относительной магнитной проницаемости μ , которая показывает, во сколько раз магнитная индукция при распространении магнитного поля в данном материале больше или меньше, чем магнитная индукция в вакууме.

В зависимости от значения μ материалы подразделяют на диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные.

Для диамагнитных веществ $\mu < 1$, парамагнитных $\mu > 1$. Однако в обоих случаях μ близко к единице. Для ферромагнитных материалов значение μ значительно больше единицы.

В качестве электротехнических магнитных материалов используют только ферромагнитные. Они способны сильно намагничиваться. О поведении ферромагнитных материалов в магнитном поле судят по зависимости B от H , характеризующей процесс намагничивания и размагничивания материала под воздействием внешнего магнитного поля.

Гистерезисный цикл сопровождается также потерей энергии, которая выделяется в материале в виде теплоты. Значение потерь пропорционально площади, ограниченной петлей гистерезиса и частоте переменного магнитного поля.

Для снижения потерь магнитопроводы трансформатора выполняют из тонкостенных листов, изолированных друг от друга.

Ферромагнитные материалы бывают магнитомягкими и магнитотвердыми. У магнитомягких – малая площадь гистерезисной петли, а у магнитотвердых – большая (рисунок 1.22).

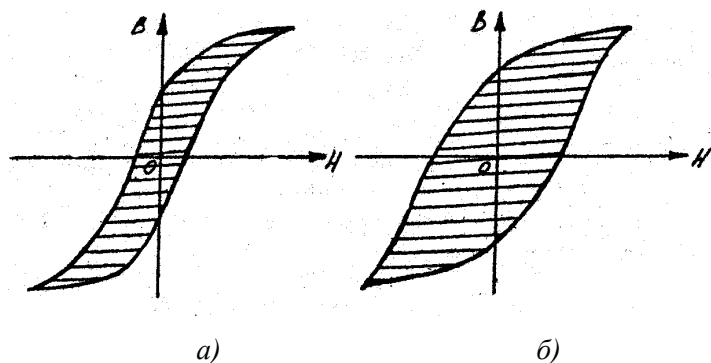


Рисунок 1.22 – Вид петли гистерезиса магнитомягкого (а) и магнитотвердого (б) материалов

Магнитомягкие материалы используются в основном как проводники магнитного потока, которые идут на изготовление сердечников трансформаторов, роторов и статоров электрических машин.

Магнитотвердые материалы используются как источники магнитного поля, которые идут на изготовление постоянных магнитов.

В данной лабораторной работе исследуется магнитопровод трансформатора, выполненный из магнитомягкого материала.

Изменение напряжения в электрической сети, числа витков в обмотке или сечения в магнитной цепи вызывает изменение тока холостого хода, магнитной индукции и потерь в магнитопроводе.

$$U = 4,44 f B Q W, \quad (1.40)$$

где U – напряжение, приложенное к обмотке, В;

f – частота тока, Гц;

B – индукция, Тл;

Q – площадь сечения магнитопровода, м²;

W – число витков.

$$P_c = P_{xx} - P_m, \quad (1.41)$$

$$P_m = I_{xx}^2 R, \quad (1.42)$$

где R – сопротивление обмотки, Ом.

Описание лабораторной установки и хода выполнения лабораторной работы

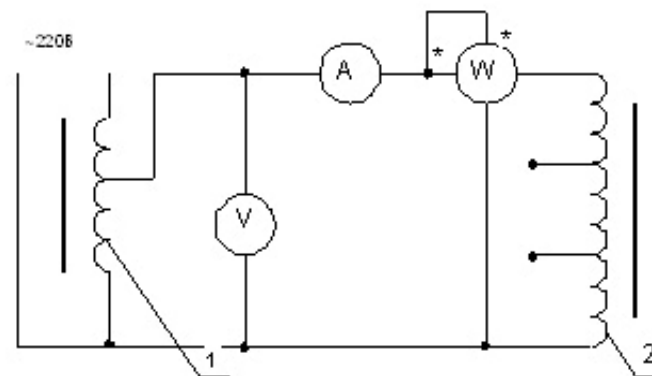


Рисунок 1.23 – Схема испытания магнитопровода:
1 – автотрансформатор; 2 – магнитопровод с обмоткой

Лабораторный стенд для исследования электрических и магнитных характеристик магнитопровода трансформатора состоит из автотрансформатора, магнитопровода с обмоткой, вольтметра, амперметра, ваттметра.

Собранная схема для испытания магнитопровода предъявляется преподавателю для проверки и с его разрешения включается в сеть.

При помощи автотрансформатора устанавливается напряжение для двух сечений магнитопровода при заданном числе витков обмотки (по указанию преподавателя) от 60 до 100 (контроль напряжения производится по вольтметру). Сечение магнитопровода определяется путем измерений высоты и ширины магнитопровода, представленного на стенде. При каждом значении напряжения фиксируется показание амперметра и ваттметра и результаты измерений вносятся в таблицу 1.26.

Таблица 1.26 – Зависимость магнитного потока и потерь в трансформаторе от напряжения питания катушки и сечения магнитопровода

№ п/п	По эксперименту			По расчету				Примечание
	U, В	I _{xx} , А	P _{xx} , Вт	B, Тл	B ² , Тл	P _c , Вт	P _м , Вт	
1.								Q _n = W = R =
2.								
3.								
4.								
5.								
1.								Q _n = W = R =
2.								
3.								
4.								
5.								

Для исследования зависимости тока холостого хода от числа витков при неизменных напряжении сети и сечении магнитопровода (по указанию преподавателя) меняется число витков, указанное на стенде, для каждого числа витков записывается сопротивление.

Таблица 1.27 – Зависимость магнитного потока и потерь в трансформаторе от количества витков катушки

№ п/п	По эксперименту				По расчету				Примечание
	W	R, Ом	I _{xx} , А	P _{xx} , Вт	B, Тл	B ² , Тл	P _c , Вт	P _м , Вт	
1.									U =
2.									
3.									Q =

Задания

1 уровень

Вычертить и собрать схему для исследования электрических и магнитных характеристик магнитопровода трансформатора. В соответствии с описанием хода лабораторной работы исследовать зависимость тока холостого хода от напряжения и зависимость тока холостого хода от числа витков (таблица 1.26 и 1.27). Магнитную индукцию рассчитать по формуле 1.40, потери в меди P_м по формуле 1.41 и потери в стали P_c по формуле 1.42.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Построить графики зависимостей I_{xx} = f(U_{xx}), I_{xx} = f(U_{xx}), I_{xx} = f(B), P_c = f(B²), для двух сечений магнитопровода. Построить графики зависимостей I_{xx} = f(W), B = f(W), P_c = f(W).

3 уровень

Выполнить задание уровня 2. Провести анализ полученных результатов.

Вопросы предварительного контроля

1. Как классифицируются магнитные материалы?
2. Назовите основные характеристики магнитных материалов.
3. Какие магнитомягкие материалы изучаются в данной работе?
4. Где применяются магнитомягкие и магнитотвердые материалы?

Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1 уровень

1. Как делятся материалы по относительной магнитной проницаемости?
2. В чем разница между магнитомягкими и магнитотвердыми материалами?
3. От чего зависят потери в электротехнической стали?
4. Какой прибор используется в лабораторном стенде для измерения потерь холостого хода?
5. Как рассчитываются потери в меди и потери в стали?

2 уровень

1. Что такое гистерезис? О чем можно судить, рассматривая петлю гистерезиса?
2. Опишите процесс намагничивания ферромагнетиков.
3. Как рассчитывается магнитная индукция?
4. От чего зависит ток холостого хода в цепи?
5. Способы уменьшения потерь в магнитопроводах силовых трансформаторов.

3 уровень

1. Как связана доменная структура с основной кривой намагничивания?
2. Описать процесс намагничивания ферромагнетиков из данных, полученных в лабораторной работе.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1. уровень

Изучить состав, область применения, способ получения предложенных специальных магнитных материалов и оформить в виде реферата.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Изучить характеристики, маркировку, достоинства и недостатки предложенных специальных магнитных материалов и оформить в виде реферата.

3 уровень

Выполнить задание уровня 2. Провести сопоставление предложенных специальных магнитных материалов, проанализировать направление их взаимозаменяемости и оформить в виде реферата.

Варианты индивидуальных заданий

1. Перминвар.
2. Пермендюр.
3. Магнитомягкие ферриты.
4. Ферриты с ППП.
5. Магнитострикционные ферриты.
6. Ферриты для СВЧ.
7. Магнитодиэлектрики.
8. Аморфные магнитомягкие материалы.
9. Компенсаторы.
10. Изотерм.

ПРИМЕРЫ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ МОДУЛЯ 5

1 уровень

1. Классификация магнитомягких материалов.
2. Классификация магнитотвердых материалов.
3. Какие материалы относятся к магнитным специализированного назначения?
4. Как рассчитывается относительная магнитная проницаемость?
5. Что называется коэрцитивной силой, покажите ее на петле гистерезиса?
6. Какие бывают ферриты?

2 уровень

1. Что собой представляют магнитодиэлектрики и где они применяются?
2. Где применяются литые магнитотвердые сплавы?
3. Опишите магнитные свойства легированных мартенситных сталей.
4. Что собой представляют пермаллои и где они применяются?
5. Изобразите кривую намагничивания и объясните ее.

3 уровень

1. Перечислите современные магнитные материалы.
2. Какие бывают магнитные материалы, получаемые из порошков?

МОДУЛЬ-РЕЗЮМЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В результате изучения модуля студент должен **знать**:

- перспективные электротехнические материалы и технологию их производства;
- основные направления совершенствования электротехнических материалов;

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

Практическая работа

«Перспективные электротехнические материалы. Современные технологии получения электротехнических материалов»

Общие сведения

Основные направления развития производства электроизоляционных слюдяных лент для высоковольтной изоляции:

- разработка и совершенствование предварительно пропитанных лент с повышенным содержанием слюды, высокими электрическими и механическими характеристиками для системы изоляции класса нагревостойкости F ;
- разработка и совершенствование непропитанных лент с повышенным содержанием слюды, высокой пористостью для применения в технологии вакуум-нагнетательной пропитки.

Одним из видов современных изоляционных материалов является предварительно пропитанная лента марки Элмикатерм 52409 с использованием эпоксиноволачного связующего, стеклоткани и слюдяной бумаги с улучшенными показателями. Лента Элмикатерм 52409 может выпускаться с разделительной пленкой (в этом случае в наименовании добавляется индекс 3).

На основании данных исследований физико-механических свойств различных систем изоляции определено, что изоляция на основе ленты Элмикатерм 52409 обладает более высокими характеристиками, особенно при высоких температурах; изоляция имеет более высокую стабильность физико-механических свойств в широком интервале температур, включая рабочие температуры.

Требования к композиционному составу непропитанных лент примерно такие же, как и для предварительно пропитанных

лент: максимальное снижение толщины подложки и соответствующее увеличение поверхностной плотности слюдяной бумаги. Из-за наличия небольшого количества технологического связующего в непропитанной ленте слюдяная бумага может легко повреждаться при изоляционных работах. Поэтому для сохранения целостности и снижения вероятности повреждения слюдяного барьера должны быть существенно повышены адгезионная прочность слюдяной бумаги к подложке и эластичность ленты. Повышение длительной электрической прочности и снижение диэлектрических потерь, кроме того, определяется типом используемого катализатора, так как именно катализатор определяет количество и степень отверждения связующего вещества в обмотках катушек.

Кроме того, в последнее время разработаны следующие изоляционные материалы.

Слюдопласт Элмикаформ 324 Пл предназначен для изготовления коллекторных манжет и фасонных изоляционных деталей электрических машин и аппаратов с системами изоляции класса нагревостойкости F (155 °C). Его отличительными характеристиками по сравнению с используемыми в настоящее время формовочными миканитами являются отличные электрические характеристики за счет использования полиэтилентерефталатной пленки, легкость и удобство при формовании, низкая разнотолщинность заготовок, что исключает отбраковку манжет по толщине изоляции.

Слюдопласт Элмикаформ 324 Пл изготавливается номинальной толщиной: 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; и 0,50 мм.

Компаунд ПК-11 (э) предназначен для пропитки обмоток высоковольтных электрических машин и тяговых электродвигателей с системами изоляции класса нагревостойкости F .

Для герметизации пустот в обмотках электрических машин и аппаратов с системами изоляции класса нагревостойкости F разработана мастика электроизоляционная терморезистивная марки МЭТ-155. Мастика представляет собой однородную пластичную массу на основе терморезистивного связующего вещества и слюдяного наполнителя, не содержащую растворитель.

Основные свойства мастики МЭТ-155:

Внешний вид и цвет	Однородная масса от светло-серого до черного цвета;
Плотность, г/см ³	1,5±0,2;
Содержание слюды, %	55-4;
Время отверждения, ч, не более	2,5;
Электрическая прочность, кВ/мм, не менее	4,5.

В зависимости от назначения и способа применения мастика может выпускаться по требованию заказчика от низковязкого до высоковязкого состояния, при этом сохраняются все электрические показатели.

В связи с требованиями изготовителей тяговых электродвигателей по повышению класса нагревостойкости изоляции разработаны ленты слюдяные пропитанные марки Элмикатерм 529029 и 529099, которые предназначены для изоляции электрических машин и аппаратов с системами изоляции класса нагревостойкости Н.

Лента Элмикатерм 529029 представляет собой композицию, состоящую из слюдяной бумаги, ткани электроизоляционной из стеклянных крученых комплексных нитей и полиимидной пленки, склеенных между собой и пропитанных электроизоляционным компаундом.

Лента марки Элмикатерм 529099 представляет собой композицию, состоящую из слюдяной бумаги и ткани электроизоляционной из стеклянных крученых комплексных нитей, склеенных между собой и пропитанных электроизоляционным компаундом.

Ленты Элмикатерм 529029 и 529099 имеют высокие электрические свойства при повышенных температурах, технологичны и могут перерабатываться на стандартном оборудовании по действующим технологическим режимам. Технологическое опробование на ряде заводов показало, что обе ленты с успехом могут заменить используемые сегодня микаленты марок ЛФК-ТТ, ЛМК-ТТ.

Аудиторные задания

1 уровень

Ознакомиться с представленными в лаборатории образцами современных электротехнических материалов и с использованием справочной литературы привести их характеристики в отчете.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Дать краткое описание технологии производства изучаемых электротехнических материалов.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные направления совершенствования электроизоляционных материалов.
2. Назовите технология производства современных электроизоляционных материалов на основе слюды.
3. Охарактеризуйте перспективные проводниковые материалы.
4. Назовите современные полупроводниковые материалы и охарактеризуйте их.
5. Опишите технологию производства магнитных нанокристаллических материалов.

РАЗДЕЛ 2 КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

МОДУЛЬ 1 СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В результате изучения модуля студент должен:

знать:

- понятия: вакансия, дислокация, внедренный атом, полиморфизм, деформация, твердость, прочность, пластичность, ударная вязкость, перлит, аустенит, феррит, сталь, чугун, латунь, бронза;
- виды дефектов кристаллической решетки, диаграмму состояний сплавов «железо-углерод», процесс выплавки чугуна и стали, углеродистые стали, легированные стали, сплавы на основе цветных металлов, виды чугунов;
- область применения металлов и сплавов в зависимости от их свойств;

уметь:

- классифицировать типы кристаллических решеток;
- выбирать необходимые металлы и сплавы;
- объяснять причину выбора материала;
- определять марку имеющегося материала и определять дефекты структуры металлов и сплавов, работать в малой группе.

НАУЧНО–ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Вакансия – незаполненный по той или иной причине узел кристаллической решетки.

Дислокация – линейные несовершенства кристаллической решетки.

Внедренный атом – атом данного или другого химического элемента, расположенный между узлами кристаллической решетки.

Полиморфизм – способность металла изменять тип своей кристаллической решетки в зависимости от температуры.

Деформация – это изменение формы и размеров изделия; может быть растягивающей, сжимающей и сдвиговой.

Твердость – способность материала оказывать сопротивление внедрению в него под действием внешней силы наконечника из другого, более твердого материала.

Прочность – свойство, которое характеризует сопротивление материала пластической деформации под действием приложенной силы.

Пластичность – способность материала к пластической деформации.

Ударная вязкость – свойство, которое показывает способность материала сопротивляться разрушению при ударном приложении нагрузки.

Перлит – механическая смесь тонких пластинок цементита и находящихся между ними более толстых пластинок феррита.

Аустенит – это фаза, различимая в микроскоп в виде зерен и представляющая собой твердый раствор внедрения углерода в γ -Fe.

Сталь – сплав железа с углеродом при содержании углерода до 2,14 %.

Чугун – сплав железа с углеродом при содержании углерода более 2,14 %.

Латунь – сплав меди с цинком (возможно добавление и других элементов).

Бронза – сплав меди с любыми компонентами, кроме цинка (однако цинк может входить в состав сложных бронз в качестве второстепенного компонента).

ОСНОВНОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Лекция Структура и свойства металлов и сплавов

1. Кристаллическое строение металлов.
2. Дефекты кристаллической решетки.
3. Кристаллизация металлов.
4. Сплавы.
5. Диаграмма состояний сплавов «железо-углерод».
6. Углеродистые стали, чугуны, их свойства.
7. Легированные стали и их свойства.
8. Сплавы цветных металлов.

Кристаллическое строение металлов

За редким исключением, металлы в твердом состоянии представляют собой тела, состоящие из огромного количества мелких, различных только в микроскоп зерен, – кристаллитов. В свою очередь, эти

зерна состоят из атомов, упорядоченно расположенных друг относительно друга в пространстве.

Располагаясь в пространстве, ближайшие друг к другу атомы образуют контур какого-нибудь геометрического тела, например куба (рисунок 2.1). Таким образом, каждое зерно металла состоит из множества таких одинаково ориентированных геометрических тел называемых **элементарными ячейками**. В соседних зернах металла эти ячейки ориентированы по-другому.

Находясь в узлах кристаллической решетки, атомы колеблются относительно своего среднего наложения с частотой около 10^{13} Гц, не покидая (за исключением некоторых особых случаев) своих мест.

Известно, что атом любого металла состоит из положительно заряженного ядра и окружающих его, несущих отрицательный заряд, нескольких электронных оболочек. Каждая оболочка заполнена строго определенным количеством сильно связанных с ядром электронов и только на последней оболочке находится несколько электронов, слабо связанных с ядром. Их число равно валентности металла.

С помощью этих электронов, называемых валентными, атомы металлов устанавливают связи, взаимодействуют с атомами других элементов, в том числе и металлов, а также друг с другом.

По современным научным воззрениям, расположенные в узлах кристаллической решетки атомы металлов связываются со своими ближайшими соседями при помощи валентных электронов, находящихся на их внешних оболочках или орбитах. Связь такого вида называется **металлической**.

Однако не все валентные электроны участвуют в образовании металлической межатомной связи. Определенная их часть, покидая ядра своих атомов, уходит в междоузельное пространство и образует так называемый «электронный газ», состоящий из таких потерявших связь со своими ядрами электронов и ставших общими или коллективизированными.

Благодаря коллективизированным электронам металлы обладают электро- и теплопроводностью, характерным металлическим блеском и некоторыми другими чисто металлическими свойствами. Например, блеск объясняется отражением световых лучей от коллективизированных электронов.

Тип кристаллической решетки металла определяется формой того геометрического тела, которое составляет основу его элементарной ячейки. Наиболее распространенными типами кристаллических решеток металлов являются кубическая объемно центрированная

(ОЦК), кубическая гранецентрированная (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рисунок 2.1).

Как видно из приведенного рисунка, у обоих типов кубических решеток по 8 атомов находится в вершинах куба, а остальные – в центре куба на пересечении его диагоналей – у ОЦК (рисунок 2.1а) или на пересечении диагоналей каждой грани, т. е. в ее центре – у ГЦК (рисунок 2.1б).

Ячейка решетки ГПУ (рисунок 2.1в) представляет собой призму, основаниями которой являются центрированные одним атомом шестигранники. Внутри этой ячейки между основаниями находятся еще три атома, образующие равносторонний треугольник.

Кристаллические решетки металлов, независимо от их типа, являются плотноупакованными. Это означает, что атомы, находящиеся и их узлах, соприкасаются друг с другом своими наружными электронными оболочками.

Металлы отличаются друг от друга, кроме типа кристаллической решетки, еще и ее параметрами, которые представляют собой характерные размеры геометрического тела, составляющего ее ячейку. Например, у кубической ячейки – ребро a (рисунок 2.1а, б), у гексагональной – сторона основания a и расстояние между основаниями c (рисунок 2.1в).

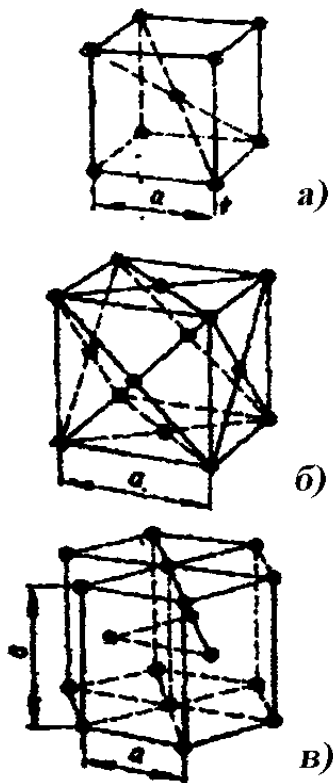


Рисунок 2.1 – Основные типы кристаллических решеток

Параметр – расстояние между центрами соседних атомов по избранному направлению. Оно выражается в нанометрах (нм) или ангстремах (А), причем $1 \text{ нм} = 10 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ м}$. Как правило, параметры решеток металлов колеблются в пределах $2\text{--}7 \text{ \AA}$ ($0,2\text{--}0,7 \text{ нм}$). Наиболее известные и широко применяемые в промышленности металлы по типам кристаллических решеток можно разбить следующим образом:

- ✓ ОЦК-решетку имеют железо при обычных температурных условиях, хром, вольфрам, ванадий, молибден, калий и натрий;
- ✓ ГЦК-решетку имеют никель, медь, алюминий, свинец, серебро, железо при температурах $911\text{--}1392 \text{ }^\circ\text{C}$ и другие металлы;

- ✓ ГПУ-решетку имеют магний, цинк, а также кобальт, цирконий и титан при комнатной температуре.

Как видно из перечисления, некоторые металлы в зависимости от температурных условий существуют при разных способах расположения атомов в пространстве друг относительно друга. Например, железо при температурах до $911 \text{ }^\circ\text{C}$ имеет ОЦК-решетку, далее до $1392 \text{ }^\circ\text{C}$ существует в аллотропической форме ГЦК, а затем вплоть до температуры плавления снова принимает форму ОЦК.

Способность металла изменять тип своей кристаллической решетки в зависимости от температуры называется **аллотропией (полиморфизмом)**. Полиморфные превращения свойственны также титану, цирконию, олову и другим металлам.

Аллотропические превращения имеют большое значение в технике; благодаря им, например, оказывается возможным производить термическую обработку стали и других сплавов, имеющую целью изменять их структуру и свойства.

Под анизотропией понимается неодинаковость механических и других свойств монокристаллов по различным направлениям. Так как свойства вдоль какого-нибудь направления зависят от количества расположенных на нем атомов, то анизотропия является закономерным следствием кристаллического строения.

Монокристалл представляет собой как бы одно большое зерно металла, состоящее из огромного количества одинаково ориентированных ячеек. Реальные металлы являются поликристаллическими телами, состоящими из огромного числа мелких зерен с различной ориентировкой их ячеек. Ввиду этого в целом куске металла недостаток свойств в одних зернах по любому из направлений перекрывается их избытком в других зернах по этому же направлению и средние свойства в поликристаллическом теле по всем направлениям оказываются одинаковыми. Данное явление присуще реальным металлам, имеющим поликристаллическое строение, и называется **псевдоизотропией** или **квазиизотропией**.

Дефекты кристаллической решетки

Кристаллическая решетка не является идеальным геометрическим построением, ей присущи такие дефекты, как вакансии, внедренные атомы и дислокации.

Вакансией называется незаполненный по той или иной причине узел кристаллической решетки (рисунок 2.2а). В местах нахождения вакансий кристаллическая решетка искажена, там возникают местные внутренние напряжения, которые обусловлены нарушениями одно-

родности сил межатомного взаимодействия, существующей в идеальной кристаллической решетке со всеми заполненными узлами.

Если в отдельных ячейках кристаллической решетки между ее узлами по каким-либо причинам оказываются как бы «лишние» атомы данного или другого элемента, то образующиеся при этом дефекты называются **внедренными атомами** (рисунок 2.2б). Внедренные атомы также искажают кристаллическую решетку и создают внутренние напряжения. При внедрении в междоузлия решетки атомов других элементов эти напряжения оказываются тем больше, чем значительнее разница между размерами атомов внедрения и данного металла.

Линейные несовершенства кристаллической решетки называются **дислокациями**. Дислокации можно представить таким образом: если надрезать идеальный кристалл и сместить края надреза на величину, кратную периоду решетки, то внутри кристалла у края надреза возникнет некоторое искажение, которое и является дислокацией.

Если края надреза сдвинуты параллельно надрезу, то образующаяся дислокация называется **винтовой**. Если же края надреза раздвинуть и внутрь образовавшейся щели вставить (или удалить из нее) лишнюю атомную плоскость того же материала (экстраплоскость), это приведет к образованию дислокации другого типа – **краевой** (рисунок 2.2в).

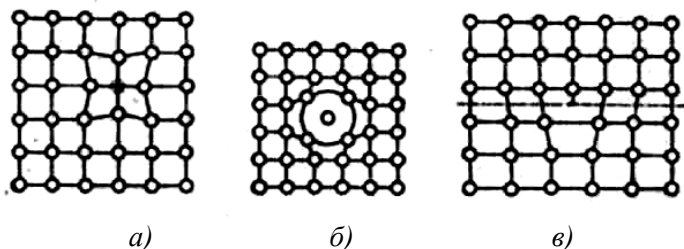


Рисунок 2.2 – Основные дефекты кристаллических решеток

Чем больше имеется в зерне таких дефектов, тем сильнее искажена его кристаллическая решетка и тем более значительны в ней внутренние напряжения. Дислокации возникают при кристаллизации, особенно на границах зерен, при пластической деформации металла, при его резких нагревах и охлаждениях.

Кристаллизация металлов

Каждое вещество в зависимости от температуры и давления может находиться в твердом, жидком и газообразном (парообразном) состоянии.

В обычных атмосферных условиях при комнатной температуре все металлы, за исключением ртути, являются твердыми телами. Они, в отличие от жидкостей, сохраняют определенную форму и размеры и противодействуют внешним силам. Переход металлов, как и всех кристаллических тел, из жидкого состояния в твердое происходит вследствие естественного стремления любого вещества уменьшить запас своей свободной энергии при понижении температуры.

Когда кристаллическое тело находится в жидком состоянии, то при любой температуре, превышающей точку плавления $T_{пл}$, его свободная энергия меньше, чем если бы оно при той же температуре находилось в твердом, т. е. кристаллическом, состоянии. Однако когда его температура окажется ниже точки плавления, то более низкий запас свободной энергии будет у твердого состояния.

Поэтому, подчиняясь природным законам термодинамики, металлы, как кристаллические тела, при нагревании до определенных температур плавятся (переходят из твердого состояния в жидкое), а при охлаждении кристаллизуются (становятся твердыми телами).

Сплавы

Сплавом называется сложное вещество, получаемое путем сплавления нескольких простых веществ, называемых компонентами сплава. В металлическом сплаве основным компонентом (более 50 %) должен быть металл. У сплавов можно получить более высокие механические, физические и химические свойства, чем у чистых металлов, поэтому их широко применяют в технике. Для понимания природы сплавов и их свойств необходимо познакомиться с диаграммами состояний простейших сплавов – двойных. Эти сплавы состоят из двух компонентов.

Диаграмма состояний представляет собой чертеж, в котором отражено изменение структуры и фазового состава сплавов данных компонентов в зависимости от их содержания (концентрации) и температуры T (рисунок 2.3).

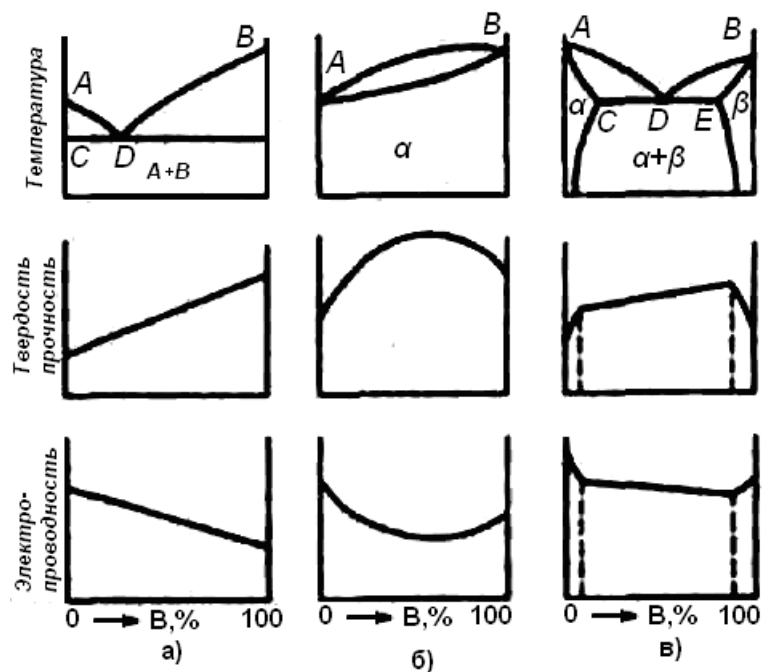


Рисунок 2.3 – Диаграммы состояний сплавов

Сплавы, как и чистые металлы, построены из зерен, которые можно наблюдать в оптический микроскоп. В зависимости от природы сплавляемых компонентов в сплавах могут наблюдаться в виде зерен следующие фазы:

- смесь зерен чистых компонентов (если последние не вступают друг с другом ни в какое взаимодействие) $\alpha + \beta$;
- твердые растворы одного компонента в другом, когда кристаллические решетки в зернах построены из атомов обоих компонентов, из которых один является растворителем, а другой – растворимым;
- химические соединения компонентов сплава друг с другом, имеющие свою присущую им кристаллическую решетку, отличную от решеток исходных компонентов.

Диаграмма состояний сплавов – механических смесей – изображена на рисунке 2.3а. Это случай, когда компоненты A и B взаимно растворяются только в жидком состоянии, а в твердом не растворяются и не вступают в химическое взаимодействие.

В твердом состоянии (ниже линии CDE) все сплавы этой системы состоят из зерен чистых компонентов $A + B$. Свойства сплавов в данном случае зависят от свойств компонентов и их относительных количеств в каждом сплаве и изменяются по линейному закону от компонентов A и B .

При неограниченной взаимной растворимости компонентов в твердом состоянии получается диаграмма состояний, изображенная на рисунке 2.3б. В данном случае образуется непрерывный ряд сплавов – твердых растворов α переменной концентрации.

Известно, что при растворении в кристаллической решетке одного компонента атомов другого она искажается и в ней возникают внутренние напряжения. Их тем больше, чем больше в решетке посторонних («чужих») атомов. Все это затрудняет передвижение дислокаций в зернах во время пластической деформации и повышает прочность сплава.

В связи с отмеченными свойствами сплавов неограниченных твердых растворов изменяются по криволинейному закону.

Показанная на рисунке 2.3в диаграмма состояний отражает поведение сплавляемых компонентов при ограниченной растворимости.

В данном случае в твердом состоянии (ниже линии $ACDEB$) наблюдаются три структурно-фазовые области: области ограниченных α (слева) и β (справа) растворов и между ними область механических смесей этих растворов.

Диаграмма состояний сплавов «железо–углерод»

Сплавы на основе железа и особенно железоуглеродистые сплавы – стали и чугуны – продолжают оставаться важнейшими конструкционными материалами. Для правильного понимания природы свойств разнообразных марок современных сталей и чугунов, включая и специальные стали, необходимо получить хорошее представление о диаграмме «железо–углерод».

В настоящее время наибольшее практическое значение имеет диаграмма состояний «железо–углерод», приведенная на рисунке 2.4.

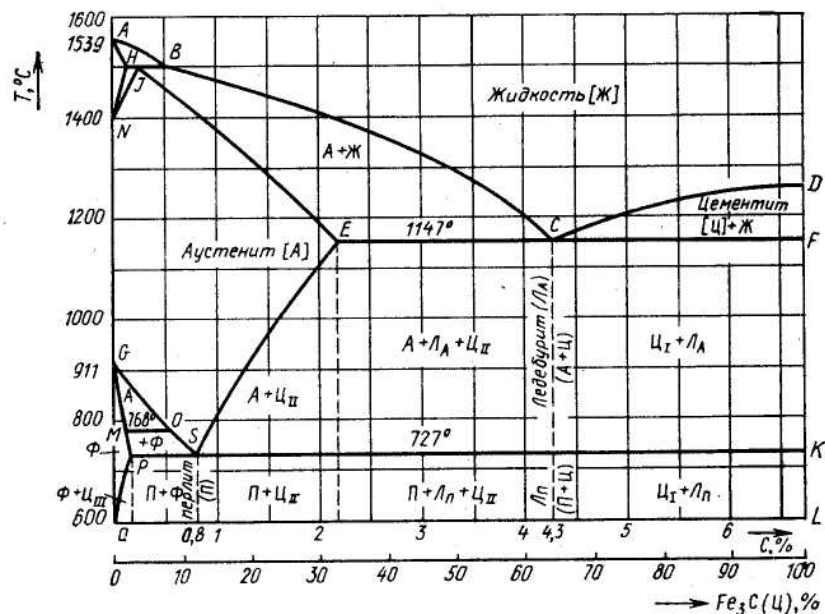


Рисунок 2.4 – Диаграмма состояний железо – углерод Fe–C

На диаграмме одной из важнейших фаз, влияющих на свойства сплавов, указан карбид железа Fe_3C или цементит. Анализ этой диаграммы показывает, что цементит ведет себя как самостоятельный компонент. Поэтому на диаграмме даны две согласующиеся друг с другом шкалы концентраций: одна показывает содержание углерода, а другая – количество цементита в процентах. Напомним, что в цементите Fe_3C содержится 6,67 % углерода. Поэтому если левая ордината соответствует чистому железу, то правая – цементиту.

Железо может находиться в двух аллотропических формах, которым соответствуют решетки ОЦК и ГЦК. Если чистое железо претерпевает аллотропическое превращение ОЦК ↔ ГЦК, т. е. $\alpha-Fe \leftrightarrow \gamma-Fe$ при 911 °С, то при сплавлении с углеродом эта температура может снизиться вплоть до 727 °С (рисунок 7.4, линия PSK). Температура плавления железа составляет 1539 °С. Второй компонент рассматриваемой системы сплавов – цементит – имеет более сложную, чем у железа, кристаллическую решетку и плавится при $T \approx 1250$ °С.

Основными фазами и структурными составляющими данной системы, от которых зависят свойства сплавов и их поведение при нагружении и нагреве, являются феррит [Ф], аустенит [А] и цементит [Ц]. Аустенит – это фаза и различимая в микроскоп в виде зерен структурная составляющая, представляющая собой твердый раствор внедрения углерода в $\gamma-Fe$.

В аустените в зависимости от температуры нагрева может раствориться до 2,14 % углерода (при $T = 1147$ °С). Атомы растворенного в аустените углерода располагаются в центрах ячеек ГЦК.

Обычно аустенит существует при $T > 727$ °С. При комнатной температуре он иногда в небольших количествах может сохраниться только в закаленной стали. Он очень пластичен ($\delta = 40 - 50$ %), его твердость HB составляет 1700–2000 МПа (170–200 кгс/мм²).

При $T = 727$ °С аустенит может содержать только 0,8 % углерода (точка S на рисунке 2.4; во всех точках на линии PSK аустенит также содержит 0,8 % углерода, находясь в равновесии с сопутствующим ему на участке PS ферритом, а на участке SK – цементитом).

Легко проследить, что количество цементита в сплавах возрастает от 0 до 100 % при 6,67 % углерода. В то же время количество феррита соответственно убывает от 100 % до 0. В связи с этим у сплавов будут возрастать свойства, приносимые цементитом, и снижаться характеристики, определяемые ферритом.

Цементит является самой твердой и хрупкой фазой и структурной составляющей в рассматриваемом ряду сплавов. Его твердость максимальна (второе место после алмаза) и составляет 8000 МПа, а пластичность равна нулю, так как он способен только к небольшим упругим деформациям.

Все помещенные на этой диаграмме сплавы принято делить на стали и чугуны. К сталям формально относятся сплавы, содержащие менее 2,14 % углерода, остальные сплавы причисляются к чугунам. Перечисленные ранее входящие в состав сталей и чугунов фазы (аустенит, феррит, цементит) могут находиться в них как отдельные структурные составляющие в виде зерен или мелких продолговатых включений. Они также образуют характерные структурные составляющие — механические смеси с некоторыми присущими им признаками — перлит и ледебурит.

Перлит представляет собой механическую смесь тонких пластинок цементита и находящихся между ними более толстых пластинок феррита. Он образуется при 727 °С из аустенита, содержащего 0,8 % углерода.

Аустенит, находящийся в любой части диаграммы состояний выше $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рисунок 2.4), остывая и подходя к $727\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. к линии *PSK*, приобретает концентрацию 0,8 % углерода.

Перлит образуется как в сталях, так и в чугунах и играет важную роль в формировании их свойств.

Ледебурит является механической смесью одновременно кристаллизующихся из жидкой фазы при постоянной, равной $1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуре, зерен аустенита и цементита. Ледебурит содержит 4,3 % углерода. Поэтому, когда остывающая жидкая фаза приближается по температуре к линии *EC* ($1147\text{ }^{\circ}\text{C}$), углерода в ней оказывается 4,3 % и она, затвердевая, превращается в хорошо перемешанную смесь зерен цементита и аустенита. При дальнейшем охлаждении содержание углерода в аустените из-за уменьшения растворимости снижается по линии *FS* и при $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ (линия *SK*) достигает 0,8 %. Аустенит при этом превращается в перлит и, таким образом, ледебурит становится смесью зерен перлита и цементита. По описанной причине на диаграмме (рисунок 2.4) ледебурит с аустенитом обозначен L_A , а с перлитом – L_P . Ледебурит содержится только в чугунах и отсутствует в сталях.

Углеродистые стали, чугуны, их свойства

Углеродистые стали занимают левую часть диаграммы состояний. Пользуясь этой диаграммой для оценки свойств отожженных, т. е. находящихся в равновесном фазовом состоянии сталей, надо помнить отличия химического состава их фаз – феррита и цементита – и металлургические дефекты, которые привносятся в них при выплавке и которые влияют на их механические и другие свойства. Марганец и кремний, попадающие в сталь из чугуна, а также вводимые в нее дополнительно, растворяются в феррите, а марганец – в цементите. Благодаря этому при сохраняющейся пластичности несколько возрастают прочность и твердость стали (пластичность и вязкость снижаются при более высоком, чем примесное, содержании *Mn* и *Si*).

Сера и фосфор снижают прочность и пластичность, а также ударную вязкость стали и поэтому являются вредными примесями. При этом фосфор, растворяясь в феррите, упрочняет его и делает хрупким, т. е. снижает вязкость стали, особенно при низких температурах. Отсюда принято считать, что фосфор придает стали хладоломкость.

Азот и водород способны растворяться в феррите и образовывать мелкие зерна нитридов и гидридов. Все это приводит к росту твердости и потере пластичности, а также вязкости стали.

По назначению углеродистые стали делятся на конструкционные и инструментальные.

К конструкционным сталям относятся и строительные стали. В зависимости от характера и величины нагрузки, прикладываемой к изготавливаемым из них изделиям и конструкциям, эти стали принято делить на стали обыкновенного качества и качественные.

В **сталях обыкновенного качества** допускается большее количество серы, фосфора, НМВ, газов и других примесей, чем в качественных. Они делятся на три группы, свойства которых гарантируются ГОСТ.

У группы А гарантируются только механические свойства. Химический состав не гарантируется. Поэтому из этой стали можно делать изделия только для механической обработки (снятие стружки). Нагревы, сварку применять нельзя, так как изменяющиеся при этом свойства можно восстановить только термической обработкой, но для этого необходимо знать содержание углерода в стали, т. е. ее химсостав.

Стали этой группы маркируются: Ст0, Ст1, ..., Ст6. Гарантируемая прочность находится в пределах 300–625 МПа, а пластичность $\delta = 22\text{--}14\text{ }%$.

Сталь группы Б (БСт0, БСт1, ..., БСт6) выпускается с гарантируемым химическим составом. Поэтому при изготовлении изделий ее можно нагревать, например, дляковки, а потом при помощи термической обработки исправлять нарушенную структуру и придавать необходимые свойства.

Стали группы В (ВСт1, ..., ВСт6) поставляются по механическим свойствам и химическому составу. Они используются для изготовления сварных конструкций.

Качественные углеродистые конструкционные сплавы выплавляются при более строгом соблюдении технологии выплавки, а содержание вредных примесей (серы и фосфора) в них не должно превышать 0,03 % каждого. Их маркировка состоит из двузначного числа, означающего содержание углерода в сотых долях процента: сталь 05, 08, 10, 15, 20, ..., 85. Из-за высокой хрупкости конструкционные углеродистые стали не содержат углерода свыше 0,85 %. Буква А в конце марки свидетельствует об улучшенном металлургическом качестве стали: мелком зерне, более точном химическом со-

стае и меньшем содержании серы и фосфора (менее 0,02 % каждого). Из этих сталей делаются детали ответственного назначения.

Инструментальные углеродистые стали являются высокоуглеродистыми сталями, содержащими 0,7–1,3 % углерода. Это гарантирует им высокую твердость, необходимую для придания инструменту режущих свойств, и износостойкости.

Их маркируют У7, У7А, ..., У13, У13А. Цифра означает содержание углерода в десятых долях процента, а буква А – улучшенное металлургическое качество.

Чугун с графитом может условно рассматриваться как сталь, «испорченная» наличием графитных включений, т. е. его можно представить в виде стальной основы, содержащей графитные включения. Графитными включениями можно управлять, придавая чугуны те или иные механические свойства в зависимости от формы и размеров этих включений.

В серых чугунах графитные включения имеют форму кривых пластинок. Такой чугун является сталью с готовыми трещинами — концентраторами напряжений, заполненными графитом. Чем их больше и чем они крупнее, тем ниже прочность серого чугуна.

Серые чугуны маркируют буквами СЧ, рядом с которыми ставят двузначное число, означающее временное сопротивление разрыву σ_B кгс/мм² (1 кгс/мм² = 10 МПа): СЧ10, СЧ15, ..., СЧ45.

Он применяется для получения отливок малоответственного назначения (станины станков, картеры двигателей, коробки, противовесы и т. д.).

Высокопрочный чугун содержит графит в геометрически правильной шаровидной форме, почти не концентрирующей напряжений и потому обеспечивающей чугуны наибольшую прочность σ_B (до 120 кгс/мм²), сочетающуюся с удовлетворительной пластичностью δ (2–17 %). В его маркировке отражены прочность и пластичность: ВЧ38-17, ВЧ70-2, ВЧ120-2 и т. д.

Данный чугун получается в результате модифицирования серого чугуна специального состава небольшими добавками (0,03–0,07 %) магния или церия. Из него отливают ответственные детали, например коленчатые валы автомобильных и судовых двигателей.

Ковкий чугун содержит графит в хлопьевидной форме. Это обеспечивает ему значительно более высокую, чем у серого, но несколько меньшую, чем у высокопрочного чугуна, прочность, сочетающуюся с некоторым запасом пластичности: КЧ 30-6, КЧ 97-12, КЧ 63-2.

Его получают путем длительного (70–80 ч) графитизирующего отжига отливок из белого чугуна специального состава при температуре 970–740 °С, во время которого происходит частичный или полный распад цементита с образованием свободного углерода – графита в виде хлопьев.

Ковкий чугун применяется для изготовления литых деталей, подвергающихся в работе небольшим ударным нагрузкам (рычаги, кожухи и т. д.).

Легированные стали и их свойства

Для улучшения механических свойств в конструкционные легированные стали вводятся такие элементы, как хром, никель, вольфрам, молибден, ванадий, титан и бор, а также марганец и кремний в количествах, превышающих их обычное содержание в углеродистых сталях.

Оптимальным содержанием вводимых в конструкционную сталь легирующих элементов является такое, которое обеспечивает сквозную прокаливаемость изготавливаемых из данной стали деталей.

Конструкционные легированные стали маркируются следующим образом: вначале ставится двузначное число, выражающее среднее содержание углерода в стали в сотых долях процента, затем русскими заглавными буквами перечисляются находящиеся в стали легирующие элементы. При этом приняты следующие обозначения: Х – Cr, Н – Ni, М – Mo, Г – Mn, Д – Cu, В – W, Ф – V, Б – Nb, Р – B, К – Co, С – Si, Т – Ti, Ц – Zr, Ю – Al. Проставляемая после буквы цифра означает среднее количество данного элемента в процентах. Если элемента менее 1 %, то цифра не ставится. Стоящая в конце маркировки буква А свидетельствует о высоком металлургическом качестве стали и прежде всего о том, что в ней серы и фосфора менее 0,02 % каждого.

Таким образом, легирование конструкционных сталей благоприятно отражается на комплексе их механических свойств.

Стали для режущего инструмента должны быть твердыми и износостойкими. Поэтому они должны содержать достаточное количество углерода (0,8–1,0 %) и карбидообразующих элементов, главным образом хрома. Получающаяся у них после закалки и низкого отпуска структура (мартенсит отпуска с равномерно распределенными карбидами) обеспечивает высокие режущие свойства инструмента. Наиболее часто используются следующие марки легированных инструментальных сталей: Х, 9ХС, ХГСВФ. В маркировке инструментальных сталей содержание углерода указывается в десятых

долях процента, а отсутствие цифры свидетельствует о том, что углерода содержится около 1 %. Отсутствие цифр после символов таких элементов, как хром, кремний и вольфрам, означает, что их количество может доходить до 1,5 %.

Из перечисленных выше сталей делаются резцы, фрезы, сверла и другой режущий инструмент.

К сталям с особыми свойствами относятся, прежде всего, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали.

Коррозионно-стойкими называются стали, противодействующие поверхностному разрушению под действием агрессивных газовых или жидких сред. Еще большую коррозионную стойкость имеют хромоникелевые кислотостойкие стали с аустенитной структурой 12Х18Н9 и 12Х18Н9Т. Последняя противостоит МКК.

Жаропрочными называются стали, способные продолжительно работать под нагрузкой при повышенных (свыше 400 °С) и высоких (свыше 650 °С) температурах. Для этого они, прежде всего, должны быть жаростойкими (окалиностойкими). Сопротивление окалинообразованию при высоких температурах обеспечивается образующейся на их поверхности плотной оксидной пленкой из Cr_2O_3 , Al_2O_3 или SiO_2 , которая останавливает дальнейшее окисление в глубину. В связи с этим в жаропрочных сталях нужны хром, алюминий или кремний.

Для упрочнения феррита в стали, работающие при 400–580 °С (котлы, пароперегреватели, трубопроводы), вводятся молибден, ванадий, хром: 12МХ, 15ХМ, 12Х1МФ.

Для работы при повышенных давлениях и температурах свыше 600 °С применяются стали с аустенитной структурой 09Х14Н16Б, 08Х18Н10Т и др. Температуры 800–1100 °С выдерживают лопатки турбин из жаропрочных сплавов на никелевой основе ХН77ТЮР, ХН55ВМТФКЮ, в которых никеля содержится соответственно 77 и 55 %, а сплавляемыми с ним компонентами являются Cr , Ti , Al , V , W , Mo , V , Co .

Сплавы цветных металлов

Наиболее распространенными и широко применяемыми являются сплавы на основе меди и алюминиевые сплавы.

Медные сплавы принято делить на латуни и бронзы. **Латунями** называются сплавы меди с цинком. В качестве второстепенных компонентов, улучшающих свойства латуней, в них могут добавляться и другие элементы, например олово для повышения коррозионной стойкости, свинец для лучшей обрабатываемости режущим

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

Из двухфазных латуней широко известная латунь Л59. Для образования сыпучей стружки в нее добавляют 1–2 % РЬ (ЛС59-1). Они чаще всего выпускаются в виде прутков разного профиля.

Бронзами называются сплавы меди с любыми компонентами, кроме цинка (однако цинк может входить в состав сложных бронз в качестве второстепенного компонента). Бронзы существенно отличаются от латуней тем, что с увеличением содержания второго компонента они быстро теряют пластичность, в то время как твердость довольно быстро возрастает (у латуней до 32 % Zn растут оба эти показателя).

Бронзы маркируются буквами Бр, а затем ставится второй компонент с цифрой, указывающей его среднее содержание в процентах. Если имеются и другие компоненты, то они перечисляются вслед за вторым, а затем, разделенные дефисами, указываются содержания компонентов начиная со второго, например БрО10, БрОФ10-1, БрА5, БрА7, БрБ2, БрКд1,5 и т. д. Оловянная и оловянно-фосфористая бронзы являются хорошими антифрикционными сплавами для подшипников скольжения, червячных колес. Алюминиевые бронзы являются дешевыми заменителями оловянных бронз. Бериллиевая бронза (БрБ2) является твердым и упругим материалом, служащим для изготовления немагнитных пружин и неискрящего ударного инструмента.

Основные преимущества алюминиевых сплавов – легкость и сравнительная недефицитность. В зависимости от пластичности и деформируемости все они делятся на две группы: деформируемые (способные пластически деформироваться при изготовлении из них изделий) и литейные (имеющие низкую пластичность, поэтому для получения из них изделия нужного очертания их следует в жидком виде заливать в специальную литейную форму). Наиболее простые деформируемые сплавы алюминия содержат до 1,6 % Mn (АМц) или 2–5 % Mg (АМг2 и АМг5). Эти элементы, растворяясь в кристаллической решетке алюминия, существенно его упрочняют и лишь не-

значительно уменьшают пластичность, обеспечивая хорошую деформируемость сплавов.

Термической обработкой эти сплавы не упрочняются. Они стойки против коррозии. Из них изготавливают малонагруженные детали и легкие сварные конструкции.

К деформируемым алюминиевым сплавам, значительно упрочняемым термообработкой, относятся дюралюмины. Основным элементом, вводимым в них для обеспечения возможности упрочняющей термообработки, является медь (от 2,8–4,5 %). Другие элементы (*Mg*, *Mn*) добавляются для улучшения комплекса свойств. Дюралюмины маркируются буквой Д с цифрой, означающей порядковый номер в системе разработки сплава (Д6, Д16, Д18 и т. д.). Для упрочнения их подвергают закалке, а затем естественному (при комнатной температуре в течение 4–5 сут.) или искусственному (при 150 °С, 18 ч) старению. При старении сплав дополнительно существенно упрочняется.

Из литейных сплавов алюминия широко применяются силумины – сплавы алюминия с кремнием и добавками *Mg*, *Mn* и других элементов. Наиболее типичен силумин АЛ2, содержащий 10–13 % *Si*.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие бывают разновидности ковалентной связи?
2. Что называется полиморфизмом?
3. Что называется вакансией?
4. Назовите основные фазы диаграммы состояний железо–углерод.
5. Какое процентное содержание углерода в высокоуглеродистых сталях?
6. Как образуется связь Ван-дер-Ваальса?
7. Назовите свойства металлических сплавов.
8. Какие разновидности модификаторов используются при кристаллизации металлов?
9. Назовите механические свойства феррита.
10. Что представляет собой ледебурит?
11. Как маркируются качественные углеродистые стали?
12. Особенности строения и свойств высокопрочного чугуна.
13. Поясните процесс изменения содержания аустенита в сплавах железа с углеродом на основании диаграммы состояний.
14. Поясните процесс образования ледебурита в сплавах железа с углеродом на основании диаграммы состояний.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ И ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа «Методы определения механических свойств металлов и сплавов»

Общие сведения

Наиболее универсальными свойствами металлов и сплавов являются механические. Это объясняется тем, что большинство изготавливаемых из них изделий во время эксплуатации подвергается действию нагрузок, порождающих воздействующие на материал силы, которые могут создавать в материале растягивающие, сжимающие или касательные (сдвиговые) напряжения и соответствующие им деформации.

Под механическими свойствами принято понимать комплекс свойств, отражающих способность материала противодействовать деформации под действием приложенных сил.

Деформация – это изменение формы и размеров изделия, она может быть растягивающей, сжимающей и сдвиговой. Растяжение приводит к увеличению размера изделия (или испытываемого образца) в направлении действующей силы и соответствующему уменьшению размера в поперечном направлении. При сжатии продольный размер уменьшается, а поперечный – увеличивается. Сдвиг приводит к смещению одной части материала изделия (образца) относительно другой по какой-нибудь плоскости. Например, при скручивании стержня в нем происходят деформации сдвига или деформации среза.

В зависимости от поведения деформируемого металла после снятия приложенной силы любая из описанных видов деформации может быть упругой или остаточной.

Упругая деформация после снятия вызвавшей ее силы полностью исчезает, и все размеры изделия (образца), как продольные, так и поперечные, остаются без изменения. При этом не изменяется и взаимное положение атомов в кристаллической решетке. Объясняется это тем, что вызванные внешней силой временные изменения расстояний между атомами, равных периоду решетки, а также смещения соседних атомов относительно друг друга, приводящие к искажению решетки, устраняются благодаря обусловленному металлической связью межатомному взаимодействию.

Если действующие силы и порожденные ими напряжения окажутся достаточно большими, то в изделии (образце) происходят остаточные, т. е. необратимые, перемещения материала, сохраняющиеся после снятия нагрузки. При этом форма и размеры изделия (образца) изменяются. Такая деформация материала называется **пластической**.

Развитие пластической деформации может завершиться разрушением детали. Но даже не достигшая такой стадии, она может стать причиной выхода из строя всей машины или агрегата.

Суммарная пластическая деформация металла складывается из перемещений металла в его отдельных зернах. При этом зерна вытягиваются, приобретают продолговатую форму.

Пластическая деформация является результатом массового перемещения огромного количества дислокаций, существующих в зернах и вновь возникающих под действием напряжений.

Дислокации непрерывными скачками величиной в параметр решетки перемещаются к границам зерен. В результате массового выхода дислокаций в разных местах зерна образуются ступеньки, вдоль которых зерно как бы расслаивается и происходят сдвиги его частей относительно друг друга. Дальнейшее развитие этого дислокационного процесса приводит к необратимой вытяжке зерен, что и составляет сущность пластической деформации металла.

Таким образом, механические свойства в основном отражают способность материала сопротивляться пластической деформации и характеризуют его поведение в ходе ее развития. Как правило, к ним относят твердость, прочность, пластичность и ударную вязкость.

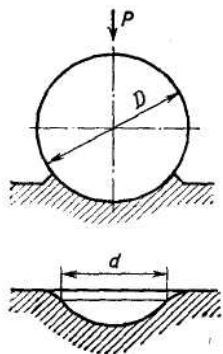


Рисунок 2.5 – Схема замера твердости по методу Бринелля

Под твердостью принято понимать способность материала оказывать сопротивление внедрению в него под действием силы наконечника из другого, более твердого материала. При внедрении наконечника в материал происходит местная пластическая деформация. Следовательно, сущность твердости материала – это его сопротивление сосредоточенной (местной) пластической деформации.

Замер твердости производится при помощи специальных приборов – твердомеров. Наиболее распространенным методом замера является метод вдавливания какого-нибудь стандартного наконечника (индентора) в поверхность образца из исследуемого материала. При замере твердости по методу Бринелля (прибор ТШ) индентором служит закаленный стальной шарик (рисунок 2.5). При этом шарик под определенной нагрузкой P в течение некоторого времени вдавливается в материал, оставляя на его поверхности лунку диаметром d .

Так как глубина и диаметр лунки зависят от сопротивлении материала пластической деформации, вызываемой внедряющимся шариком, за меру твердости по Бринеллю принимается число, равное отношению силы P к площади сферической поверхности лунки F :

$$HB = P/F \quad (2.1)$$

или

$$HB = 2P/(\pi D) (D - \sqrt{D^2 - d^2}). \quad (2.2)$$

На практике при замере твердости ее величина не вычисляется по приведенной формуле, а находится из специальной таблицы по измеренному специальной лупой диаметру отпечатка d . В таблице против значений d указаны соответствующие им вычисленные значения твердости HB . Твердость по Бринеллю оценивается в мегапаскалях МПа или в кгс/мм² (1 МПа = 0,1 кгс/мм²). Если материал имеет очень высокую твердость, особенно когда она тверже шарика прибора Бринелля, то для замера твердости пользуются прибором Роквелла, наконечник которого оснащен конусом, изготовленным из самого твердого материала – алмаза.

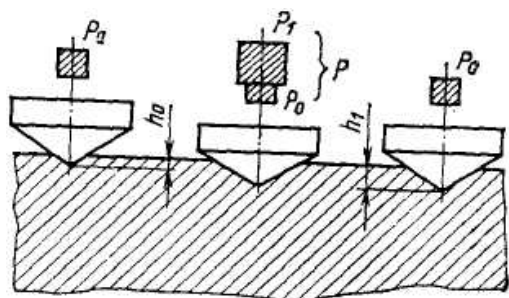


Рисунок 2.6 – Схема замера твердости по методу Роквелла

Прибором Роквелла пользуются также и для замера твердости сравнительно мягких материалов. В связи с этим в его комплект входит наконечник, оснащенный стальным шариком диаметром 1,5875 мм. Замер твердости по Роквеллу состоит из трех этапов (рисунок 2.6). На первом этапе наконечник внедряется в материал на глубину h_0 (мм), создаваемую вручную предварительной нагрузкой P_0 , равной 100 Н (10 кгс). Затем прикладывается основная нагрузка P , которая включает в себя, кроме предварительной, дополнительную нагрузку P_1 , равную 500, 1400 или 900 Н в зависимости от рода испытываемого материала. Под этой нагрузкой наконечник в течение определенного времени внедряется в материал на некоторую глубину h_1 .

На третьем этапе дополнительная нагрузка P_1 снимается и при сохраняющейся предварительной нагрузке P_0 производится отсчет твердости. Для этого на приборе имеется индикатор со стрелкой и двумя шкалами: черной и красной. По черной шкале отсчитывается твердость, замеряемая алмазным конусом, а по красной – стальным шариком.

Шкалы нанесены на диске по окружностям. Каждое деление шкалы соответствует внедрению наконечника на глубину 0,002 мм. Числа твердости, отсчитываемые по черной шкале, для полной нагрузки ($P_0 + P_1$), равной 1500 Н (150 кгс), обозначаются *HRC*, а для нагрузки 600 Н (60 кгс) – *HRA*. Твердость, замеряемая шариком, обозначается *HRB* (нагрузка 1000Н, 100 кгс).

Указываемые на шкалах стрелкой твердости вычисляются по следующим формулам:

$$HRC(HRA) = 100 - (h_1 - h_0) / 0,002; \quad (2.3)$$

$$HRB = 130 - (h_1 - h_0) / 0,002, \quad (2.4)$$

где h_1 – остаточная глубина внедрения после снятия дополнительной нагрузки P_1 , мм;

h_0 – глубина внедрения при предварительной нагрузке P_0 , мм.

Прочность характеризует сопротивление материала пластической деформации под действием приложенной силы. Ее характеристиками являются условные числа – пределы, находимые при механических испытаниях.

Наиболее часто применяются испытания на растяжение, во время которых специально изготавливаемые цилиндрические или плоские стандартные образцы растягиваются на разрывной машине.

Во время испытания машина вычерчивает диаграмму растяжения в координатах: удлинение образца Δl (мм) – сила P (Н, кгс) (рисунок 2.7). В результате обработки этой диаграммы строится диаграмма напряжений (рисунок 2.8) и находятся соответствующие пределы, являющиеся характеристиками прочности.

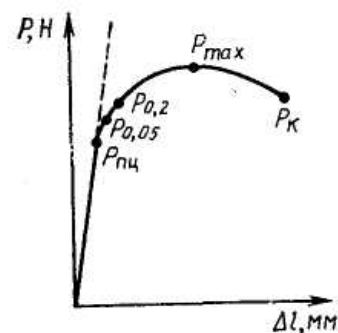


Рисунок 2.7 – Диаграмма растяжения при механических испытаниях

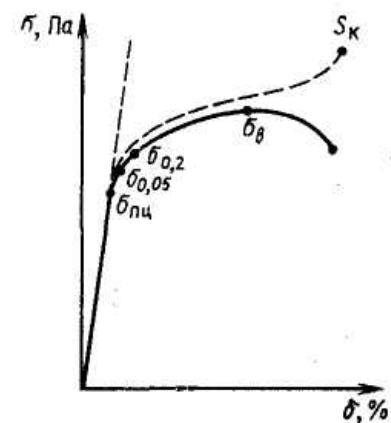


Рисунок 2.8 – Диаграмма напряжений образца при растяжении образца

Напряжения σ (Па или кгс/мм²) вычисляются путем деления силы P на начальную площадь поперечного сечения образца F_0 , которые откладываются по оси ординат. По оси абсцисс откладываются относительные удлинения δ (%), вычисляемые делением абсолютного удлинения образца Δl на его начальную длину l_0 .

Абсолютное удлинение находится как разность между длиной образца в момент замера силы l_1 и начальной длиной:

$$\Delta l = l_1 - l_0. \quad (2.5)$$

При испытании на растяжение определяются следующие основные характеристики прочности: пределы пропорциональности, упругости и текучести, временное (предел прочности) и истинное сопротивление разрыву.

Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$ является наибольшим напряжением, после которого деформация хотя и остается еще упругой, но нарушается пропорциональность между нагрузкой и деформацией (рисунки 2.7 и 2.8):

$$\sigma_{пц} = P_{пц} / F_0. \quad (2.6)$$

За условную величину предела упругости $\sigma_{0,05}$ принимается напряжение, при котором остаточное удлинение образца составляет 0,05 % начальной длины l_0 :

$$\sigma_{0,05} = P_{0,05} / F_0. \quad (2.7)$$

Физический предел текучести σ_T , является напряжением, при котором образец деформируется без увеличения нагрузки P_T :

$$\sigma_T = P_T / F_0. \quad (2.8)$$

Этот предел характерен для незакаленных сталей.

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ является напряжением, при котором остаточное удлинение образца составляет 0,2 % его начальной длины.

Временное сопротивление или предел прочности σ_B представляет собой напряжение, создаваемое в образце наибольшей нагрузкой, достигаемой при его испытании перед разрушением P_{max} :

$$\sigma_B = P_{max} / F_0. \quad (2.9)$$

Истинное сопротивление разрыва S_K – напряжение, создаваемое в момент разрушения образца в его материале в месте разрушения. Для его вычисления надо нагрузку в момент разрушения образца P_K разделить на площадь поперечного сечения в месте разрыва F_K :

$$S_K = P_K / F_K. \quad (2.10)$$

Пластичностью называется способность материала к пластической деформации. Ее характеристиками являются относительное

удлинение δ (%) и относительное сужение ψ (%), которые вычисляются по формулам:

$$\delta = \frac{l_r - l_0}{l_0} 100; \quad (2.11)$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} 100, \quad (2.12)$$

где l_r и F_K – длина образца в разрушенном состоянии и площадь его поперечного сечения в месте разрушения – шейке.

Ударная вязкость материала показывает его способность сопротивляться разрушению при ударном приложении нагрузки. Она оценивается по результатам ударного разрушения на маятниковом копре специального брусчатого образца с надрезом.

При этом ударная вязкость KCU [МДж/м²] или [кгс · м/см²] вычисляется как результат деления затраченной на разрушение образца работы A на его рабочее сечение F :

$$KCU = A / F. \quad (2.13)$$

Аудиторные задания

1 уровень

По справочной литературе для образцов, представленных в лаборатории, определить основные механические свойства и заполнить таблицу по форме таблицы 2.1.

Таблица 2.1

Наименование материала	Марка	Твердость	Характеристики пластичности	Ударная вязкость

2 уровень

По справочной литературе изучить механические свойства образцов, представленных в лаборатории, провести их сопоставление и результаты записать в таблицу по форме таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Наименование свойств	Образец 1 (наименование материала)	Образец 2 (наименование материала)	Образец 3 (наименование материала)	Заклучение

Лабораторная работа

«Изучение характеристик конструкционных материалов»

Общие сведения

К конструкционным относятся материалы, применяемые при изготовлении деталей электрических машин и аппаратов, теплоэнергетического оборудования (котлы, паровые турбины и т. д.), воспринимающих механические нагрузки и связывающих их отдельные элементы в единое целое. Наряду с этим конструкционные материалы служат для изготовления деталей системы охлаждения, теплоизоляции, корпусов и оболочек, защищающих изделия от воздействия окружающей среды.

Рассматриваемые материалы должны обладать механической прочностью, быть технологичными в обработке. Для использования в теплоэнергетике конструкционные материалы должны обладать жаростойкостью, жаропрочностью, устойчивостью к абразивному износу, иметь малую стоимость и недефицитность.

В качестве основных конструкционных материалов при производстве и ремонте электро- и энергооборудования находят широкое применение металлические конструкционные материалы: чугун (литье), сталь (литье, прокат и поковка), алюминиевые сплавы (литье), а также неметаллические материалы – пластмассы.

Чугун является одним из наиболее распространенных материалов, применяемых при изготовлении литых деталей электро- и энергооборудования и прежде всего элементов оболочки (станины, подшипниковых щитов и крышек), а также втулок коллектора и других деталей, к которым не предъявляются требования высокой механической прочности (серые чугуны марок СЧ 12-28, СЧ 15-32).

В таблице 2.3 представлены области применения чугуна в котельном оборудовании.

Таблица 2.3 – Марки чугуна, применяемые в котельном оборудовании

Марка	Наименование элемента	Предельные параметры						
		Внутренний диаметр D _в , мм	t, °C	Рабочее давление пара P, МПа (кгс/см ²)				
Чугунные отливки для необогреваемых элементов котлов								
Сч10, Сч15		80	130	3 (30)				
		300	200	0,8 (8)				
Сч20, Сч25 Сч30, Сч35		100	300	3 (30)				
		200		1,3 (13)				
		300		0,8 (8)				
Сч20, Сч25 Сч30, Сч35		600	130	0,64 (6,4)				
		1000		0,25 (2,5)				
Кч33-8, Кч35-10, Кч37-12		200	300	1,6 (16)				
					Вч35, Вч40, Вч45	200	350	4 (40)
						600	130	0,8 (8)
Чугунные отливки для обогреваемых элементов котлов								
Сч10, Сч15 Сч20, Сч25	Чугунные котлы: секционные с ребристыми трубами		130	1,5 (15)				
			300	3 (30)				
Сч10, Сч15 Сч20, Сч25, Сч30, Сч35	Конвективные экономайзеры; ребристые трубы, фасонные детали (колена, дуги, коллекторы и др.)	60	350	5 (50)				
			Вч35, Вч40, Вч45	Котлы-утилизаторы с ребристыми трубами	350	2,5 (25)		

Литую сталь в электро- и энергооборудовании применяют для изготовления тех частей, которые одновременно служат элементами

конструкции и магнитопровода, замыкая его (станина, основные и добавочные полюса машин постоянного тока и синхронных машин).

В электромашиностроении применяют круглую, листовую, шестигранную и квадратную прокатную сталь.

Сталь круглую используют для изготовления валов, втулок, шестерен и других деталей.

Сталь шестигранную применяют для изготовления деталей, имеющих шестигранную часть: болтов, гаек и других деталей. Крупные болты изготавливают из круглой стали с высадкой шестигранной головки.

Сталь квадратная идет на изготовление стержней, пальцев щеткодержателей и других деталей.

Сталь листовую применяют для изготовления листов полусов машин постоянного и переменного тока, фундаментных плит, стояков подшипников и многих других деталей (диффузоров, распорок и т. д.).

Жесть белую холоднокатаную горячего лужения и ленточную толщиной 0,18–0,5 мм, покрытую с обеих сторон слоем олова, применяют при изготовлении бандажей, скрепок, табличек. Она хорошо штампуются и устойчива против коррозии.

Углеродистую стальную холоднокатаную проволоку используют при изготовлении пружин щеткодержателей, запоров крышек и других деталей.

Области применения стали в теплоэнергетическом оборудовании представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Применение сталей в теплоэнергооборудовании

Марка стали	Область применения
Стали углеродистые	
Ст0	Неответственные и малонагруженные детали, нерасчетные элементы сварных конструкций (тяги, рычаги, планки, угольники и т. п.)
Ст3сп	Малоответственные детали машин, не подвергающиеся термообработке (хомуты, болты, гайки, прокладки и т. п.)
Ст4, Ст5, Ст6,	Детали машин (болты, валы, пластины, тяги и т. п.), теплотехническое оборудование
Ст7сп	Детали, подвергающиеся интенсивному износу, – термически обработанные нагруженные детали (пружинные шайбы и т. д.)

Окончание таблицы 2.4

Марка стали	Область применения
Сталь качественная конструкционная	
10, 20	Детали, штампуемые в холодном состоянии, сварные детали (тяги, прокладки, трубки и т. п.), сосуды, трубопроводы, работающие при температуре среды менее 450 °С, трубы поверхностей нагрева паровых котлов из стали 20 с температурой пара менее 500 °С, крепежные детали, сварные детали
35, 45	Детали, подвергающиеся небольшим напряжениям (диски, ободы, крепежные детали, валы, роторы). Детали повышенной прочности (шестерни, валики, втулки, оси, муфты, шпильки и т. п.)
40Г, 70Г	Валы, болты и гайки высокой прочности. Детали высокой упругости и прочности (пружины, шайбы, скобы, лопасти вентиляторов, зубчатые колеса и т. п.)
15К, 20К, 25К	Бараны и сосуды паровых котлов, работающие под давлением 60 кгс/см ² и температуре 450 °С
Сталь легированная конструкционная	
15Х, 20Х, 30ХМ, 35 ХМ	Втулки, пальцы, валки, шестерни, крепежные детали, работающие при температуре до 425–470 °С
35Х, 40Х	Валы, оси, шестерни, болты ответственного назначения, шпильки
40ХН, 45ХН, 50ХН, 50ХФА	Крупные детали ответственного назначения: валы, зубчатые колеса, шатуны и т. п. Ответственные клапаны, сальниковые и другие пружины, работающие при температуре до 300 °С
60СА, 60С2А, 60С2ХА, 70С2ХА	Высоконагруженные ответственные пружины и рессоры
Стали коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные	
Х24Н19С2Л, Х5, Х18Н12Т	Для подвесок и опор в паровых котлах
Х23Н13, Х23Н18, 1Х12Н25ТР, 10Х12НВМФА, 4Х9С2	Трубы, аппаратура, различные детали при температуре до 400–450 °С

Описание лабораторной установки и хода выполнения лабораторной работы

Изучение конструкционных материалов производится в следующей последовательности:

- определяется цвет материала,
- путем измерения образца вычисляется его объем,
- образец взвешивается на весах,
- вычисляется плотность материала,
- определяются специфические особенности материала
- с использованием справочной литературы определяется наименование, марка материала и область применения.

Плотность материала (ρ_t) при температуре измерения в г/см³ вычисляют по формуле:

$$\rho_t = \frac{M_1}{V}, \quad (2.14)$$

где M_1 – масса образца, г;

V – объем образца при температуре измерения, см³.

Объем параллелепипеда:

$$V = Sh, \quad (2.15)$$

где S – площадь основания;

h – высота.

Объем куба:

$$V = a^3, \quad (2.16)$$

где a – длина ребра.

Объем цилиндра:

$$V = \pi r^2 h = 0,25\pi d^2 h, \quad (2.17)$$

где r – радиус основания цилиндра,

h – высота цилиндра;

d – диаметр основания.

Объем полого цилиндра (трубы)

$$V = \pi (r_2^2 - r_1^2)h, \quad (2.18)$$

где r_2 – наружный радиус цилиндра;

r_1 – радиус отверстия;

h – высота цилиндра.

За результат испытания принимают среднее арифметическое трех параллельных определений, допускаемые расхождения между которыми не должны быть более 0,005 г/см³, если нет других указаний в нормативно-технической документации на материал.

Задания

1 уровень

Изучить образцы металлических конструкционных материалов, представленных в лаборатории. Для каждого образца указать в отчете наименование материала, область применения, особые свойства.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1 и дополнительно определить цвет, плотность, марку материала с использованием справочной литературы. Результаты занести в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Описание изученных образцов из конструкционных материалов

Наименование материала	Марка	Цвет	Плотность	Особые свойства материала (мягкость, твердость, гибкость)	Область применения

Вопросы предварительного контроля

1. Какие конструкционные материалы применяют при производстве электрического и теплоэнергетического оборудования?
2. Какие металлы относятся к черным и цветным?
3. Опишите методику определения плотности.
4. Какие требования предъявляются к конструкционным материалам?

Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1 уровень

1. Какова область применения чугуна?
2. Какова область применения стального проката?
3. Где в качестве конструкционных материалов находят применение сплавы алюминия?
4. Где в качестве конструкционных материалов находят применение сплавы меди?

2 уровень

1. Объяснить причины использования серого чугуна в станинах электрических машин и для изготовления котлов.
2. Объяснить причины использования легированной стали для изготовления деталей ответственного назначения.
3. Объяснить причины использования бронзы и латуни в электрическом и теплоэнергетическом оборудовании.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПО ТЕМЕ «ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ»

Задания

1 уровень

Изучить способы получения и области применения заданного металла и оформить в виде реферата.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1 и дополнить реферат сведениями о характеристиках, достоинствах и недостатках заданного металла.

Варианты индивидуальных заданий

1. Серый чугун.
2. Белый чугун.
3. Ковкий чугун.
4. Высокопрочный чугун.
5. Углеродистая сталь.
6. Легированная сталь.
7. Латунь.

8. Бронза.
9. Дюралюминий.
10. Силумин.
11. Титан.
12. Никель.

ПРИМЕРЫ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ МОДУЛЯ

1 уровень

1. Какие материалы называются конструкционными?
2. Перечислите металлические конструкционные материалы.
3. Что такое деформация?
4. Как определяется твердость по Бринеллю.
5. Что представляет собой бронза и латунь?

2 уровень

1. Перечислить и охарактеризовать основные компоненты сплавов железа с углеродом.
2. Дайте краткое описание технологии получения стали из чугуна.
3. Изложите методику определения марки материала по образцу.
4. Назовите виды и область применения сплавов алюминия при производстве электрооборудования.
5. Приведите структуру маркировки легированной стали.

3 уровень

1. Изложите перспективы применения титановых сплавов в электрическом и теплоэнергетическом оборудовании.
2. Изложите способы улучшения качества металлов.

МОДУЛЬ 2 ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

В результате изучения модуля студент должен:

знать:

- понятия: прокатка, ковка, штамповка, сварка, литье, закалка, отпуск, отжиг, цементация, азотирование, цианирование;
- виды литья, сварки, обработки давлением и резанием, виды термической и химико-термической обработки, оборудование и приспособления для обработки металлов и сплавов;
- результаты обработки материала различными способами на основании свойств металлов;

уметь:

- выбирать оптимальный способ обработки металлов, а также необходимое для обработки оборудование и инструменты.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Прокатка – процесс деформирования слитка или иной продолговатой металлической заготовки между двумя вращающимися валками.

Ковка – деформирование металла заготовки путем целенаправленно наносимых ударов или нажатий.

Штамповка – процесс, при котором требуемые формы и размеры заготовки получаются в результате принудительной деформации металла в специальном приспособлении – штампе.

Сварка – технологический процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями изделия при их местном или общем нагреве, пластическом деформировании, а также при совместном действии этих факторов.

Литье – процесс изготовления литых изделий, а также соответствующая ему отрасль промышленности.

Закалка – термообработка, которая придает стали мартенситную структуру и свойства, необходимые изделию для выполнения своих эксплуатационных функций.

Отпуск – операция термической обработки, включающая нагрев закаленной стали, выдержку, охлаждение.

Отжиг – термическая обработка, включающая нагрев стали до определенных температур, выдержку и медленное охлаждение и имеющая целью обеспечение фазовых превращений и достижение практически равновесных (в соответствии с диаграммой состояния системы $Fe - Fe_3C$) фазового и структурного состояний.

Цементация – насыщение упрочняемой поверхности стальной детали углеродом на глубину до 2 мм с целью получения при последующей закалке с низким отпуском высокой твердости и износостойкости.

Азотирование – поверхностное упрочнение стали путем ее насыщения азотом.

Цианирование – одновременное насыщение упрочняемой поверхности углеродом и азотом в расплавленной цианистой соли.

ОСНОВНОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Лекция Способы обработки металлов

1. Сварка металлов.
2. Литейное производство.
3. Обработка металлов давлением.
4. Обработка металлов резанием.
5. Виды термической обработки стали.
6. Химико-термическая обработка стали.

Сварка металлов

Сварка – технологический процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями изделия при их местном или общем нагреве, пластическом деформировании, а также при совместном действии того и другого факторов.

В зависимости от состояния металла в сварочной зоне все способы сварки делятся на две группы: плавлением и давлением.

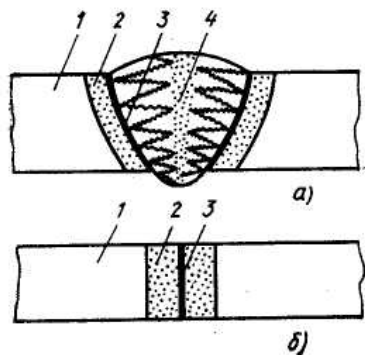


Рисунок 2.9 – Схема сварного соединения

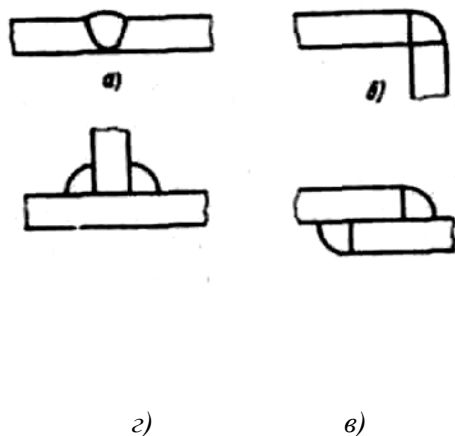


Рисунок 2.10 – Виды сварных соединений

Сварное соединение, полученное сваркой плавлением (рисунок 2.9а), состоит из свариваемого металла 1, не изменившего своих свойств при сварке; зоны термического влияния 2, структура и свойства металла этой части сварного соединения изменились в результате фазовых превращений или рекристаллизации под воздействием нагрева от 500 °С до $T_{пл}$: зоны сплавления 3 с частично оплавленными зернами свариваемого металла; сварного шва 4, образовавшегося в результате кристаллизации сварочной ванны (расплавленного свариваемого и присадочного металла). Соединение, выполненное сваркой давлением (рисунок 2.9б), состоит из свариваемого металла 1, зоны термомеханического влияния 3 и зоны соединения 2, где образовались межатомные связи между свариваемыми металлами.

К сварке плавлением относятся следующие способы: дуговая, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная, газовая, термитная, а к сварке давлением – контактная, диффузионная, холодная, ультразвуковая, взрывом и др.

Сварные соединения могут быть (рисунок 2.10): стыковыми – а (выполняются с помощью стыковых швов), угловыми – б, тавровыми – в, нахлесточными – г (выполняются с помощью угловых швов).

Для питания сварочной дуги применяют источники питания переменного тока (сварочные трансформаторы) и постоянного тока (сварочные генераторы и выпрямители).

Сварочные трансформаторы – это понижающие трансформаторы (вторичное напряжение 60–80 В), падающая характеристика которых создается за счет повышенного магнитного рассеяния или включения в сварочную цепь индуктивного сопротивления (дресселя). Катушки первичной и вторичной обмоток расположены попарно на обоих стержнях сердечника трансформатора. Первичная обмотка неподвижна и закреплена в нижней части сердечника, вторичная перемещается по нему с помощью винтового механизма. Сварочный ток регулируется изменением расстояния между обмотками (при его увеличении сварочный ток уменьшается).

Сварочные генераторы – это специальные генераторы, падающая характеристика которых получается изменением магнитного потока генератора в зависимости от сварочного тока. Сварочные генераторы приводятся в действие электродвигателем или двигателем внутреннего сгорания.

Литейное производство

Литейным производством называется процесс изготовления литых изделий, а также соответствующая ему отрасль промышленности. В заводской практике широко используется термин «литье», под которым понимается вся совокупность технологических операций, приводящих к получению литых заготовок, называемых отливками.

Общая схема литья. Процесс получения отливки складывается из следующих основных операций: изготовления литейной формы; плавки металла; заливки металла в форму; затвердевания металла и охлаждения отливки; выбивки отливки из формы; обрубки и очистки отливки; термической обработки отливки; контроля качества отливки и сдачи ее на механическую обработку.

Основные виды литья. Виды литья отличаются друг от друга по материалу литейной формы и по способу подачи в нее заливаемого металла. Однако более существенно они различаются по точности размеров и чистоте поверхности отливок, а также по производительности и степени сложности технологического процесса. Сложились две группы видов литья: литье в песчано-глинистые формы и специальные виды литья.

Литье в песчано-глинистые формы – наиболее простой и распространенный способ получения литых заготовок. Материалами для изготовления форм в данном случае служат формовочные смеси, состоящие из песчаной основы, в которую в качестве связующих материалов добавляются определенные количества глины и воды.

Кроме того, в смесь вводятся противопригарные добавки в виде молотого каменного угля, маршаллита (пылевидного кварца), мазута и другие вещества, способствующие улучшению качества отливки (древесные опилки, сульфитно-спиртовая барда).

Специальные виды литья применяются для устранения недостатков литья в песчано-глинистые формы – низкой точности размеров и чистоты поверхности, приводящих к большим припускам на механическую обработку и потерям металла в стружку. Недостатками являются также невысокая производительность и плохие санитарно-гигиенические условия труда из-за большой запыленности и шума на рабочих местах. Ниже описываются сущность наиболее распространенных специальных видов литья.

При литье в металлические формы – кокили форма изготовляется из чугуна или стали. Основными преимуществами являются высокие точность размеров и чистота поверхности отливки, а также мелкое зерно металла отливки, что снижает металлоемкость изделий и повышает прочность металла.

Центробежное литье – литье в быстровращающиеся металлические формы (рисунок 2.11). Таким способом отливаются короткие (а) или длинные (б) тела вращения – трубы, втулки и другие аналогичные им изделия. Преимущества те же, что при кокильном литье, однако, качество внутренней поверхности вследствие усадочных явлений хуже наружной.

При литье под давлением жидкий металл вводится в замкнутую металлическую пресс-форму под значительным давлением и кристаллизуется, оставаясь под давлением (рисунок 2.12), что, устраняя пористость и рыхлость, улучшает металлургическое качество отливки.

На рисунке 2.12 показаны: подача металла в предкамеру (а), нагнетание металла в рабочую полость (б) и выбивка отливки (в). Заметим, что в одной пресс-форме может располагаться несколько рабочих полостей, питаемых одновременно. Таким образом, литье под давлением является самым высококачественным, точным, чистым и производительным видом литья.

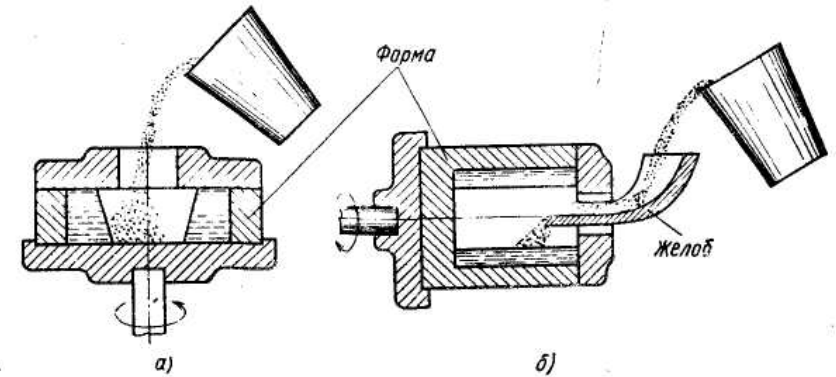


Рисунок 2.11 – Схема центробежного литья

При литье в оболочковые формы литейная форма собирается из двух частей, изготовляемых на специальной установке из смеси, состоящей из мелкого кварцевого песка и синтетической термореактивной смолы – порошок-бакелита.

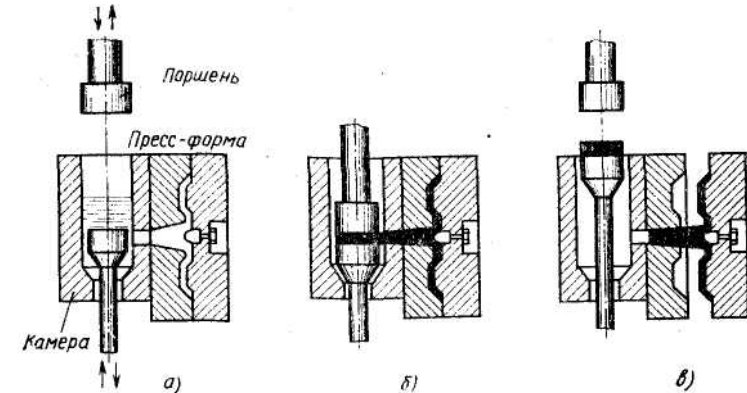


Рисунок 2.12 – Схема литья под давлением

Преимущества метода: более высокие, чем при литье в песчано-глинистые формы, точность размеров, чистота поверхности отливок и производительность. Недостаток – выделение токсичных фенолсодержащих газов, что требует мощной вентиляции.

Литье по выплавляемым моделям – один из самых точных видов литья, который применяется для получения сложных по очертаниям изделий из обычных материалов, а также инструмента и других изделий из твердых, труднообрабатываемых режущим инструментом материалов. Изготовленные данным способом изделия не требуют механической обработки. Рассмотрим технологию данного вида литья. Вначале в специальной пресс-форме (рисунок 2.13а) изготавливается от одной до нескольких десятков моделей изготавливаемой детали-отливки (рисунок 2.13б) из смеси парафина со стеарином (по 50 % каждого). В размерах моделей учитываются только размеры деталей и литейная усадка материала отливки. Припуск на мехобработку не дается, поскольку она не производится.

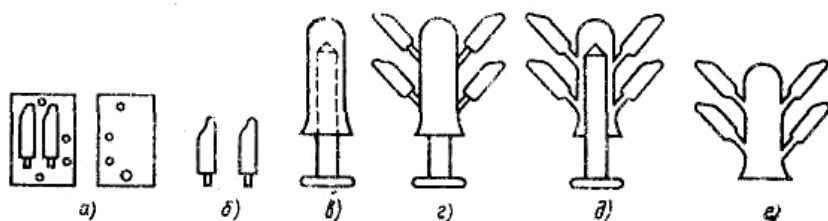


Рисунок 2.13 – Схема литья по выплавляемым моделям

Основное преимущество литья по выплавляемым моделям – самая высокая точность размеров и чистота поверхности отливок, а также высокая производительность.

Обработка металлов давлением

Во всех случаях обработки давлением требуемая форма и необходимые размеры изделию (заготовке) придаются пластической деформацией исходной заготовки, имеющей форму слитка или болванки, уже прошедшей предварительную обработку давлением. Таким образом, сущность обработки металла давлением состоит в целенаправленной пластической деформации, придающей ему определенные форму и размеры, в ходе которой разрушается грубозернистая литая структура, устраняются пористость и рыхлость, улучшается металлургическое качество и создается благоприятная ори-

ентировка вновь образовавшихся структурных составляющих металла.

Заготовки для деталей, полученные обработкой давлением, принято называть **поковками**. Исходными заготовками для крупных поковок, как правило, служат стальные слитки. Заготовки для мелких поковок получают путем разрезки на мерные куски-болванки так называемых прокатных профилей – металлических балок или прутков различной формы поперечного сечения, получаемых прокаткой.

Прокатка. Прокатка представляет собой процесс деформирования слитка или иной продолговатой металлической заготовки между двумя вращающимися вальками, расстояние между рабочими поверхностями которых меньше высоты заготовки. Целью прокатки является получение разнообразной продукции, различающейся профилями и размерами поперечного сечения, а также длинами балок, прутков и составляющей так называемый сортамент проката. Сортамент стального проката включает следующие пять основных групп.

Сортовой прокат простого и фасонного профиля. Простой профиль (рисунок 2.14а) используется для порезки на заготовки, которые идут либо на дальнейшую обработку давлением – ковку или штамповку, либо на механическую обработку для изготовления различных деталей. Фасонный профиль (рисунок 2.14б) главным образом используется для различных строительных конструкций, включая железнодорожные пути.;

- **листовой прокат** делится на толстолистовую сталь толщиной свыше 4 мм и тонколистовую 0,2–3,75 мм;
- трубы бесшовные различного диаметра с разной толщиной стенок, разнообразного назначения;
- **специальный прокат** включает в себя вагонные колеса, шпунтовые сваи, автоободья и т. д.;
- **периодический прокат** (рисунок 2.14в) – прокат с периодически изменяющимся по длине профилем. Он используется в качестве заготовок для штамповки (например, заготовок шатунов автомобильных двигателей) или непосредственно для механической обработки.

Существуют также специально разработанные сортаменты для выпуска проката из цветных металлов и сплавов – меди, алюминия, латуни, дюраля в виде листов, ленты, труб, прутков и других изделий. Важнейшей особенностью деформации металла при прокатке является получение волокнистой структуры металла с ориентиров-

кой волокон вдоль направления прокатки, т. е. перпендикулярно осям вращения валков.

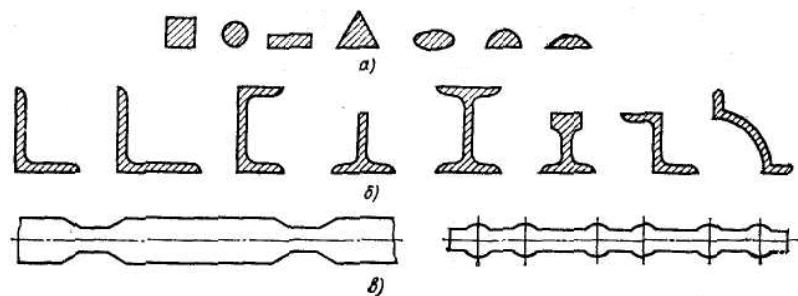


Рисунок 2.14 – Сортамент стального проката

Прокатка металлов осуществляется на прокатных станах. Основными рабочими элементами прокатных станов являются валки, имеющие цилиндрическую форму. Валки размещаются в основной части прокатного стана – рабочей клетки. Рабочая часть валка называется **бочкой**. Бочки могут быть гладкими или ручьевыми. Первые применяются для прокатки листов и лент, а вторые – для сортового металла. Ручьи представляют собой кольцевые вырезы на поверхности валка. Совпадающие ручьи верхнего и нижнего валков образуют калибры, с помощью которых сортовому прокату постепенно придаются требуемые профили.

Ковка и штамповка. При ковке деформирование металла заготовки осуществляется путем целенаправленно наносимых ударов или нажатий. В зависимости от используемого оборудования ковка делится на: свободную и ковку в штампах (штамповку).

Свободная ковка состоит в том, что происходящая формообразующая пластическая деформация металла направляется в основном искусством оператора-кузнеца, от которого требуется высокая квалификация. Придание заготовке требуемых формы и размеров осуществляется за счет выполнения ряда простейших ковочных операций, для реализации которых может применяться несложный кузнечный инструмент.

При штамповке требуемые формы и размеры заготовки получаются в результате принудительной деформации металла в ручье специального приспособления – штампа (рисунок 2.15). В штампе по периферии ручья 3 на стыке нижней 1 и верхней 2 частей штампа

выполняется заусенечная канавка для выхода избыточного металла, образующего удаляемый после штамповки заусенец (рисунок 2.16).

Несложные заготовки штампуются в одноручьевых штампах, а сложные – в многоручьевых, в которых при переходе от ручья к ручью поковка постепенно приобретает требуемые размеры и форму.

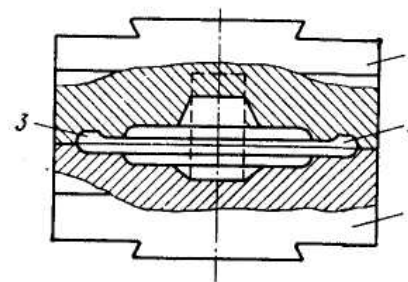


Рисунок 2.15 – Схема штамповки

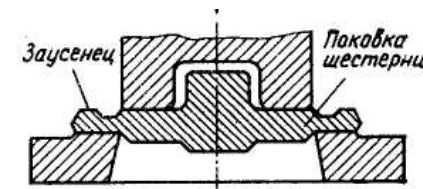


Рисунок 2.16 – Схема обрезки заусенца

Исходные заготовки для штамповки отрезаются от сортового проката. Ими могут служить изделия периодического проката. Перед штамповкой металл нагревается до определенной, зависящей от рода металла температуры с целью повышения его пластичности и уменьшения усилий при обработке. Свободная ковка и штамповка производятся с помощью специальных ковочных или штамповочных молотов и прессов.

Обработка металлов резанием

Процесс резания металлов заключается в срезании с обрабатываемой заготовки слоя металла – припуска, специально оставленного на обработку, с целью получения детали с заданными чертежом формой, размерами и шероховатостью поверхностей.

Основными видами обработки резанием являются точение, строгание, сверление, фрезерование и шлифование. Обработка металлов резанием осуществляется на металлорежущих станках – токарных, строгальных, сверлильных, фрезерных и шлифовальных с использованием различных режущих инструментов – резцов, сверл, фрез, шлифовальных кругов.

Удаляемый в процессе резания металл – припуск – превращается в стружку, при этом наличие стружки является характерным признаком всех разновидностей процесса резания металлов.

Для осуществления процесса резания необходимо иметь главное движение резания и движения подачи (рисунок 2.17а). Главное движение резания (главное движение) имеет наибольшую скорость, которая называется **скоростью резания**. Движение подачи имеет скорость меньшую, чем скорость главного движения резания, и предназначено для срезания припуска со всей поверхности, подлежащей обработке. Это движение называется **подачей**. Главное движение и движение подачи в зависимости от вида обработки могут быть вращательными или прямолинейно поступательными и совершаться как заготовкой, так и режущим инструментом.

При точении главное движение – вращательное движение заготовки, движение подачи – прямолинейное поступательное движение режущего инструмента – резца (рисунок 2.17а). Перемещением резца относительно заготовки срезается ее исходная поверхность, которая называется обрабатываемой поверхностью 1, и образуется новая поверхность, которая называется обработанной поверхностью 3. Временно существующая поверхность в процессе резания между обрабатываемой и обработанной поверхностями называется поверхностью резания 2.

Расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное в направлении, перпендикулярном обработанной поверхности, определяется глубиной резания Δ . При точении глубина резания выражается уравнением:

$$\Delta = (D - d) / 2, \quad (2.19)$$

где D и d – диаметры обрабатываемой и обработанной поверхностей, мм.

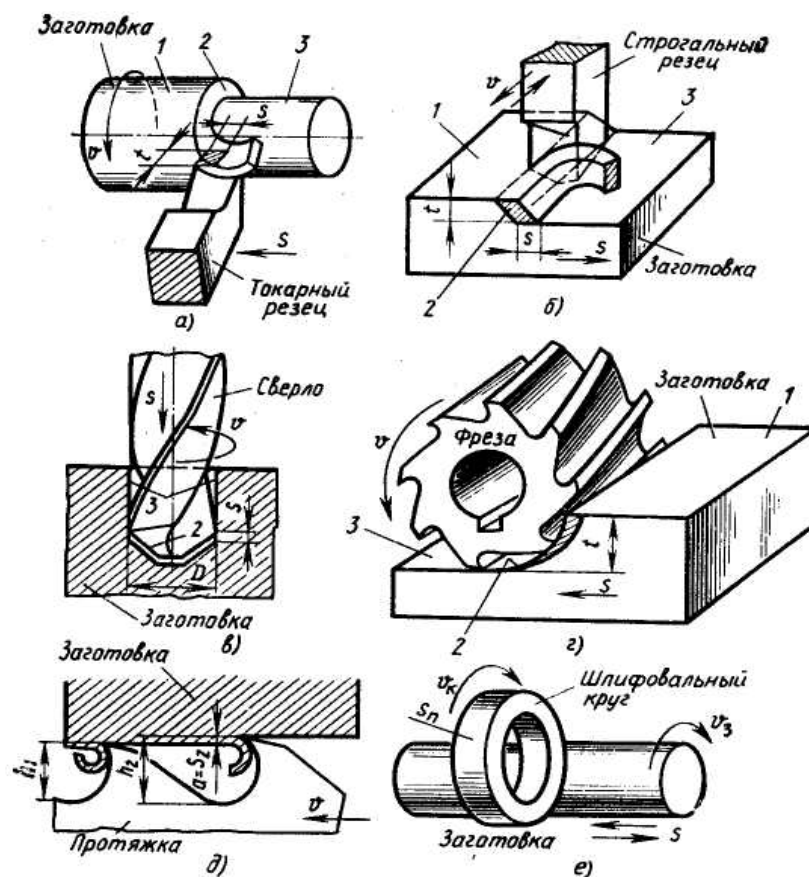


Рисунок 2.17 – Схема основных видов обработки металлов резанием

Скорость резания при точении v – линейная скорость точек обрабатываемой поверхности заготовки, м/мин, которая определяется следующим уравнением:

$$v = 10^{-3} \pi D n, \quad (2.20)$$

где D – диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм;

n – частота вращения заготовки, об/мин.

Подача s при точении количественно оценивается расстоянием, на которое перемещается режущий инструмент – резец – в направлении движения подачи за один оборот заготовки, и имеет размер

ность мм/об. Скорость резания v , подача s и глубина резания Δ являются параметрами режима резания при точении. При строгании главное движение сообщается резцу, а движение подачи — заготовке (рисунок 2.17б) или как главное движение, так и движение подачи сообщается только резцу

При сверлении (зенкерования и развертывании) как главное движение, так и движение подачи обычно сообщается режущему инструменту сверлу (зенкеру, развертке) (рисунок 2.17в), однако, есть схемы сверления, в которых главное движение сообщается заготовке.

При фрезеровании главное движение сообщается режущему инструменту фрезе, а движение подачи — заготовке (рисунок 2.17з), однако, есть схемы фрезерования, согласно которым как главное движение, так и движение подачи сообщается фрезе. При круглом (рисунок 2.17д) и плоском (рисунок 2.17е) шлифовании главное движение сообщается режущему инструменту — шлифовальному кругу, а движение подачи — заготовке.

Скорость резания v при сверлении (зенкерования и развертывании), фрезеровании и шлифовании определяется так же, как и при точении, только диаметром режущего инструмента. Скорость резания v при шлифовании определяется по формуле:

$$V = 10^{-3} \pi D n / 60. \quad (2.21)$$

Скорость резания v при строгании (м/мин) является линейной скоростью перемещения резца или заготовки.

Подача s и глубина резания Δ определяются аналогично точению, только при строгании подача s имеет размерность мм/ дв. ход (дв. ход — двойной ход резца или заготовки), а при сверлении (зенкерования, развертывании) и фрезеровании также рассматривается подача на режущую кромку (зуб) режущего инструмента s_z , которая определяется уравнением:

$$s_z = s/z. \quad (2.22)$$

где z — количество режущих кромок (зубьев) инструмента.

При фрезеровании рассматривается также минутная подача s , которая численно оценивается значением перемещения фрезы относительно заготовки за минуту и имеет размерность мм/мин. При шлифовании подача s (мм/об) определяется в долях ширины шлифовального круга B :

$$s = kB, \quad (2.23)$$

где B — ширина шлифовального круга, мм,

k — коэффициент, принимаемый в зависимости от точности обработки 0,2–0,8.

Режущим инструментом называется инструмент для обработки металлов резанием. Наиболее распространенный режущий инструмент — резец — состоит из режущей части и стержня. Режущая часть имеет переднюю поверхность и несколько задних поверхностей, из которых одна называется главной задней поверхностью, а остальные — вспомогательными задними поверхностями. Передняя поверхность обращена по ходу главного движения в сторону срезаемого слоя на обрабатываемой заготовке и по ней перемещается стружка. Главная задняя поверхность обращена к поверхности резания, вспомогательная задняя поверхность — к обработанной поверхности заготовки.

В качестве инструментальных материалов для лезвийных инструментов используются быстрорежущие стали, твердые сплавы (металлокерамика), минералокерамические сплавы (керметы), сверхтвердые материалы, синтетические алмазы.

Твердые сплавы делятся на три группы: вольфрамокобальтовую (ВК), вольфрамтитанокобальтовую (ТК) и вольфрамтитанотантокобальтовую (ТТК). При обозначении марок твердых сплавов процентное содержание карбидов титана (Т), суммарное содержание карбидов титана и тантала (ТТ) и металлического кобальта (К), остальным является карбид вольфрама. В твердых сплавах указанные порошкообразные карбиды соединяются в монолит металлическим кобальтом. В конце обозначения марки твердого сплава могут стоять буквы М, ОМ, Б, что означает зернистость: мелкозернистый, особо мелкозернистый и крупнозернистый.

Твердые сплавы группы ВК (ВКЗМ, ВК4, ВК6М, ВК6-ОМ, ВК8, ВК 10-ОМ), группы ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4) и группы ТТ (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ0К8-Б). Твердость указанных марок твердых сплавов составляет НРА 87–91, температуростойкость 800–1250 °С. Основой минералокерамических сплавов (керметов) является корунд — оксид алюминия Al_2O_3 . Температуростойкость минералокерамики и керметов составляет 1500–1300 °С.

Сверхтвердые материалы являются синтетическими материалами на основе гексагонального или кубического нитрида бора, который по твердости превосходит керметы и уступает только синтетическому алмазу. Температуростойкость композитов и нитрида бора достигает 1300–1800 °С.

Виды термической обработки стали

Термическая обработка металлов и сплавов представляет собой совокупность проводимых по определенным режимам операций их нагрева и охлаждения с целью придания им такой структуры, которая бы обеспечила получение требуемых служебных или технологических свойств. Таким образом, за счет термической обработки можно не меняя химического состава стали изменять ее свойства в очень широком диапазоне.

При помощи химико-термической обработки можно упрочнять только поверхностный слой металла, насыщая его каким-нибудь компонентом, оставляя при этом сердцевину без изменения. Нагрев стальных деталей для термообработки производится в специально сконструированных термических печах, имеющих камеру для загрузки деталей.

Охлаждение деталей при термообработке производится в газообразных или жидких охлаждающих средах, выбираемых таким образом, чтобы получить требуемую скорость охлаждения аустенита, необходимую для превращения его в желаемую структуру.

Минимальная скорость охлаждения, при которой обеспечивается превращение аустенита в мартенсит, называется **критической скоростью закалки**.

Охлаждение аустенита в воде обеспечивает за критическую скорость и гарантирует получение мартенситной структуры, характеризующейся высокой твердостью и практически нулевыми пластичностью и вязкостью.

Отжиг служит главным образом для снижения твердости стальных заготовок перед механической обработкой. Для его проведения заготовки из эвтектоидной и доэвтектоидной стали нагревают до аустенитного состояния, а из заэвтектоидной – до аустенитно-цементитного, делают выдержку для выравнивания состава аустенита и медленно охлаждают, выключив источник теплоснабжения печи, с закрытой, а иногда с открытой дверцей.

Нормализацией может быть достигнут ряд целей: измельчение выросшего по какой-то причине зерна стали, разрушение затрудняющей механическую обработку цементитной сетки вокруг зерен заэвтектоидной стали (>0,8 % углерода), а также перекристаллизация грубой и хрупкой столбчато-дендритной структуры литой стали в мелкозернистую, равноосную.

Закалка является первой операцией окончательной термообработки изделий. Под окончательной понимают такую термообработку, которая придает стали ту структуру и свойства, которые необхо-

димы изделию для выполнения своих эксплуатационных функций. Получив предварительно мартенсит и подвергнув его затем соответствующему виду отпуска, только тогда можно получить у стали наилучший комплекс механических свойств, т. е. наиболее благоприятное сочетание твердости, прочности, вязкости и пластичности, необходимое для надежной и долговечной работы изделия.

Отпуск стали является заключительной операцией термообработки, выполняемой после закалки. Его основной целью является трансформирование полученного в результате закалки мартенсита в структуру, обладающую оптимальным комплексом вязкостно-прочностных свойств, способных обеспечить надежную и долговечную работу изделия в заданных условиях эксплуатации.

Он заключается в нагреве закаленной детали до какой-то определенной, заданной температуры, лежащей ниже 727 °С, выдержке при этой температуре, достаточной для завершения необходимых структурно-фазовых превращений, и охлаждении с любой скоростью.

В связи с изложенным в практике термической обработки сложились три вида отпуска соответственно для каждой из перечисленных групп изделий.

Низкий отпуск производится при 150–180 °С (иногда при 220–250 °С). При этих температурах из решетки мартенсита выходит лишь часть «лишнего» углерода, который образует высокодисперсные, не видимые в микроскоп частицы эpsilon-карбида.

Средний отпуск производится при 350–450 °С (иногда 470 °С). При таком нагреве мартенсит полностью распадается на ферритно-цементитную смесь, так как весь избыточный углерод покидает решетку мартенсита (и образуется феррит), а частицы эpsilon-карбида в результате перестройки и коагуляции превращаются в зернышки цементита. Образующаяся при среднем отпуске тонкая смесь феррита и зернистого цементита называется троститом отпуска. Она обладает высокими упругими свойствами и достаточной для долговечной работы вязкостью.

Высокий отпуск осуществляется при 500–650 °С. Он практически полностью устраняет искажения кристаллической решетки альфа-железа и снимает закалочные напряжения. Плотность дислокаций сводится к минимуму.

В результате усиливающейся коагуляции зернышки цементита, объединяясь, укрупняются и получается смесь более крупных, чем у тростита, зерен цементита с ферритом. Образующуюся структуру называют сорбитом отпуска. Она имеет наиболее благоприятное сочетание свойств: максимальные вязкость, пластичность и вполне

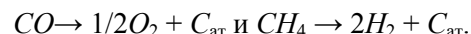
удовлетворительный предел текучести. По этой причине закалку с высоким отпуском часто называют улучшением

Химико-термическая обработка стали

Химико-термическая обработка имеет целью диффузионным способом насытить поверхность детали каким-либо элементом-упрочнителем и, таким образом, обеспечить получение высокой твердости и износостойкости. Чаще всего для этой цели применяются цементация, азотирование и цианирование.

Цементацией называется насыщение упрочняемой поверхности детали углеродом на глубину до 2 мм с целью получения при последующей закалке с низким отпуском высокой твердости и износостойкости. Чтобы сердцевина детали оказалась вязкой и ударостойкой, деталь изготавливается из низкоуглеродистой, как правило, легированной стали 18ХГТ, 20Х и т. д. Хорошие результаты дает газовая цементация оксидом углерода CO или метаном CH_4 в специальной герметичной камере при температуре 900–950 °С.

Образующийся при диссоциации упомянутых газов атомарный углерод $C_{ат}$ диффундирует в аустенит поверхностного слоя:



После закалки и низкого отпуска упрочненный слой приобретает твердую и износостойкую структуру мартенсита отпуска с равномерно распределенными в нем зернами карбидов.

Азотированием называется поверхностное упрочнение стали путем ее насыщения азотом. Наиболее твердыми и термостойкими нитридами, образующимися при азотировании и обеспечивающими упрочняемому слою высокую твердость и износостойкость не только при комнатной, но и при повышенной температуре, являются нитриды хрома, алюминия и молибдена (CrN , AlN , MoN). Поэтому детали, подвергающиеся азотированию, должны изготавливаться из среднеуглеродистой стали, содержащей упомянутые легирующие элементы, например из стали 35ХМЮА. Так как азотирование производится при температуре 500–600 °С в газовой среде аммиака и указанная температура соответствует температуре высокого отпуска, то по существующей технологии перед азотированием деталь улучшают, получая у ее материала прочную и вязкую сорбитную структуру.

В результате складывается удачное сочетание состоящего из очень твердых, износостойких и термостойких нитридов поверхностного слоя и вязкой сорбитной сердцевины. В отличие от цементации азотированию подвергают такие трущиеся детали, которые при

эксплуатации испытывают еще и нагрев (например, гильзы цилиндров некоторых двигателей внутреннего сгорания). Для сравнения заметим, что упрочненный цементацией слой при нагреве свыше 250 °С теряет твердость и износостойкость, а азотированный слой выдерживает более высокие температуры (свыше 600–700 °С.)

Цианирование представляет собой одновременное насыщение упрочняемой поверхности углеродом и азотом в расплавленной цианистой соли. Однако вследствие опасности обращения с цианосодержащей средой на заводах более широкое применение нашла **нитроцементация** поверхностное упрочнение стальных деталей в газовой среде, состоящей из смеси около 92 % цементирующего газа (эндогаз + природный газ) и до 8 % аммиака. Процесс идет в специальной камере при $T \approx 870$ °С.

В результате закалки и низкого отпуска на поверхности получается твердый, износостойкий мартенситный слой с зернышками карбонитридов.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется сваркой металлов?
2. Для чего нужна ковка и штамповка металлов?
3. Назовите основные характеристики процессов резания металлов.
4. Назовите виды термической обработки стали.
5. Какими способами выполняют химико-термическую обработку стали?
6. Опишите процесс литья по выплавляемым моделям.
7. Приведите схему контактной сварки.
8. Назовите сортамент металлопроката.
9. Назовите геометрические параметры реза.
10. Каких видов бывает отпуск стали?
11. Опишите процесс газового азотирования.
12. Приведите схему прокатки.
13. Опишите маркировку твердых инструментальных сплавов.
14. Изложите сущность процесса ионно-плазменного азотирования, его достоинства и недостатки.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ И ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа

«Расчет и выбор режимов термической обработки чугуна и стали»

Общие сведения

Около 40 % стали, потребляемой машиностроением для изготовления деталей машин, приборов, оборудования, подвергают различным видам термической обработки. Под термической обработкой металлов и сплавов понимают совокупность операций теплового воздействия на металлы (иногда в сочетании с химическим, механическим и другими воздействиями) с целью изменения их структуры, а следовательно, и свойств.

Скорость нагрева выбирается в зависимости от ряда факторов: теплопроводности стали, формы и размеров деталей, общей массы нагреваемых деталей, характера их расположения в печи и некоторых других.

Продолжительность выдержки при заданной температуре нагрева определяется скоростью фазовых превращений, происходящих в металле. Выдержка необходима для завершения фазовых превращений и выравнивания температуры по объему детали.

Скорость охлаждения выбирается в зависимости от степени устойчивости переохлажденного аустенита, определяемой преимущественно химическим составом стали, а также от требуемых структуры и свойств сплава. В зависимости от скорости охлаждения углеродистой стали могут быть получены перлитная, сорбитная, троститная или мартенситная структуры с различными свойствами.

В соответствии с общепринятой классификацией термическая обработка делится на собственно термическую, химико-термическую и деформационно-термическую. Первая в свою очередь включает четыре основные группы: отжиг первого рода, отжиг второго рода, закалка, отпуск.

Отжиг первого рода способствует устранению отклонений в структуре сплавов от равновесного состояния, возникших при литье, деформировании, механической обработке, сварке и других технологических процессах. Различают следующие основные виды отжига первого рода: диффузионный, рекристаллизационный, низкий.

Диффузионный, или гомогенизирующий, отжиг применяется для устранения ликвации, т. е. неоднородности химического состава внутри отдельных зерен или в объеме сплава, возникающей чаще всего в процессе кристаллизации. Он состоит из нагрева стали до

температур, значительно превышающих критические (1050–1200 °С) и обеспечивающих диффузию неравномерно распределенных элементов, а также длительной выдержки (10–100 ч) и медленного охлаждения (с выключенной печью).

Для устранения различных отклонений в структуре сплавов от равновесного состояния, возникших в результате наклепа при пластической деформации, применяется **рекристаллизационный отжиг**. Он включает нагрев металла до температур, превышающих температуру рекристаллизации (для стали $T_{\text{рекр}} = 0,3–0,4 T_{\text{пл}}$), выдержку (1–2 ч).

Низкий отжиг применяется для устранения остаточных внутренних напряжений, возникающих, например, в зоне термического влияния при сварке изделий, вследствие неравномерного охлаждения отливок или срезания отдельных объемов металла при механической обработке и нарушения установившихся напряжений между отдельными частями детали. Он включает нагрев металла до температур 150–700 °С, выдержку и последующее медленное охлаждение.

Отжиг второго рода (фазовая перекристаллизация) – термическая обработка, включающая нагрев стали до определенных температур, выдержку и медленное охлаждение и имеющая целью обеспечение фазовых превращений и достижение практически равновесных (в соответствии с диаграммой состояния системы $Fe - Fe_3C$) фазового и структурного состояний. Поскольку такой отжиг обеспечивает минимальную твердость и наилучшую обрабатываемость стали резанием, как правило, он является подготовительной термической обработкой перед обработкой резанием. Однако в некоторых случаях (например, для крупных отливок) он может быть и окончательным видом обработки. Различают следующие основные виды отжига второго рода: полный, неполный, нормализационный, изотермический.

При **полном отжиге** сталь нагревают, выдерживают и медленно охлаждают до 500–600 °С вместе с печью, а затем на воздухе. Полный отжиг обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию.

При **неполном отжиге** после выдержки сталь медленно охлаждают с печью. При нагреве происходит частичная (неполная) перекристаллизация стали. Неполный отжиг обычно называют сфероидизацией. Он позволяет получать сталь со структурой зернистого перлита. Такая сталь имеет более низкую твердость, большую пластичность и лучшую обрабатываемость резанием, чем сталь с пластинчатым перлитом.

Нормализационный отжиг (нормализация) включает нагрев, изотермическую выдержку и охлаждение на спокойном воздухе. Ускоренное охлаждение при нормализации позволяет получить бо-

лее дисперсную (измельченную) структуру стали, что приводит к повышению ее твердости и прочности по сравнению со сталью, подвергнутой полному отжигу.

Изотермический отжиг включает нагрев стали выдержку, а затем перенос детали в другую печь с заданной температурой и изотермическую выдержку ее до полного распада аустенита. Изотермический отжиг улучшает обрабатываемость резанием и применяется для деталей и заготовок небольших размеров.

Закалка – термическая обработка, включающая нагрев стали выше критических температур, изотермическую выдержку и последующее охлаждение со скоростью выше критической.

По возрастанию интенсивности охлаждения применяемые в практике термической обработки охлаждающие среды можно расположить так: минеральные масла, вода, водные растворы солей, кислот, щелочей. Для закалки углеродистых сталей предпочтительны вода или водные растворы солей. Идеальный охладитель при закалке такой, который не допускает распада аустенита на перлитные структуры, что исключает появление значительных внутренних структурных и термических напряжений, коробления, трещин. Недостатки воды как охладителя: высокая скорость охлаждения в мартенситном интервале и резкое падение охлаждающей способности при ее нагреве. Минеральные масла лишены этих недостатков, но характеризуются в несколько раз меньшей охлаждающей способностью. Поэтому их целесообразнее применять для охлаждения легированных сталей, критическая скорость закалки которых меньше, чем углеродистых.

Отпуск – операция термической обработки, включающая нагрев закаленной стали, выдержку, охлаждение. Цель отпуска – уменьшение внутренних напряжений в металле и получение требуемых структуры и свойств.

Аудиторные задания

1 уровень

Изучить виды и назначение термообработки, механизм фазовых превращений в стали при термообработке и кратко записать в отчет его основные особенности.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1 и в соответствии с вариантом исходных данных (таблица 2.6) разработать структуру цикла термооб-

работки (последовательность выполнения операций) и записать по форме таблицы 2.7. При этом используются данные таблиц 2.8–2.17.

Время выполнения технологической операции при термообработке определяется при наличии данных по формуле:

$$\tau = \Delta T / \nu, \quad (2.24)$$

где ΔT – изменение рабочей температуры, °С,

ν – скорость нагрева (охлаждения), °С/ч

Таблица 2.6 – Исходные данные

Номер варианта	Марка металла	Твердость обработанной детали	Примечание
1	СЧ10	HB 308	Сечение детали 40 мм
2	ВЧ 40-10	HRC 32	Сечение детали 10 мм
3	ВЧ 45-5	HRC 36	Сечение детали 15 мм
4	СЧ 15	HRC 26	Сечение детали 70 мм
5	СЧ 18	HRC 32	Сечение детали 35 мм
6	СЧ 20	HRC 38	Сечение детали 100 мм
7	СЧ 25	HB 291	Сечение детали 30 мм
8	ВЧ 40-10	HRC 29	Сечение детали 150 мм
9	ВЧ 45-5	HRC 34	Сечение детали 200 мм
10	СЧ 30	HB 250	Сечение детали 50 мм
11	30	HRC 42	Сечение 10 мм, закалка-1, отпуск-1
12	40	HRC 48	Сечение 15 мм, закалка-1, отпуск-2
13	50	HRC 54	Сечение 20 мм, закалка-2, отпуск-2
14	60	HRC 58	Сечение 25 мм, закалка-2, отпуск-1
15	У7	HRC 62	Сечение 30 мм, закалка-1, отпуск-1
16	У8	HRC 63	Сечение 45 мм, закалка-1, отпуск-1
17	У9	HRC 61	Сечение 50 мм, закалка-1, отпуск-1
18	У10	HRC 54	Сечение 47 мм, закалка-1, отпуск-1
19	30	HRC 36	Сечение 35 мм, закалка-1, отпуск-1
20	40	HRC 40	Сечение 40 мм, закалка-1, отпуск-1
21	50	HRC 48	Сечение 18 мм, закалка-2, отпуск-2
22	60	HRC 52	Сечение 23 мм, закалка-2, отпуск-1
23	У11	HRC 48	Сечение 36 мм, закалка-1, отпуск-1
24	У12	HRC 56	Сечение 44 мм, закалка-1, отпуск-1
25	У13	HRC 58	Сечение 22 мм, закалка-1, отпуск-2

Примечание: 1 – в электропечи, 2 – в соляной ванне.

Таблица 2.7 – Режим термообработки (номер варианта __, материал __, твердость __)

Технологическая операция (в последовательности выполнения)	Температура металла, °С	Время выполнения, ч	Цель операции	Виды среды

Таблица 2.8 – Процессы термической обработки отливок из серого чугуна

Терм. обработка	Технологические параметры процесса				Назначение термической обработки
	Скорость нагрева в °С/ч	Температура нагрева в °С	Продолжительность выдержки в ч	Охлаждение	
Отжиг низкотемпературный, графитизирующий	50	680–750	3 (сечение до 50 мм) 6 (сечение 50–100 мм)	Со скоростью 30 °С/ч	Снижение твердости, улучшение обрабатываемости; повышение пластичности, ударной вязкости (прочность чугуна снижается)
Закалка	–	850–930	0,5–3	В масле	Повышение твердости, прочности, износостойкости
Изотермическая Закалка	–	830–900	0,2–1,5	В закалочной среде с температурой 250–450 °С	Повышение твердости, прочности, резкое увеличение износостойкости
Отпуск	–	В зависимости от требуемой твердости	1–3	На воздухе	Снятие закалочных напряжений, повышение вязкости, пластичности и предела выносливости

Таблица 2.9 – Виды термической обработки отливок из высокопрочного чугуна

Вид термической обработки	Режим обработки	Результаты применения термообработки
Снятие напряжений	Медленный нагрев до 500 °С, выдержка 2–3 ч, охлаждение с печью до 200 °С	Снятие внутренних напряжений на 80–90 %
Отжиг	Нагрев до 900 °С, выдержка 2 ч, охлаждение с печью до 740 °С 2–5 ч, дальнейшее охлаждение на воздухе	Улучшение обрабатываемости резанием, ухудшение износостойкости. Значительное повышение удлинения и ударной вязкости
Изотермическая закалка	Нагрев до 850–800 °С, выдержка 30–45 мин, передача в ванну, нагретую до 300–350 °С, выдержка в ванне 60 мин	Значительное повышение предела прочности, повышение износостойкости

Таблица 2.10 – Влияние времени отпуска после изотермической закалки на твердость деталей из высокопрочного чугуна

Режим изотермической закалки в °С	Температура отпуска в °С	Твердость HRC					
		Время отпуска в ч					
		0	8	16	24	32	40
820→350	150	29	32	32–34	34–35	36	32
820→350	300	32	33	34	35	32–33	–

Таблица 2.11 – Влияние обработки холодом после изотермической закалки на механические свойства серого чугуна

Температура обработки холодом в °С (после изотермической закалки 820→350 °С)	Твердость
Без обработки холодом –20 –40 –60	<i>HRC</i> :
	28
	30
	34
36	
Без термической обработки закалка с 850 °С и отпуск при: 500 °С 550 °С 600 °С	<i>HB</i> :
	247
	308
	291
250	
Изотермическая закалка (выдержка 1–2 ч) при 300 °С и отпуск при 200 °С 300 °С 400 °С 450 °С при 350 °С и отпуск при 200 °С 300 °С 400 °С 450 °С при 450 °С и отпуск при 200 °С 300 °С 400 °С 450 °С	<i>HRC</i>
	32
	38
	39
	34
	26
	26
	28
	34
	38
	37
	36
	34

Таблица 2.12 – Твердость углеродистых марок стали после отпуска

Марка стали	Режим закалки		Твердость <i>HRC</i> после закалки	Твердость <i>HRC</i> после отпуска при температуре в °С				
	Т °С	Охлаждающая среда		200	300	400	500	600
20	900–920	Вода	34–40	32–36	28–32	22–26	14–18	10–15
30	870–890		42–48	40–44	34–38	28–32	20–24	14–18
40	840–860		48–51	45–50	40–44	32–36	24–28	20–24
50	820–860		54–60	52–56	46–50	38–42	30–34	24–28
60	800–820		60–62	58–60	52–54	44–48	36–40	30–38
У7	790–810	Через воду в мас- ло	62–64	60–62	52–56	48–52	–	–
У8	780–800		63–65	61–63	52–56	48–58	–	–
У9	770–790		63–65	61–63	52–56	48–52	–	–
У10	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52	–	–
У11	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52	–	–
У12	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52	–	–
У13	770–790		62–64	61–63	54–58	48–52	–	–

Таблица 2.13 – Время выдержки изделий в электропечах при отпуске или низкотемпературном отжиге

Услов. толщина изделий в мм	Время выдержки в мин при температуре			Условная толщина изделий в мм	Время выдержки в мин при температуре		
	300 °С	300–400 °С	400 °С		300 °С	300–400 °С	400 °С
до 20	140	40	30	65	185	85	75
25	145	45	35	70	190	90	80
30	150	50	40	75	195	95	85
35	155	55	45	80	200	100	90
40	160	60	50	85	205	105	95
45	165	65	55	90	210	110	100
50	170	70	60	95	215	115	105
55	175	75	65	100	220	120	110
60	180	80	70				

Примечания – Время выдержки взято из расчета:
 1) при температуре отпуска <300 °С 2 ч + 1 мин на 1 мм условной толщины;
 2) при температуре отпуска > 400 °С 2 ч + 1 мин на 1 мм условной толщины.

Таблица 2.14 – Время выдержки изделий при отпуске в соляных (селитровых) ваннах

Условная толщина изделий в мм	Время выдержки в мин при температуре			Услов. толщина изделий в мм	Время выдержки в мин при температуре		
	300 °С	300–400 °С	400 °С		300 °С	300–400 °С	400 °С
1			3	25			13
3			4	30			15
5			5	35			17
7	12	15–25	6	40	120	15–25	19
10	0		7	45			21
15			9	50			23
20			11				

Примечания – Время выдержки взято из расчета:

1) при температуре отпуска < 300 °С 120мин;

2) при температуре отпуска > 480 °С 3мин + 0,4 мин на 1 мм условной толщины.

Таблица 2.15 – Время выдержки изделий в электропечах при температуре закалки

Условная толщина* изделия в мм	Время выдержки в мин	Условная толщина изделия в мм	Время выдержки в мин
20	20	65	65
25	25	70	70
30	30	75	75
35	35	80	80
40	40	85	85
45	45	90	90
50	50	95	95
55	55	100	100
60	60		

Таблица 2.16 – Время выдержки изделий в соляных ваннах при температуре закалки

Условная толщина изделия в мм	Время выдержки в мин	Условная толщина изделия в мм	Время выдержки в мин
5	4	30	13
7	5	35	14
10	6	40	16
15	8	45	18
20	9	50	21
25	11		

Таблица 2.17 – Нормы продолжительности цикла термообработки стальных и чугунных отливок

Материал	Термическая обработка	Толщина в мм	Пределы температуры нагрева печи в °С	Продолжительность термообработки без учета времени на загрузку отливок в ч
Низкоуглеродистые марки стали	Нормализация	До 100	890–920	12–18
		Св. 100	890–920	19–25
Высокоуглеродистые марки стали	Нормализация	До 100	860–880	10–15
		Св. 100	860–980	16–21
	Отпуск	До 100	580–650	2–16
		Св. 100	580–650	14–23

Режимы предварительной термообработки серого чугуна определяются по таблице 2.8, высокопрочного чугуна по таблице 2.9.

Режимы окончательной термообработки чугуна определяются по таблицам 2.10, 2.11 в зависимости от требуемой твердости.

Режимы предварительной термообработки стали определяются по таблице 2.17 (охлаждающая среда и среда нагрева – воздух), в зависимости от марки стали и толщины.

Режимы окончательной термообработки стали определяются по таблице 2.12 в зависимости от требуемой твердости. Время выдерж-

ки деталей при закалке определяется по таблицам 2.15, 2.16 исходя из применяемого оборудования и условной толщины изделия.

Условная толщина изделия определяется по формуле:

$$S_{\text{усл}} = SK_{\phi}, \quad (2.25)$$

где S – сечение детали, мм;

K_{ϕ} – коэффициент формы изделия (принять для конструкционных сталей $K_{\phi} = 1,5$, для инструментальных сталей $K_{\phi} = 2$).

Расчет условной толщины приводится в отчете. Время выдержки деталей при отпуске определяется по таблицам 2.13, 2.14.

Лабораторная работа «Сварка металлов»

Общие сведения

Сваркой называется процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и расплавлении или пластическом деформировании.

По физической сущности образования сварного соединения все виды сварки принято делить на три класса: термический, термомеханический, и механический. Отличительным признаком каждого класса является форма энергии, которая используется для образования соединений.

К термическому классу относятся виды сварки плавлением: дуговая, электрошлаковая, электроннолучевая, плазменная, лазерная, газовая, термитная, импульсно-дуговая. При сварке плавлением, для введения термической энергии, позволяющей расплавить кромки соединяемых частей, используют различные источники нагрева. При дуговой сварке источником нагрева является электрическая сварочная дуга. При газовой сварке источником нагрева является газовое пламя.

К термомеханическому классу относятся виды сварки, при которых образование соединений осуществляется за счет тепловой энергии и давления, необходимого для обеспечения заданной степени пластической деформации металла. Нагрев металла позволяет снизить давление, уменьшить относительную деформацию, необходимую для выполнения соединения. К термомеханическому классу относят следующие виды сварки: контактная, диффузионная, кузнечная, газопрессовая, сварка прокаткой, высокочастотная, печная.

К механическому классу относятся виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления. К этому классу относят: взрывом, холодную, ультразвуковую, магнитно-импульсную.

При существующем многообразии способов сварки, выбор способа определяется установленными техническими требованиями на изготовление изделия, его конструктивными особенностями, физико-механическими свойствами материала, его толщиной, и производительностью сварочного процесса.

При изготовлении стальных конструкций применяют главным образом дуговую сварку.

Для сварки применяют постоянный и переменный ток. При использовании постоянного тока минус источника питания подключается к электроду (прямая полярность) или к свариваемому изделию (обратная полярность). В дуге в области анода выделяется большее количество теплоты, чем в области катода, поэтому при сварке с прямой полярностью большую долю теплоты получают служащие анодом свариваемые детали, которые обычно массивнее электрода.

Обратную полярность применяют в тех случаях, когда нужно уменьшить выделение теплоты на свариваемом изделии. Обычно это имеет место при сварке тонкого или легкоплавкого материала, чувствительных к перегреву легированных, нержавеющей, высокоуглеродистых сталей, а также при использовании некоторых видов электродов. Под действием дуги металл расплавляется на некоторую глубину (h), называемую глубиной проплавления или проваром. При ручном способе сварки для возбуждения дуги необходимо концом электрода прикоснуться к металлу в том месте, где начинается сварка. Опуская электрод, касаются его концом свариваемого металла, а затем быстро отводят его на 2–4 мм в сторону. Для поддержания постоянной длины дуги необходимо постепенно опускать электрод по мере его расплавления.

Дугу необходимо поддерживать более короткой. При длинной дуге глубина проплавления свариваемого металла уменьшается и он сильно разбрызгивается. В результате получается неровный шов с большим количеством включений оксидов.

При короткой дуге около шва образуется лишь небольшое количество мелких капель металла, электрод плавится постепенно, давая равномерный пучок искр; глубина проплавления свариваемого металла получается больше. В случае обрыва дуги ее зажигают вновь, касаясь электродом металла немного впереди обрыва. После этого вновь возвращают электрод к месту обрыва дуги и продолжают

сварку. В процессе сварки электрод располагают либо вертикально относительно шва, либо наклоняют под углом вперед или назад. При сварке углом вперед или назад обеспечивается более полный провар и меньшая ширина шва.

В процессе дуговой сварки могут использоваться плавящиеся металлические электроды и неплавящиеся угольные или графитовые электроды. Сварка может вестись без подачи или с подачей защитного газа.

Если дуговая сварка протекает с использованием металлических плавящихся электродов, дуга расплавляет металл и сварной шов образуется смесью свариваемого металла и электрода.

При использовании неплавящихся электродов, дуга расплавляет свариваемый металл, образуя жидкую ванну, а необходимое сечение шва обеспечивается дополнительным плавлением в дуге металлического присадочного прутка.

Электроды для дуговой сварки представляют собой металлический стержень из электродной проволоки с нанесенным на него покрытием. Проволоку применяют холоднокатаную круглого сечения. Состав электродной проволоки должен соответствовать составу свариваемого металла и удовлетворять требованиям, которые предъявляются к данному соединению.

На электроды наносятся различные покрытия. Покрытия предназначены: для повышения устойчивости горения дуги; создания вокруг дуги защитной оболочки из газов и шлаков, предохраняющей жидкий металл от воздействия окружающего воздуха; образования защитного слоя шлаков, замедляющих остывание сварочной ванны; введения в расплавленный металл шва дополнительных легирующих элементов, улучшающих его механические свойства.

Дефекты в сварных швах приводят к уменьшению прочности и снижению эксплуатационной надежности сварных конструкций. Дефекты могут быть наружными и внутренними. Наружные дефекты можно выявить при внешнем осмотре и обмере сварных швов. Внутренние дефекты обнаруживаются только с помощью специальных приборов и методов.

К наружным дефектам относят несоответствие шва требуемым геометрическим размерам (отклонение по ширине и высоте шва), подрезы, наплывы, прожоги, трещины, остатки шлака, неравномерную чешуйчатость, незаплавленные кратеры, видимые непровары, деформацию конструкции.

К внутренним дефектам относят пористость металла, шлаковые включения, непровар, перегрев и пережог металла, внутренние трещины.

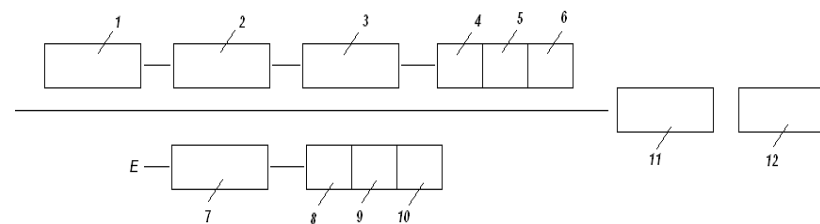


Рисунок 2.18 – Структура условного обозначения электродов:

1 – тип; 2 – марка; 3 – диаметр; 4 – обозначение назначения электродов; 5 – обозначение толщины покрытия; 6 – группа электродов; 7 – группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва по ГОСТ 9467–75, ГОСТ 10051–62 или ГОСТ 10052–75; 8 – обозначение вида покрытия; 9 – обозначение допустимых пространственных положений сварки или наплавки; 10 – обозначение рода и полярности тока; 11 – обозначение стандарта (ГОСТ 9466–75); 12 – обозначение стандарта на типы электродов

Структура условного обозначения электродов (рисунок 2.18) дает полную информацию об их технических характеристиках. Условное обозначение в соответствии со схемой на рисунке должно быть указано на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами. Во всех видах документации условное обозначение электродов должно состоять из марки, диаметра, группы электродов и ссылки на ГОСТ 9466–75:

– на этикетках:

$\frac{\text{Э46А – УОНИ – 13/45 – 4 – УД1}}{\text{Е432(5) – Б10}}$ ГОСТ 9466–75, ГОСТ 9467–75;

– в документации электроды УОНИ-13/45-4-1- ГОСТ 9466–75.

Обозначение на этикетках расшифровывается: электроды типа Э46А по ГОСТ 9467–75; марки УОНИ-13/45; диаметром 4 мм; для сварки углеродистых и низколегированных сталей (У); с толстым покрытием (Д); I группы; с группой индексов, установленной по ГОСТ 9467–75; с основным покрытием (Б); для сварки во всех пространственных положениях (1) на постоянном токе обратной полярности (0).

В условном обозначении электродов для сварки углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением разрыву до 60 кгс/мм² после буквы Е тире не ставят.

Согласно ГОСТ 9466–75 номинальный диаметр выпускаемых электродов составляет 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12, мм, а длина 150–450 мм в зависимости от диаметра и уровня легирования стержня.

По назначению электроды подразделяются:

- для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 60 кгс/мм² – условное обозначение У;
- для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм² – Л;
- для сварки легированных теплоустойчивых сталей – Т;
- для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами – В.

По толщине покрытия – в зависимости от отношения D/d (D – диаметр электрода с покрытием, d – диаметр стержня) электроды подразделяются:

- с тонким покрытием ($D/d \leq 1,20$) – М;
- со средним покрытием ($1,20 < D/d \leq 1,45$) – С;
- с толстым покрытием ($1,45 < D/d \leq 1,80$) – Д;
- с особо толстым покрытием ($D/d > 1,80$) – Г.

По показателям качества – в зависимости от требований к точности изготовления электродов, состояния поверхности покрытия, сплошности металла шва и содержания серы и фосфора в наплавленном металле электроды подразделяются на группы 1, 2 и 3.

По видам покрытия электроды подразделяются:

- с кислым покрытием – А;
- с основным покрытием – Б;
- с целлюлозным покрытием – Ц;
- с рутиловым покрытием – Р;
- с покрытием смешанного вида – соответствующее двойное условное обозначение, с прочими видами покрытий – П.

При наличии в составе покрытия железного порошка в количестве более 20 % к обозначению вида покрытия электродов следует добавлять букву Ж.

По допустимым пространственным положениям при сварке или наплавке электроды подразделяются:

- ✓ для всех положений – 1;
- ✓ для всех положений, кроме вертикального сверху вниз – 2;

- ✓ для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх – 3;
- ✓ для нижнего – 4.

По типам – для сварки углеродистых, низколегированных и легированных конструкционных сталей.

Группа индексов входит в структуру условного обозначения электродов и характеризует комплекс механических свойств наплавленного металла.

Таблица 2.18 – Подразделение электродов по роду и полярности тока

Рекомендуемая полярность постоянного тока	Напряжение холостого хода источника тока, В		Обозначения (род и полярность тока)
	номинальное	предельное отклонение	
Обратная	–	–	0
Любая Прямая Обратная	50	±5	1 2 3
Любая Прямая Обратная	70	±10	4 5 6
Любая Прямая Обратная	90	±5	7 8 9

Таблица 2.19 – Электроды сварочные

№	Наименование	Покрытие	Род, полярность тока	Применение
1	МР-3	Рутиловое	~, = (+)	Для сварки ответственных конструкций из углеродистой стали с массовой долей углерода до 0,25 %
2	МГМ-5-К	Рутиловое	~, = (+)	Универсальные электроды для сварки при монтаже, в мастерских и при ремонтных работах. Хорошая сварка в зазор. Хорошо подходят для прихваток. Подходят для оцинкованных, окрашенных и ржавых деталей.
3	УОНИ 13/55	Основное	= (+)	Для сварки ответственных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, когда к металлу сварных швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости
4	УОНИ 13/45 АР	Основное	= (+)	Для сварки особо ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, когда к металлу сварных швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости
5	АНО36	Рутил-целлюлозное	~, = (+)	Для сварки рядовых и ответственных конструкций из углеродистых марок сталей по ст0, ст1, ст2 и ст05, ст08, ст10, ст15, ст20 всех степеней раскисления
6	ЦУ-5	Основное	= (+)	Для сварки элементов поверхностей нагрева котлоагрегатов, а также корневых слоев швов стыков тонкостенных трубопроводов из углеродистой и низколегированных сталей, работающих при температурах до 400 °С

205

Продолжение таблицы 2.19

№	Наименование	Покрытие	Род, полярность тока	Применение
7	ОЗЛ-6	Основное	= (+)	Для сварки рядовых и ответственных конструкций из углеродистых марок сталей ст0, ст1, ст2 и ст05, ст08, ст10, ст15, ст20 всех степеней раскисления
8	ЭА 395/9	Основное	= (+)	Для сварки конструкций из перлитных сталей с аустенитными сталями типа 08X18H10T и 10X17H13M2T, а также для сварки между собой различных марок жаропрочных хромоникелевых сталей аустенитного класса без требования стойкости против межкристаллитной коррозии и работающих при температуре до 700 °С
9	ЦЛ-11	Основное	= (+)	Для сварки ответственных конструкций из коррозионно-стойких хромоникелевых сталей 12X18H10T, 12X18H9T, 08X18H12T, 08X18H12Б и им подобных, когда к металлу шва предъявляются требования по стойкости к межкристаллитной коррозии.
10	ОЗН-400М	Основное	~, = (+)	Для наплавки деталей из углеродистых и низколегированных сталей, работающих при условии трения и ударных нагрузок

206

Окончание таблицы 2.19

№	Наименование	Покрытие	Род, полярность тока	Применение
11	ЦЧ-4	Основное	~, = (+)	Для сварки без подогрева конструкций из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом и серого чугуна с пластинчатым графитом и их сочетаний со сталью. Также для сварки поврежденных деталей и заварки дефектов в отливках из высокопрочного и серого чугуна и предварительной наплавки первых одного-двух слоев на изношенные чугунные детали под последующую наплавку специальным электродом
12	Комсомолец-100	Специальное	= (+)	Для сварки и наплавки изделий из технической чистой меди марок М1, М2, М3 и ее сплавов. Возможна сварка меди со сталью
13	Т-590	Специальное	~, = (+)	Для наплавки быстроизнашивающихся стальных и чугунных деталей машин, работающих без ударной нагрузки в условиях абразивного износа

Электроды с основным покрытием. Основу покрытия составляют карбонаты кальция, магния и плавиковый шпат. Металл шва раскисляется кремнием, титаном, реже алюминием и очищен от серы и фосфора, а также газов; содержание кислорода не превышает 0,04 %, азота – 0,03 %. Из-за низкого содержания вредных примесей и газов металл шва обладает высокой пластичностью и вязкостью при заданных характеристиках прочности, а также не склонен к старению и образованию кристаллизационных трещин. Недостатком этих электродов является необходимость выполнения сварки короткой дугой и склонность к пористости при удлинении дуги или при сварке по плохо очищенной поверхности.

Электроды с рутиловым покрытием. Основу покрытия составляют двуокись титана, алюмосиликаты, природный рутил. Электроды характеризуются устойчивым горением дуги, незначительным разбрызгиванием, хорошим формированием шва и удовлетворительной отделимостью шлака. Также электроды характеризуются хорошими гигиеническими показателями, что позволяет использовать их при сварке в закрытых и плохо вентилируемых помещениях.

Электроды с целлюлозным покрытием. Особенность этих электродов состоит в возможности сварки способом сверху вниз, что обеспечивается высокой скоростью затвердевания металла шва.

Описание лабораторной установки и хода выполнения лабораторной работы

В качестве лабораторной установки для изучения процесса сварки металлов используется сварочный выпрямитель ВД-306 УЗ. Конструкция аппарата представлена на рисунке 2.19.

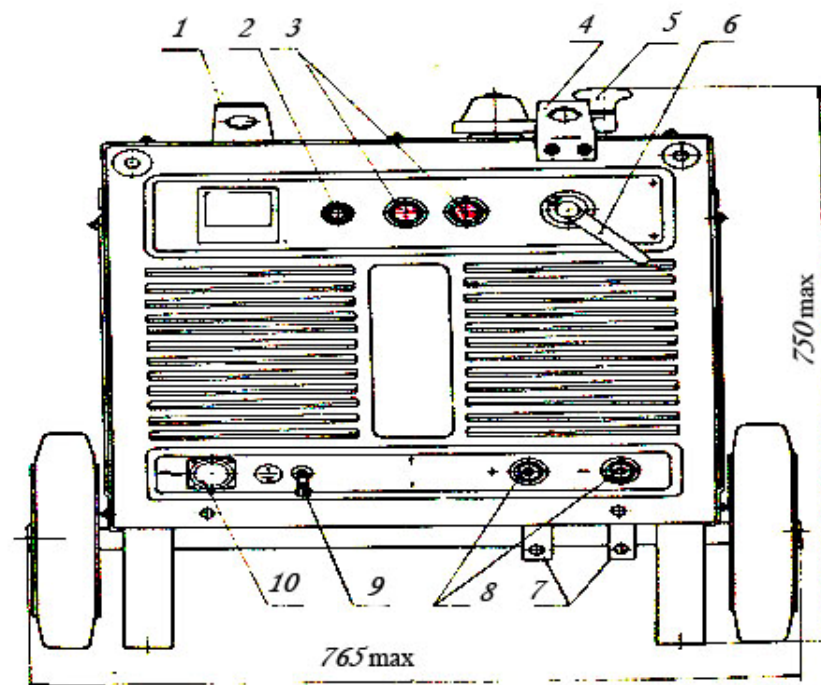


Рисунок 2.19 – Общий вид выпрямителя:

1 – амперметр; 2 – сигнальная лампа; 3 – кнопки ПУСК и СТОП; 4 – подъемные скобы; 5 – рукоятка регулирования сварочного тока; 6 – переключатель диапазонов сварочного тока; 7 – шины заземления; 8 – токовые разъемы сварочной цепи; 9 – болт заземления; 10 – штепсельный разъем для подключения сети

Ориентировочно величина сварочного тока выбирается по толщине стержней электродов. На 1 мм диаметра стержня электрода определяют ток 40–60 А. Определить величину сварочного тока для представленных образцов.

Под руководством мастера подготовить выпрямитель к работе.

Порядок подготовки следующий:

1) концы сварочных кабелей подключить к токовым разъемам сварочной цепи «+» и «-». При сварке на прямой полярности к зажиму «-» подключается кабель, соединенный с электрододержателем;

2) заземлить в зависимости от полярности сварки один из выходных зажимов выпрямителя путем подключения заземляющего провода к одной из шин, расположенных под выходными зажимами выпрямителя. При сварке на прямой полярности заземлить зажим «+»;

3) подключить выпрямитель к сети посредством штепсельного разъема, расположенного на передней решетке выпрямителя;

4) установить переключатель диапазонов сварочного тока в нужное положение. Ручка переключателя должна устанавливаться на лицевой панели до упора;

5) включить выпрямитель нажатием черной кнопки выключателя **ПУСК**; кнопку необходимо удерживать в нажатом состоянии до тех пор, пока не придет во вращение вентилятор;

6) убедиться, что вентилятор вращается в нужном направлении. Воздух должен засасываться со стороны лицевой панели;

7) регулирование тока производится вращением рукоятки, расположенной над крышкой выпрямителя;

8) при перерывах в работе выпрямитель должен быть отключен нажатием красной кнопки выключателя **СТОП**.

Техника безопасности при выполнении сварочных работ

1. При дуговой сварке необходимо принять меры предосторожности против поражения электрическим током, повреждения кожи лица и рук брызгами расплавленного металла, повреждения глаз и ожогов лица и рук лучами электрической дуги.

2. Корпус выпрямителя, один из выходных зажимов и сварочный стол необходимо надежно заземлить.

3. Запрещается работа выпрямителя без кожуха, со снятой крышкой и стенками.

4. При переключении диапазона регулирования тока выпрямитель необходимо выключить кнопкой **СТОП**.

5. Запрещается перемещать выпрямитель, не отключив его от сети.

6. Запрещается применять провода с поврежденной изоляцией.

Задания

1 уровень

Под руководством мастера наглядно ознакомиться с имеющимся сварочным оборудованием, с устройством выпрямителя с использованием рисунка 2.19 и аппарата в сварочном цеху. В соответствии с заданием преподавателя подобрать электроды для выполнения

сварки представленных образцов металлов. Диаметр сварочного электрода выбирается по толщине свариваемого материала и пространственному положению шва. Для металла толщиной 2 мм диаметр электрода должен составлять 2–3 мм. Сварку в вертикальном и потолочном положениях целесообразно вести электродами диаметром меньше 4 мм, так как в этом случае стекание металла из сварочной ванны значительно сокращается. Эскиз сварочного выпрямителя привести в отчете. Изучить представленные в лаборатории образцы сварных швов, выполненных при разных способах электропитания. Результаты представить в таблице 2.20.

Таблица 2.20 – Влияние источника тока на сварное соединение

Источник питания и способ подключения	Характеристика сварного соединения. Наличие дефектов
Переменное напряжение	
Постоянное напряжение (прямая полярность)	
Постоянное напряжение (обратная полярность)	

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Ознакомиться с электродами, представленными в лаборатории. На основании их маркировки с использованием таблицы 2.19 определить их область применения и характеристики. Результаты свести в таблицу 2.21.

Таблица 2.21 – Характеристики сварочных электродов

Наименование	Покрытие	Пространственное положение шва	Толщина покрытия	Область применения

Вопросы предварительного контроля

1. В чем заключается сущность процесса сварки?
2. Классификация процессов сварки.
3. Источники питания, используемые при электродуговой сварке.
4. Особенности процесса сварки при питании постоянным током.
5. Виды сварных швов и соединений.

Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1 уровень

1. Как делятся все виды сварки по физической сущности образования сварного соединения?
2. По каким критериям выбирают способ сварки?
3. Какой ток применяется для дуговой сварки?
4. Какие источники питания применяются для сварки переменным и постоянным током?
5. Что собой представляют электроды для дуговой сварки?

2 уровень

1. Чем характеризуется режим сварки?
2. Когда при дуговой сварке применяется обратная полярность?
3. Назовите наружные дефекты, возникающие при дуговой сварке.
4. Каковы причины возникновения дефектов при дуговой сварке?
5. Для чего на электроды наносятся различные покрытия?

3 уровень

1. Приведите структуру обозначений электросварочного оборудования.
2. Расшифруйте маркировку электродов, представленных в лаборатории.
3. Изложите правила техники безопасности при дуговой сварке.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

1 уровень

Привести описание процесса и установок для электроискровой обработки металлов. Оформить в виде реферата.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1 и дополнить реферат сведениями по электрохимической обработке металлов.

3 уровень

Выполнить задание уровня 2. Провести сопоставление различных видов электрической и традиционной обработки металлов и дополнить реферат полученными результатами.

ПРИМЕРЫ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ МОДУЛЯ

1 уровень

1. Назовите специальные виды литья.
2. Какие виды контактной сварки существуют?
3. Особенности прокатки алюминиевых сплавов.
4. Как определяется износостойкость материалов резов?
5. В чем сущность закалки стали?
6. В чем сущность цианирования?

2 уровень

1. Опишите процесс электрошлаковой сварки.
2. В чем сущность кислородной резки металлов?
3. В чем отличие прокатки отковки?
4. Привести график износа режущего инструмента во времени.
5. Опишите процесс поверхностной закалки стали.

3 уровень

1. Опишите перспективные способы термообработки чугуна и стали.
2. Укажите основные направления совершенствования технологии прокатки цветных металлов.
3. Опишите технологию сварки меди и ее сплавов.

МОДУЛЬ 3 НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ОБРАБОТКА

В результате изучения студент должен

знать:

- понятия: связующие вещества, наполнители, пластификаторы, отвердители, бетон, железобетон, металлокерамика, минералокерамика, вспомогательные конструкционные материалы;
- основные виды неметаллических конструкционных материалов, процесс производства огнеупорных материалов, изготовление конструкций из бетона и железобетона, классификацию пластмасс, способы обработки неметаллических конструкционных материалов;
- область применения неметаллических конструкционных материалов в зависимости от их свойств;

уметь:

- выбирать необходимые неметаллические конструкционные материалы;
- объяснять причину выбора материала;
- определять вид и марку неметаллических конструкционных материалов, работать в малой группе.

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ МОДУЛЯ

Словарь основных понятий

Связующие вещества – это природные или синтетические полимеры. Под полимерами понимают высокомолекулярные вещества, молекулы которых (макромолекулы) состоят из многочисленных элементарных звеньев (мономеров).

Наполнители – повышают механическую прочность пластмасс, уменьшают их усадку при формовании изделий, влияют на вязкость, водостойкость пластмасс, придают им специальные свойства (фрикционные, антифрикционные и др.).

Пластификаторы – способствуют повышению пластичности пластмасс или расширению температурного интервала их вязкотекучего состояния. В качестве пластификаторов широко используют органические вещества с высокой температурой кипения и низкой

температурой замерзания (стеарин, дибутилфталат, олеиновую кислоту и др.).

Отвердители – (различные амины), или **катализаторы** (перекисные соединения), их вводят в терморезактивные пластмассы для ускорения процессов отверждения пластмасс.

Бетон – это материал, состоящий из большого количества зерен заполнителя, связанных с затвердевшим вяжущим веществом.

Железобетон – это бетон, армированный стальными стержнями, сетками или каркасами.

Вспомогательные конструкционные материалы – это материалы, используемые для улучшения эксплуатационных свойств основных конструкционных материалов.

ОСНОВНОЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Лекция Основные виды неметаллических конструкционных материалов и способы их обработки

1. Бетон и железобетон.
2. Огнеупорные материалы.
3. Пластмассы.
4. Способы обработки неметаллических конструкционных материалов.

Бетон и железобетон

Сырьем для производства бетона является портландцементный клинкер, который получают путем обжига до спекания сырьевой смеси с преобладанием силикатов кальция. В качестве сырья применяют горные породы, состоящие в основном из карбоната кальция и алюмосиликатов. В первую очередь используют широко распространенные в природе известняки различного вида (мел, плотный известняк) и глины. Сырьевую смесь получают путем тонкого измельчения и смешивания известняка и глины, которые должны быть тщательно дозированы. В нее вводят корректирующие добавки, регулирующие химический состав и температуру спекания сырьевой смеси, а также фазовый состав и структуру клинкера (колчеданные огарки, железная руда, плавиковый шпат и др.). Сырьевую смесь обжигают обычно во вращающихся печах, при этом температура в зоне спекания, достигающая 1450 °С, обеспечивает частичное плавление сырья, т. е. появление жидкой фазы, необходимой для образования главного и наиболее ценного минерала клинкера – трехкальциевого силиката.

Цементный клинкер состоит из искусственных минералов. Свойства портландцемента зависят главным образом от четырех минералов: трехкальциевого силиката (алита), двухкальциевого силиката (белита), трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита. Два последних минерала образуют твердый раствор, называемый целитом.

Быстротвердеющий портландцемент (БТЦ) получают путем совместного тонкого помола специального клинкера и гипса. Допускается введение при помоле клинкера 10 % активных минеральных добавок и до 15 % доменных гранулированных шлаков.

Клинкер отличается повышенным содержанием активных минералов. Количество трехкальциевого силиката и трехкальциевого алюмината обычно не менее 60–65 %, а содержание свободной окиси кальция должно быть минимальным (не выше 0,5 %). Количество окиси магния ограничивается той же величиной, что и в обычном портландцементе (до 5 % по весу). БТЦ измельчают до удельной поверхности 3500–4000 см²/г (вместо 2500–3000 см²/г для обычного портландцемента). Ввиду этого ускоряется твердение цемента в первое время (1–3 суток).

БТЦ применяют при массовом производстве сборных железобетонных конструкций, а также при зимних бетонных работах. Следует иметь в виду повышенное тепловыделение БТЦ, которое исключает его использование для массивных конструкций. Кроме того, БТЦ с повышенным содержанием трехкальциевого алюмината не пригоден для бетона, подвергающегося сульфаталюминатной коррозии.

Особо быстротвердеющий портландцемент (ОБТЦ) отличается не только весьма интенсивным нарастанием прочности, но и высокой маркой (600–700). Производство ОБТЦ налажено на заводах, имеющих хорошее сырье с небольшим содержанием окиси магния, сернистых и щелочных соединений. Требуется высокая культура производства, выполнение ряда технологических требований: тонкий помол и высокая однородность сырьевой смеси, сильный и равномерный обжиг клинкера, быстрое охлаждение клинкера и др. Важное значение имеет тонкость помола и гранулометрический состав ОБТЦ: содержание зерен цемента менее 30 мкм обычно составляет 50–80 %. Выпуск ОБТЦ экономически оправдывает себя, если он используется по прямому назначению – для получения высокопрочных и быстротвердеющих бетонов.

Сульфатостойкий портландцемент предназначен не только для изготовления бетонов, подвергающихся действию сульфатной коррозии, но и для бетонов повышенной морозостойкости. Поэтому его

можно было бы назвать и «морозостойким» портландцементом. Сульфатостойкость и морозостойкость обеспечиваются прежде всего пониженным содержанием трехкальциевого алюмината в клинкере (не более 5 %). Таким образом, сульфатостойкий портландцемент получают путем помола малоалюминатного клинкера с умеренным содержанием алита. При помоле, кроме гипса, никаких других минеральных добавок не требуется. Однако возможно введение пластифицирующих или гидрофобизирующих веществ. Предусматривается выпуск сульфатостойкого портландцемента марок 300 и 400.

Портландцемент с умеренной экзотермией сочетает пониженное тепловыделение с достаточно высокой морозостойкостью, что позволяет использовать его для наружных зон массивных (в том числе гидротехнических) сооружений. Поэтому снижение экзотермии достигается путем уменьшения содержания в клинкере активных минералов, а не за счет введения в цемент минеральных добавок, которые могут понизить морозостойкость. Низкотермичный цемент выпускают двух марок: 300 и 400.

Портландцемент с органическими добавками (пластифицированный и гидрофобный). Пластифицированный портландцемент изготавливают путем введения при помоле клинкера около 0,25 % сульфитно-спиртовой барды (считая на сухое вещество). Он отличается от обычного портландцемента способностью придавать растворным и бетонным смесям повышенную подвижность. Пластифицирующий эффект используется для уменьшения водоцементного отношения и повышения плотности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона.

Высокопрочным принято называть бетон, у которого предел прочности при сжатии не ниже 500 кгс/см². Бетоны марок 500 и 600 выгодно применять в конструкциях с предварительно напряженной арматурой: в балках, фермах, арках, колоннах и т. п. Применение высокопрочных бетонов взамен бетона марки 400 дает возможность уменьшить расход арматурной стали на 10–20 % и сократить объем бетона в конструкции на 10–30 %. По мере увеличения выпуска предварительно напряженных конструкций будет возрастать потребность в высокопрочных бетонах. При использовании материалов надлежащего качества и современных технологических приемов можно изготавливать бетоны с прочностью при сжатии до 800–1000 кгс/см².

Высокопрочные бетоны, как правило, являются быстротвердеющими. Однако для достижения отпускной прочности изделий (70 %-

ной марочной прочности) обычно требуется тепловая обработка, которая может проводиться по сокращенному режиму.

Для получения высокопрочных бетонов необходимо использовать комплекс мероприятий: правильно выбирать цемент и заполнители, технически грамотно назначать состав бетона, применять эффективные средства приготовления и уплотнения бетонной смеси, а также создавать оптимальные условия твердения. Иногда ошибочно полагают, что высокую прочность бетона можно обеспечить только назначением высокого расхода цемента, забывая, что перерасход цемента увеличивает усадку и понижает трещиностойкость бетона, удорожает бетон. Кроме того, даже высокий расход цемента не может обеспечить стабильные высокие показатели прочности при колеблющемся качестве заполнителей, при нарушении технологии и низкой культуре производства.

Жаростойкие бетоны подразделяют по огнеупорности на следующие группы: высокоогнеупорные с огнеупорностью выше 1770 °С; огнеупорные (1580–1770 °С); жароупорные с огнеупорностью ниже 1580 °С. Жаростойкие бетоны состоят из связующего и заполнителя, поэтому их огнеупорность будет зависеть от способности связующего противостоять высоким температурам, от огнеупорности заполнителя и от совместимости температурных деформаций связующего и заполнителя.

Связующее представляет собой гидравлическое или воздушное вяжущее вещество, содержащее, как правило, тонкомолотую добавку. Мелкий и крупный заполнители готовят дроблением тугоплавких и огнеупорных природных и искусственных материалов. Объемный вес жаростойкого бетона зависит от веса заполнителя.

Применяются тяжелые и легкие жаростойкие бетоны.

Электротехнические бетоны наряду с необходимыми конструктивными характеристиками обладают заданными электрическими свойствами. Обычный же цементный бетон отличается нестабильными электрическими свойствами. Влажный бетон проводит электрический ток, однако, в связи с ионным характером проводимости через жидкую фазу величина удельного объемного электрического сопротивления бетона возрастает при высушивании с 10^3 до 10^{11} Ом·см. Электротехнические бетоны подразделяются по назначению на изоляционные и проводящие.

Наибольшим электрическим сопротивлением обладает цементный камень автоклавного твердения, полученный на основе песчаного портландцемента. Поэтому для изоляционного бетона рекомендуется применять смешанное вяжущее, получаемое путем со-

вместного помола портландцемента и кварцевого песка, взятых в соотношении 1:1. В качестве заполнителя лучше применять кварцевый песок с размером зерен до 1 мм. Не исключается использование крупного заполнителя, однако, в этом случае надо считаться с возможностью появления микродефектов структуры бетона в процессе автоклавной обработки и последующей сушки. Микротрещины и крупные поры снижают электрическую прочность, поэтому стремятся получить бетон с плотной мелкозернистой структурой. Минимуму пористости бетона соответствуют максимальные значения механической и электрической прочностей, а также наибольшая величина удельного электрического сопротивления.

Технологический процесс изготовления изделий из электроизоляционного бетона включает следующие этапы: формование, автоклавную обработку, сушку при температуре 200–250 °С и пропитку гидрофобизирующим составом. Сушка значительно повышает и стабилизирует диэлектрические свойства бетона, а водоотталкивающие составы предотвращают его увлажнение. Пропитку чаще всего осуществляют путем погружения высушенного изделия в ванну с нагретым петролатумом.

Электроизоляционные бетоны – дешевые материалы, с успехом применяемые для изготовления токоограничивающих бетонных реакторов, траверс безизоляторных линий электропередач и других конструкций.

Бетон электропроводный (сокращенное название «бетэл») обладает стабильной электропроводностью и достаточно высокой механической прочностью. Поэтому его используют как конструктивный электропроводящий материал.

Электропроводный бетон изготавливают на основе портландцемента, содержащего добавку электропроводящего наполнителя – технического углерода. Проводящим наполнителем может служить тонкоизмельченный кокс (удельная поверхность 3000–6000 см²/г) или некоторые разновидности специальных саж, представляющие собой высокодисперсные порошки углерода. Портландцемент и углеродистый наполнитель должны быть тщательно перемешаны, а дозировка наполнителя соответствовать оптимальной объемной концентрации частиц углерода в системе «цемент – наполнитель» (в пределах 0,34–0,51). Минимальная добавка обеспечивает образование цепочек из частиц углерода, выполняющих роль токопроводящей фазы. Избыток наполнителя сверх указанного предела сильно снижает прочность бетона. Таким образом, изменение объемной концентрации углеродистого наполнителя в указанных пределах

позволяет регулировать электрические свойства и механическую прочность электропроводного бетона. Проводящие бетоны могут характеризоваться стабильным удельным объемным сопротивлением от 10 до 10^6 Ом·см.

Электропроводный бетон применяют для изготовления активных сопротивлений большой мощности.

Наиболее целесообразно применять **железобетон** для строительных элементов, подверженных изгибу. При работе таких элементов возникают напряжения двух видов – растягивающие и сжимающие. При этом сталь воспринимает первые напряжения, а бетон вторые, и железобетонный элемент в целом успешно противостоит изгибающим нагрузкам. Таким образом сочетается работа бетона и стали в одном материале – железобетоне.

По виду армирования железобетонные изделия делят на *предварительно напряженные* и с *обычным армированием*.

По плотности изделия бывают: из *особо тяжелых* бетонов с плотностью более 2500 кг/м³ из *тяжелых* бетонов – 2200 – 2500 кг/м³; из *облегченного* бетона – 1800 – 2200 кг/м³; из *легких* бетонов – 500 – 1800 кг/м³; из *особо легких* (теплоизоляционных) бетонов – менее 500 кг/м³.

По виду бетонов и применяемых в бетоне *вяжущих* различают изделия: из *цементных* бетонов – тяжелых на обычных плотных заполнителях, особо тяжелых бетонов и легких бетонов на пористых заполнителях; *силикатных* бетонов автоклавного твердения – плотных (тяжелых) или легких на пористых заполнителях на основе извести или смешанном вяжущем; *ячеистых* бетонов – на цементе, извести или смешанном вяжущем; *специальных* бетонов – жаростойких, химически стойких, декоративных, гидратных.

По внутреннему строению изделия могут быть *сплошными* и *пустотелыми*, изготовленными из бетона одного вида – *однослойные* или *двухслойные* и *многослойные*, изготовленные из разных видов бетона или с применением *различных материалов*, например теплоизоляционных.

Железобетонные изделия одного вида могут отличаться также **типоразмерами**, например стеновой блок угловой, подоконный и т. д. Изделия одного типоразмера могут подразделяться также по **маркам**. В основу деления на марки положено различное армирование, наличие монтажных отверстий или различие в закладных деталях.

В зависимости от **назначения** сборные железобетонные изделия делят на основные группы: *для жилых, общественных, промышленных зданий, для сооружений сельскохозяйственного назначения*.

Железобетонные конструкции из обычного портландцемента не выдерживают действия высоких температур. Обычный железобетон, подвергающийся попеременному нагреванию и охлаждению (в дымовых трубах, бункерах, эстакадах и т. п.), допускается нагревать до 200 °С, а бетон, работающий в стационарных условиях нагрева (фундаменты тепловых агрегатов), – до 250 – 350 °С. При более высоких температурах происходит нарушение структуры бетона и снижение его несущей способности.

Огнеупорные материалы

Огнеупорные изделия классифицируют в зависимости от огнеупорности, пористости, химико-минералогического состава, способа изготовления.

Огнеупорность материала характеризуется его способностью выдерживать длительное действие высоких температур (выше 1580 °С), не расплавляясь и не деформируясь под нагрузкой. Классификация огнеупорных материалов по этому признаку приведена в таблице 2.22.

Таблица 2.22

Изделия	Огнеупорность, в °С
Огнеупорные	От 1580 до 1770
Высокоогнеупорные	От 1770 до 2000
Высшей огнеупорности	Свыше 2000

Температуру размягчения можно определить электрическими и оптическими пирометрами во время деформации образцов исследуемого материала.

По способу формования различают огнеупорные изделия:

- 1) *пластичноформованные*, изготавливаемые из пластичных масс влажностью 15 – 20 % путем механического формования или прессования с последующей сушкой сырца;
- 2) *сухоформованные армированные* или *неармированные*, получаемые из полусухих или сухих порошкообразных малопластичных или непластичных масс влажностью менее 10 % (в том числе из бетонов, плавящихся материалов) методами механического, гидравлического прессования, вибропрессования, трамбования и др.;

- 3) шликернолитые, изготавливаемые литьем из жидкого шликера (однородной текучей массы, состоящей из тонкомолотого исходного сырья и большого количества воды), пеношликера, газошликера, термопластичного шликера и т. п.;
- 4) термопластичнопрессованные, получаемые методом прессования масс, содержащих термопластичные добавки (парафин, воск и др.);
- 5) горячепрессованные, изготавливаемые горячим прессованием из нагретых до термопластичного состояния огнеупорных масс;
- 6) плавенолитые, получаемые путем электроплавки (или другим способом) с последующей отливкой из расплава;
- 7) пиленые из естественных горных пород или плавяных блоков, изготавливаемые методом механической обработки (резанием и т. п.).

В зависимости от термической обработки огнеупорные изделия делятся на следующие группы:

- 1) обожженные;
- 2) безобжиговые (включая армированные), подвергаемые сушке, а в ряде случаев нагреву до 250–400 °С;
- 3) горячепрессованные, отжигаемые после прессования;
- 4) плавенолитые, отжигаемые после отливки.

В электрическом и энергетическом оборудовании применяются следующие теплоизоляционные материалы и изделия:

- а) **керамические** – пенодиатомовые, пеноперлитокерамические, перлитокерамические и другие изделия;
- б) **минераловатные и стекловатные** – минеральное и базальтовое волокно в качестве заполнителя матрацев, футляров проволочных каркасов и прошивных матов, кремнеземистое стекловолокно и маты;
- в) **безобжиговые** – вулканитовые, известковокремнеземистые, асбестовермикулитовые, перлитовые на цементной связке, минераловатные, совелитовые и другие изделия;
- г) **порошковые** – перлитовый песок обожженный, вермикулит обожженный, совелитовый порошок, асбозурит и прочие;
- д) **ткани** – асбестовая АТ-6, стеклянная КТ-11 (каолиновая), асбестоцементная АСТ-1 и пр.

Пластмассы

Пластмассы обладают целым рядом весьма важных свойств: легкость обработки (литье, прессование), малая плотность; к тому же изделия из пластмасс практически не нуждаются в дополнительной механической обработке, защите от воздействия окружающей среды, а также в декоративном покрытии. Существенно также то, что деталям из пластмасс присущи электроизоляционные свойства.

Наиболее широко применяются литьевые пластмассы (капроновая смола марки Б), позволяющие получать детали сложной конфигурации. Детали, подвергающиеся значительным механическим нагрузкам, изготавливают из пластмасс, перерабатываемых методом прессования (АГ-4, АГ-4В), обладающих к тому же высокой электрической прочностью, водостойкостью, большим поверхностным электрическим сопротивлением.

В основу классификации пластмасс положены их физико-механические свойства, структура и отношение к нагреванию. По физико-механическим свойствам все пластмассы разделяют на пластики и эластики.

Пластики бывают жесткие, полужесткие и мягкие. **Жесткие** пластики – твердые упругие материалы, аморфной структуры с высоким модулем упругости (свыше 1000 МПа) и малым удлинением при разрыве, сохраняющие свою форму при внешних напряжениях в условиях нормальной или повышенной температуры. **Полужесткие** пластики – твердые упругие материалы кристаллической структуры со средним модулем упругости (выше 400 МПа), высоким относительным и остаточным удлинением при разрыве, причем остаточное удлинение обратимо и полностью исчезает при температуре плавления кристаллов. **Мягкие** пластики – мягкие и эластичные материалы с низким модулем упругости (не выше 20 МПа), высоким относительным удлинением и малым остаточным удлинением, причем обратимая деформация исчезает при нормальной температуре с замедленной скоростью.

Эластики – мягкие и эластичные материалы с низким модулем упругости (ниже 20 МПа), поддающиеся значительным деформациям при растяжении, причем вся деформация или большая ее часть исчезает при нормальной температуре с большой скоростью (практически мгновенно).

По строению полимерной цепи различают пластмассы **карбоцепные** (цепь состоит только из атомов углерода) и **гетероцепные** (в состав цепи, кроме углерода, входят кислород, азот и другие элементы).

По структуре пластмассы делят на **гомогенные** (однородные) и **гетерогенные** (неоднородные). Структура пластмасс зависит от введения в нее наряду с полимером других компонентов. Последнее позволяет делить пластмассы на ненаполненные, газонаполненные, наполненные и составные. **Ненаполненные** пластмассы состоят из полимера, иногда из красителя, пластификатора и стабилизатора. **В газонаполненные**, кроме указанных материалов, входят также

воздух или другой газ путем использования добавок газообразующих или воздухововлекающих веществ. В большинстве случаев для изготовления пластмассовых строительных материалов и изделий используют **наполненные** пластмассы, состоящие из полимера и наполнителя.

Наполнители бывают порошкообразные, волокнистые и слоистые. **Порошкообразные** наполнители – кварцевая мука, мел, тальк и органические (древесная мука) – придают пластмассам ценные свойства (теплостойкость, кислотостойкость и т. д.), а также повышают твердость, увеличивают долговечность, снижая стоимость. **Волокнистые** наполнители – асбестовое, древесное и стеклянное волокно – широко используют в производстве пластмасс; они повышают прочность и снижают хрупкость, повышают теплостойкость и ударную вязкость пластмасс. **Слоистые** наполнители – бумага, хлопчатобумажная и стеклянная ткани, асбестовый картон, древесный шпон и другие – придают высокую прочность пластмассам. Например, асбестовый картон придает пластмассе не только высокую прочность, но и теплостойкость и кислотостойкость. Наполнители намного дешевле полимеров. Поэтому чем больше введено наполнителя, тем дешевле изделие из пластических масс.

Наряду с наполнителями в пластмассы вводят пластификаторы, красители, смазки, катализаторы и другие вещества. Для изготовления пористых пластических масс используют порообразователи.

Пластификаторы применяют для придания пластмассе большей пластичности при нормальной температуре, они облегчают переработку, снижая температуру перехода полимера в вязкотекучее состояние (например, глицерин, диакрилфталат). Количество пластификатора в пластмассе может достигать 30–50 % от массы полимера. Они должны быть химически инертными, малолетучими и нетоксичными веществами.

В производстве полимеров и пластмасс применяют **стабилизаторы** и **отвердители**; первые способствуют сохранению свойств пластмасс во времени, а вторые сокращают время отверждения пластмасс, что важно в технологии производства изделий.

Красители применяют для придания пластмассам определенного цвета. Они должны быть стойкими во времени, не должны выцветать под действием света и т. д. В качестве красителей используют как органические (нигрозин, пигмент желтый и др.), так и минеральные пигменты (охра, сурик, белила, окись хрома, ультрамарин и др.).

Катализаторы вводят для сокращения времени отверждения пластмасс, например для фенолоформальдегидного полимера ускорителем являются известь и уротропин.

Смазывающие материалы применяют для предотвращения прилипания пластмасс к формам, в которых изготавливают изделия. В качестве смазки используют стеарин, олеиновую кислоту и др.

По отношению к нагреванию пластмассы делят на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные материалы (полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол и др.) при нагревании размягчаются и приобретают пластичность, а при охлаждении отвердевают. Из этих материалов можно отливать, вытягивать и штамповать различные изделия. Недостатком этих пластмасс являются незначительная прочность и теплостойкость.

Термореактивные материалы (реактопласты) при нагревании переходят в неплавкое, нерастворимое твердое состояние и безвозвратно утрачивают свойства плавиться. Эти материалы обладают повышенной теплостойкостью. К ним относятся аминопласты и пластмассы на основе полиэфирных и эпоксидных смол.

Способы обработки неметаллических конструкционных материалов

При сверлении пластмасс, чтобы не возникали трещины при креплении деталей, зажимные элементы оклеивают мягкими прокладками (фланелью, резиной). Размер отверстия после сверления обычно уменьшается на 0,05 мм.

Термопластичные пластмассы сверлят острозаточенными инструментами. Необходимо избегать разогрева сверла, так как при повышенной температуре материал размягчается.

Термореактивные пластмассы имеют высокую твердость и термостойкость. Их сверлят сверлами из быстрорежущих сталей, а при наличии в материалах асбестовых или стекловолокнистых наполнителей – сверлами с твердосплавными пластинами.

Особенностью гибки пластмассовых труб является то, что их перед изгибанием следует нагревать до определенной температуры. Пластмассовые трубы нагревают в жидкости (глицерине или глицерогеле) или в воздухе, а изгибают на гибочном приспособлении. Нагретую трубу после изгибания на требуемый угол погружают в воду и охлаждают. При изгибании полиэтиленовых труб следует учитывать упругие свойства материала и его способность после изгибания частично принимать первоначальную форму, поэтому их следует

изгибать на 20–25° больше требуемого угла. Во избежание смятия стенок трубы при изгибании в нее закладывают спиральную пружину или металлорукав диаметром на 1–2 мм меньше внутреннего диаметра трубы.

Сварка пластмасс обеспечивает экономию материала, снижение трудоемкости, большую прочность соединения. Наиболее приемлемыми являются методы сварки нагретым инструментом и нагретым газом, а также токами высокой частоты.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите легкокипящие жидкости применяемые в газонаполненных пластмассах.
2. Назовите материалы, применяемые для создания каркаса теплоизоляционных изделий.
3. Что собой представляет вермикулит и где он применяется?
4. Какие материалы называются огнеупорными?
5. Из чего изготавливаются минераловатные плиты?
6. Что называют пироскопом и для чего его применяют?
7. Как различают огнеупорные изделия по способу формования?
8. Какими свойствами обладают легковесные огнеупоры?
9. Как подразделяются акустические материалы в зависимости от назначения?
10. Какие связующие материалы используют в волокнистых материалах?
11. Какие связующие материалы используют в волокнистых материалах?
12. Назовите перспективные виды неметаллических конструкционных материалов и их область применения.
13. Перечислите основные пути совершенствования бетонов.
14. Назовите требования предъявляемые к звукопоглощающим материалам.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ И ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа

«Выбор способов обработки изделий из неметаллических конструкционных материалов»

Аудиторные задания

1 уровень

Изучить образцы неметаллических конструкционных материалов, представленных в лаборатории, определить наименование материала и перечислить его основные свойства. Результаты представить в отчете.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1 и дополнительно перечислить технологические операции, выполняемые для изготовления изделий из представленных материалов.

Лабораторная работа

«Физико-механические свойства пластических масс»

Общие сведения

Пластические массы (пластики, пластмассы) – важные конструкционные материалы, широко применяемые в машиностроении, электро- и радиотехнике, строительстве и других отраслях народного хозяйства.

Незначительная трудоемкость изготовления пластмассовых деталей (по сравнению с металлическими), их малая себестоимость, технологичность (легко формуются, склеиваются, свариваются, обрабатываются резанием), специфические физико-механические свойства обуславливают эффективность применения и зачастую незаменимость пластмасс в машиностроении.

Основными достоинствами пластмасс являются: малая плотность и возможность ее изменения, хорошие тепло-, электро- и звукоизоляционные характеристики, высокая химическая стойкость в ряде сред и неподверженность коррозии, высокие оптические свойства (бесцветность и прозрачность органических стекол), хорошие фрикционные и антифрикционные свойства, достаточно высокая прочность (прочность некоторых пластиков сопоставима с прочностью стали), хорошие декоративные свойства, бесшумность в рабо-

те (применительно к зубчатым передачам) и некоторые другие. Недостатки пластмасс – невысокая теплостойкость, низкие ударная вязкость и модуль упругости, склонность некоторых пластмасс к старению.

Пластмассы – это материалы на основе природных, а чаще всего искусственных (синтетических) полимеров, которые под воздействием нагревания и давления способны формоваться в изделия заданной формы и затем устойчиво сохранять ее. Кроме основного компонента – связующего вещества, в состав пластмасс могут входить наполнители, пластификаторы, отвердители, красители, стабилизаторы, порообразователи, ингибиторы и некоторые другие добавки. Соотношение названных компонентов в пластмассах может быть, например, таким (массовая доля): связующее вещество – 30–60 %, наполнители – 40–65 %, пластификаторы – около 1 %, красители – 1–1,5 %, смазывающие вещества – 1–2 %.

Связующие вещества, от которых в наибольшей степени зависят свойства пластмасс – это природные или синтетические полимеры. Под полимерами понимают высокомолекулярные вещества, молекулы которых (макромолекулы) состоят из многочисленных элементарных звеньев (мономеров). Природные полимеры – белки и нуклеиновые кислоты, из которых построены клетки живых организмов, природные смолы (янтарь, копал, шеллак), натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, природный графит и др. Синтетические полимеры – это полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиамиды, поликарбонаты, фенолоформальдегидные и эпоксидные смолы и др. В отдельных случаях пластмасса, например полиэтилен, может целиком состоять из связующего вещества – полимера.

Различие структур макромолекул (линейные, разветвленные, сетчатые) обуславливает неодинаковость свойства полимеров. Так, линейные (полиэтилены, полиамиды и др.) и разветвленные (полиизобутилен и др.) полимеры характеризуются способностью образовывать анизотропные волокна и пленки и находиться в высокоэластичном состоянии; редкосетчатые полимеры (резины) обладают упругостью, густосетчатые (смолы) – хрупкие.

По фазовому состоянию полимеры могут быть аморфными или кристаллическими. В большинстве случаев реальные полимеры содержат аморфную и кристаллическую фазы. Содержание в полимере (в процентах) веществ в кристаллическом состоянии называют степенью кристалличности. Кристаллические полимеры имеют более высокие теплостойкость и механические свойства.

По полярности различают неполярные (например, полиэтилен, полипропилен, фторопласт-4) и полярные (например, поливинилхлорид) полимеры. Неполярные полимеры в отличие от полярных обладают более высокими морозостойкостью и диэлектрическими свойствам.

Физико-механические свойства полимеров зависят как от их структуры, температуры, так и от физического состояния. Из-за высокой молекулярной массы полимеры не способны образовывать низковязкие жидкости или переходить в газообразное состояние, они могут находиться в одном из трех физических состояний – стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем. Полимеры в стеклообразном состоянии характеризуются пространственной структурой макромолекул, отличаются твердостью и аморфностью. Атомы находятся в равновесном положении, и макромолекулы не перемещаются.

Высокоэластичное состояние макромолекул характерно для высокополимеров и выражается в их способности к большим обратимым изменениям формы при небольших нагрузках. Атомы колеблются, а молекулы в целом способны изгибаться. Макромолекулы в целом не перемещаются, но их отдельные сегменты подвижны за счет вращения групп атомов вокруг углеродной связи в мономерных звеньях цепи.

Полимеры в вязкотекучем состоянии (линейные или разветвленные) отличаются от жидких веществ большей вязкостью. При этом подвижной является вся макромолекула.

Важным компонентом пластмасс являются **наполнители**. Они повышают механическую прочность пластмасс, уменьшают их усадку при формовании изделий, влияют на вязкость, водостойкость пластмасс, придают им специальные свойства (фрикционные, антифрикционные и др.).

Наполнители могут быть органическими или минеральными в виде порошков, волокон, листов (сажа, древесная мука, сульфидная целлюлоза, асбест, тальк, очесы хлопка или льна, стекловолокно, бумага, ткани, древесный шпон и др.). Органические наполнители повышают прочность, снижают хрупкость, но ухудшают термо- и водостойкость пластмасс. Минеральные наполнители повышают прочность, водостойкость, химическую стойкость, тепло- и электроизоляционные свойства пластмасс, но часто повышают и их хрупкость и плотность. В зависимости от вида наполнителя различают порошковые (карболиты), волокнистые (волокниты), слоистые (содержащие листовые наполнители) и некоторые другие пластмассы.

Пластификаторы способствуют повышению пластичности пластмасс или расширению температурного интервала их вязкотекучего состояния. В качестве пластификаторов широко используют органические вещества с высокой температурой кипения и низкой температурой замерзания (стеарин, дибутилфталат, олеиновую кислоту и др.).

Стабилизаторы, например сажа, препятствуют старению полимерных материалов.

Порообразователи, переходя при формировании в газообразное состояние, способствуют образованию пор в таких пластмассах, как пенополистирол, пенополивинилхлорид, поролон, пенополиуретан и др.

Кроме названных, в пластмассы вводятся с различными целями и другие добавки.

Описание лабораторной установки и хода выполнения лабораторной работы

В процессе изучения образцов пластмасс, представленных в лаборатории, для каждого из образцов определить цвет, особые свойства, водопоглощение.

К особым свойствам относятся: структура поверхности (гладкая, шероховатая и т. д.), гибкость или жесткость, эластичность и др.

Водопоглощение определяется согласно следующим требованиям.

Перед испытанием образцы сушат при 50 ± 2 °С в течение 24 ± 1 часов, а затем охлаждают при 23 ± 2 °С.

Образцы должны быть гладкими, без пустот и трещин для уменьшения возможности захвата или включения воздушных пузырьков. На 1 см^2 поверхности образца берут не менее 8 см^3 воды.

При испытании в кипящей воде необходимо периодически добавлять кипящую воду, чтобы сохранить ее уровень на первоначальной отметке. Испытуемые образцы не должны соприкасаться друг с другом, а также со стенками сосуда, и должны быть полностью покрыты водой.

При испытании при 23 ± 2 °С жидкость необходимо перемешивать вращением сосуда не менее одного раза в сутки.

При определении максимальной абсорбции воды до равновесного состояния, равновесие считают достигнутым, если разница между массой образца, определенной с интервалом 24 ч, не превышает 0,1 %.

Метод определения водопоглощения в холодной воде

Подготовленные образцы быстро погружают в дистиллированную воду и выдерживают при 23 ± 2 °С в течение 24 ± 1 ч. После этого образцы вынимают из воды, вытирают чистой сухой тканью или фильтровальной бумагой и не более чем через 1 мин взвешивают.

Метод определения водопоглощения в кипящей воде

Подготовленные образцы погружают в кипящую дистиллированную воду и выдерживают в ней в течение 30 ± 1 мин. После этого образцы извлекают из сосуда, охлаждают в дистиллированной воде до комнатной температуры 23 ± 2 °С в течение 15 ± 1 мин и взвешивают.

Массу воды, поглощенную образцом, в миллиграммах для каждого образца, вычисляют по формулам:

$$X_1 = m_2 - m_1; \quad (2.26)$$

$$X_2 = m_2 - m_3, \quad (2.27)$$

где m_1 – масса образца перед погружением в воду, мг;

m_2 – масса образца после извлечения из воды, мг;

m_3 – масса образца после извлечения из воды и высушивания, мг.

Массу воды, поглощенную образцом, на единицу его поверхности для каждого образца в $\text{мг}/\text{см}^2$, вычисляют по формулам:

$$X_3 = \frac{m_2 - m_1}{A}; \quad (2.28)$$

$$X_4 = \frac{m_2 - m_3}{A}, \quad (2.29)$$

где A – поверхность образца, см^2 .

Массовую долю воды, поглощенную образцом, в процентах для каждого образца, вычисляют по формулам:

$$X_5 = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100; \quad (2.30)$$

$$X_6 = \frac{m_2 - m_3}{m_1} 100. \quad (2.31)$$

За результат испытания принимают среднее арифметическое трех параллельных определений, допускаемые расхождения между которыми не должны превышать 10 %, и округляют его до первого десятичного знака.

Если значение допускаемого отклонения превышает 10 %, то испытание повторяют на удвоенном числе образцов.

При определении плотности образцов заданную температуру поддерживают с точностью до 0,1 К.

Число образцов от одной партии материала должно быть не менее 3.

Плотность пластмасс определяется следующими методами.

1. Метод гидростатического взвешивания. Сущность метода заключается в сравнении масс одинаковых объемов испытуемого вещества и жидкости известной плотности (например, дистиллированной воды), называемой рабочей жидкостью. Метод предназначен для определения плотности (объемной массы) формованных изделий (стержни, бруски, трубки) и обеспечивает точность измерения плотности до 0,1 %.

2. Пикнометрический метод. Сущность метода заключается в сравнении масс одинаковых объемов испытуемого вещества и жидкости известной плотности. Метод применяется для определения плотности формованных изделий, пресспорошков, гранул, хлопьев и обеспечивает точность измерения до 0,05 %.

3. Флотационный метод. Сущность метода заключается в сравнении плотности образца с плотностью рабочей жидкости в момент перехода образца во взвешенное состояние. Метод применяется для определения плотности пластмасс (преимущественно полиолефинов) в виде гранул и любых формованных изделий.

4. Метод обмера и взвешивания.

Опишем последний метод подробнее.

Сущность метода заключается в определении плотности вещества по отношению массы образца к его объему, определяемым непосредственно взвешиванием и обмером. Допускается измерять объем другими методами, например, по вытесненному объему жидкости для образцов неправильной или трудно измеряемой формы.

Метод применяется для определения плотности (объемной массы) изделий и полуфабрикатов (стержни, бруски, трубы) и обеспечивает точность измерения плотности до 0,5 % при точности измерения объема 0,3 % и массы 0,2 %.

Аппаратура и материалы Инструмент, позволяющий производить линейные замеры с точностью до 0,1 % от минимального размера образца.

Прибор для определения объема образцов неправильной или трудно измеряемой формы, например, изображенный на рисунке 2.20, представляет собой две спаянные стеклянные трубки разного диаметра, закрытые с концов притертыми пробками. Для отсчета уровня на трубку меньшего диаметра наносят риски через 1 мм.

Рабочая жидкость. Для определения плотности применяют жидкости, хорошо смачивающие материалы, которые не должны растворять и пропитывать образец или вступать с ним в реакцию, а также не должны улетучиваться во время определения (например, этиловый спирт, смесь этилового спирта с хлороформом, вода или вода с хлористым цинком).

При плохом смачивании образца в жидкость необходимо вводить смачивающие и обезжиривающие вещества.

При отсутствии подходящей жидкости образцы покрывают слоем парафина известной плотности, что потом учитывают при расчете плотности.

Проведение испытания Образцы для испытания должны иметь объем не менее 1 см³ и массу не более 180 г. Массу образца определяют взвешиванием с точностью до 0,0001 г

Объем образца определяют следующим образом:

- а) правильной геометрической формы – вычисляют по результатам линейных замеров;
- б) неправильной или трудно измеряемой формы – по объему вытесненной жидкости, определяемому при помощи прибора (рисунок 2.20).

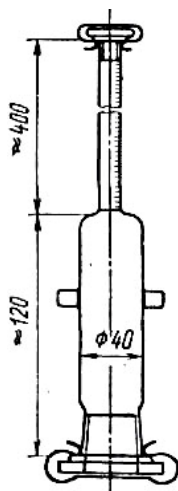


Рисунок 2.20

Для этого прибор, находящийся в вертикальном положении узким горлышком вверх, наполняют жидкостью до нижнего деления шкалы или немного выше, закрывают пробкой и переворачивают на 360° , после этого отсчитывают уровень жидкости. Затем прибор переворачивают так, чтобы большая пробка находилась сверху, после этого взвешенный образец объемом не более 5 см^3 вводят в прибор, плотно закрывают пробкой и, переворачивая, приводят в первоначальное положение. Новый уровень жидкости отсчитывают, следя за тем, чтобы не было прилипших к образцу воздушных пузырьков. Объем образца определяют по разности между уровнями жидкости.

Обработка результатов Плотность материала (ρ_t) при температуре измерения в г/см^3 вычисляют по формуле:

$$\rho_t = \frac{M_1}{V}, \quad (2.32)$$

где M_1 – масса образца в г;

V – объем образца при температуре измерения в см^3 .

Объем параллелепипеда:

$$V = Sh, \quad (2.33)$$

где S – площадь основания;

h – высота.

Объем куба:

$$V = a^3, \quad (2.34)$$

где a – длина ребра.

Объем цилиндра:

$$V = \pi r^2 h = 0,25\pi d^2 h, \quad (2.35)$$

где r – радиус основания цилиндра,

h – высота цилиндра;

d – диаметр основания.

Объем полого цилиндра (трубы):

$$V = \pi (r_2^2 - r_1^2) h, \quad (2.36)$$

где r_2 – наружный радиус цилиндра;

r_1 – радиус отверстия;

h – высота цилиндра.

За результат испытания принимают среднее арифметическое трех параллельных определений, допускаемые расхождения между которыми не должны быть более $0,005 \text{ г/см}^3$, если нет других указаний в нормативно-технической документации на материал.

Задания

1 уровень

Определить цвет и особые свойства, область применения представленных образцов, результаты представить в таблице 2.23. Наименование материала принять по указанию преподавателя

Таблица 2.23 – Краткая характеристика пластмасс

Наименование материала	Цвет	Особые свойства материала (мягкость, твердость, гибкость)	Область применения

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Произвести определение плотности представленных образцов методом обмера и взвешивания и результаты измерений и вычислений представить по форме таблицы 2.24. На основании полученных результатов с использованием литерату-

ры определить наименование, марку исследуемых материалов, результаты записать в таблицу.

Таблица 2.24 Краткая характеристика пластмасс

Наименование материала	Марка	Цвет	Плотность	Особые свойства материала (мягкость, твердость, гибкость)	Область применения

3 уровень

Выполнить задание уровня 2. По справочной литературе подобрать материалы со свойствами, аналогичными изучаемым образцам, и привести результаты в таблице 2.24.

Вопросы предварительного контроля

1. Какие компоненты входят в состав пластмасс?
2. Назовите достоинства и недостатки пластмасс.
3. Какие материалы относятся к природным полимерам?
4. Какие материалы относятся к синтетическим полимерам?
5. Какие свойства пластмасс повышают наполнители?
6. Какие свойства пластмасс повышают пластификаторы?

Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1 уровень

1. Какие структуры могут иметь макромолекулы полимеров?
2. В каком физическом состоянии могут находиться полимеры?
3. От каких факторов зависят физико-механические свойства полимеров?
4. Какие материалы относятся к органическим наполнителям?
5. Какие материалы относятся к минеральным наполнителям?

2 уровень

1. В каком состоянии могут находиться макромолекулы полимеров?
2. Как влияет процесс формования на термопластичные и терморезистивные полимеры?
3. Как определяется водопоглощение пластмасс?
4. Какими методами определяется плотность пластмасс?

3 уровень

1. Перечислить какие методы определения плотности целесообразно применять в данной лабораторной работе и почему?
2. Перечислить группы пластмасс с аналогичными изучаемым физико-механическими свойствами и указать их области применения.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОЙ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Задания

1 уровень

Изучить основные свойства и область применения заданного вида вспомогательных конструкционных материалов. Результаты оформить в виде реферата.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1 и дополнить сведениями о технологии производства заданных материалов.

3 уровень

Выполнить задание уровня 2 и дополнить сведениями о маркировке заданных материалов.

Темы индивидуальных заданий

1. Лесоматериалы.
2. Звукоизоляционные материалы.
3. Звукопоглощающие материалы.
4. Эмульсии и пасты.
5. Рулонные и листовые материалы.
6. Герметизирующие материалы.

ПРИМЕРЫ РАЗНОУРОВНЕВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ МОДУЛЯ

1 уровень

1. Как получают газонаполненные пластмассы?
2. Как изготавливают ячеистые пластмассы?
3. Какие материалы называются теплоизоляционными ?
4. Какие материалы применяют для звукопоглощающей облицовки?
5. Как получают и где применяются минераловатные изделия?

2 уровень

1. На какие группы делятся огнеупорные изделия в зависимости от термической обработки?
2. Где применяются жаростойкие бетоны и растворы?
3. Какими свойствами обладают пенопласты?
4. Как получают и где применяются стекловолокнистые материалы?
5. Назовите основные свойства теплоизоляционных материалов.
6. Какие добавки применяют для получения высокопористого строения полимеров?

3 уровень

1. Какими свойствами обладают окисные и неокислородные огнеупоры?
2. Какие материалы относятся к материалам с конгломератной структурой и где они применяются?
3. Как повышают эластичность полимеров?

МОДУЛЬ-РЕЗЮМЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В результате изучения студент **должен знать:**

- современные конструкционные материалы и технологию их производства;
- основные направления совершенствования конструкционных материалов.

МАТЕРИАЛЫ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ

Практическая работа

«Перспективные конструкционные материалы. Современные технологии получения конструкционных материалов»

Общие сведения

Одним из представителей современных конструкционных материалов являются алюминиевые легированные сплавы.

Добавки циркония и скандия представляются наиболее эффективными упрочнителями для термически не упрочняемых $Al-Mg$ сплавов типа $AMg6$ и $AMg10$, сохраняя при этом основные достоинства последних (прежде всего, коррозионную стойкость). Ввод добавок Zr и Sc в эти сплавы ориентирован на термообработку (как и у промышленных аналогов), но режим нагрева требует корректировки, чтобы обеспечить наибольший эффект дисперсионного твердения (рекомендуются многоступенчатые режимы).

Для создания новых высокопрочных литейных сплавов предлагаются системы с высоким содержанием цинка и магния, а также добавками никеля и железа. Таких промышленных сплавов нет, однако, данные по экспериментальным сплавам системы $Al-Zn-Mg-Ni-Fe$ (без Zr и Sc), в частности по сплаву $AЦ7Mg3H4$, показывают, что именно эти системы позволяют получить наилучшее сочетание механических и литейных свойств. Предварительные исследования показывают, введение добавок Zr и Sc в эти сплавы позволит дополнительно повысить прочность без снижения литейных свойств. Эти сплавы ориентированы на многоступенчатую термообработку, которая должна обеспечить несколько эффектов: упрочнение за счет основных Zn - и Mg -содержащих фаз, сфероидизацию эвтектических ${}_3Ni$ или Al_9FeNi).

Наиболее многообещающим представляется использование добавки *Zr* в низколегированных сплавах, поскольку относительный прирост прочности в них может быть наиболее велик при сохранении технологичности. Системы *Al-Fe-Si* и *Al-Mn-Fe-Si* являются базовыми для сплавов, из которых делают фольгу и другие деформируемые полуфабрикаты (типа 8111, 8006 и АМц).

Для создания жаропрочных сплавов, предназначенных для работы до 350 °С, предлагаются системы *Al-Cu-Mn-Zr-Sc* и *Al-Cu-Mn-Fe-Ni-Zr-Sc*. По сравнению с промышленными сплавами типа 1201 и АК4-1 предлагается снизить концентрацию меди, но увеличить концентрацию марганца. Это позволит получить в конечной структуре максимальное количество вторичных алюминидов $Al_{20}Cu_2Mn_3$, которые способствуют упрочнению, особенно при повышенных температурах. При этом новые сплавы не требуют гомогенизации (так как максимальная пластичность достигается в литом состоянии) и закалки, что позволяет существенно снизить стоимость деформированных полуфабрикатов.

Представляются перспективными исследования по снижению концентрации скандия в магналиях типа 1570. Оптимизированные составы системы *Al-Mg-Mn-Zr-Sc* позволят получить значительный экономический эффект, что может расширить область применения этих наиболее продвинутых среди *Sc*-содержащих сплавов.

Для создания высокопрочных сплавов рекомендуются системы с повышенным содержанием цинка и магния. Медь в количестве ~2 % входит в «классические» составы высокопрочных сплавов типа В9бц-3, не позволяет добиться сочетания полной гомогенизации (по меди, магнию и цинку) и максимального эффекта упрочнения за счет образования *Zr*- и *Sc*-содержащих дисперсоидов. Поэтому ее надо полностью исключить или ограничиться малым количеством (<0,5 %). Новые высокопрочные сплавы, как и промышленные аналоги, требуют полной термообработки. Достигнутый на экспериментальных сплавах уровень свойств (в прессованных прутках $\sigma_B > 700$ МПа, $\sigma_{0,2} > 680$ МПа, $\delta > 5$ %) делает эти сплавы также весьма перспективными для изготовления нагруженных деталей (в частности, для замены сталей и титановых сплавов).

Кроме того, разработаны порошковые композиционные материалы для скоростных узлов трения с высоким уровнем физико-механических ($\sigma_{изг} = 900-1150$ МПа и $HRA = 82-87$) и трибологи-

ческих свойств для работы на воздухе в условиях сухого трения. Для экономии материальных ресурсов и облегчения веса узлов трения были получены материалы каркасного и матричного типа. При этом использовали порошковые композиции в качестве пористых каркасов и наполнителей, а ПТФЭ – как твердую смазку и матрицу.

Трибологические испытания таких материалов проводили на машине трения МТ-68 по схеме вал-вкладыш при нагрузке 1 МПа и скорости скольжения 10 м/с в паре с закаленной сталью 65Г. В процессе испытаний измеряли коэффициент трения и изменение массы образцов с точностью до 0,0001 г. Используя значения коэффициента трения, рассчитывали интенсивность изнашивания. Было установлено, что при использовании поливинилового спирта в качестве порообразователя можно получить пригодные для дальнейшей пропитки ПТФЭ каркасы на основе нитрида титана с регулируемой пористостью в интервале от 10 до 50 %.

Известно, что структура материала, состоящего из пористого каркаса и фторопластового наполнителя, имеет на поверхности полимерную пленку. Она образуется, поскольку тепловыделение при трении приводит к более интенсивному расширению фторопласта и выдавливанию его из пор. Этому способствует большая разница в коэффициентах теплового расширения (КТР): для фторопласта он в 10–20 раз больше, чем для металлоподобных каркасов.

Исследование трибологических свойств показало, что пропитанные ПТФЭ каркасы пористостью 25–40% имеют в 1,5 раза более низкую интенсивность изнашивания, чем компактные материалы. Повышение износостойкости в 1,5 раза связано с защитным действием полимерной пленки, постоянно воспроизводимой в процессе скольжения, и является косвенным свидетельством отсутствия схватывания в паре с контртелом.

Аудиторные задания

1 уровень

Ознакомиться с представленными в лаборатории образцами современных конструкционных материалов и с использованием справочной литературы привести их характеристики в отчете.

2 уровень

Выполнить задание уровня 1. Дать краткое описание технологии производства изучаемых конструкционных материалов.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные направления совершенствования металлических конструкционных материалов.
2. Назовите перспективные марки чугуна и стали.
3. Назовите титановые сплавы, охарактеризуйте их, укажите перспективы их применения.
4. Назовите специальные полимерные материалы и укажите область их применения.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Бородулин, В.Н. Электротехнические и конструкционные материалы [Текст] / В.Н. Бородулин [и др.] ; под общ. ред. В.А. Филикова. – 4-е изд., испр. – Москва : Академия, 2008. – 276 с.
2. Алиев, И.И. Электротехнические материалы и изделия [Текст] : справочник / И.И. Алиев, С.Г. Калганова. – Москва : РадиоСофт, 2005. – 351 с.
3. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.С. Серебряков. – Москва : Маршрут, 2005. – 278 с.
4. Струк, В.А. Материаловедение : учеб. для вузов [Текст] / В.А. Струк [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2008. – 519 с.
5. Солнцев, Ю.П. Нанотехнологии и специальные материалы [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин ; под ред. Ю.П. Солнцева. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. – 173 с.

Дополнительная

1. Перерва, Г.И. Электротехнические материалы [Текст] : учеб. пособие / Г.И. Перерва – Гомель : Бел. гос. ун-т трансп., 1999. – 80 с.
2. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники [Текст] : учеб. для вузов / В.В.Пасынков, В.С.Сорокин. – 5-е изд. – Санкт-Петербург : Лань, 2003. – 368 с.
3. Журавлева, Л.В. Электроматериаловедение [Текст] : учеб. пособие / Л.В. Журавлева. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Академия, 2006. – 351 с.
4. Электротехнический справочник [Текст]. В 4 т. Т. 1 / сост. И.И. Алиев. – Москва : РадиоСофт, 2006. – 479 с.
5. Никифоров, В.М. Технология металлов и других конструкционных материалов [Текст] : учебник для техникумов и колледжей / В.М. Никифоров. – Изд. 8-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 382 с.

Учебное издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебно-методический комплекс

Составители:

Селюк Юрий Николаевич,
Довнар Ирина Викторовна

Ответственный за выпуск *Ю.Н. Селюк*
Редактор, корректор *М.А. Макрецькая*
Верстка *М.А. Макрецькая*

Подписано в печать 25.08.2008 г. Формат 60×84¹/₁₆
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 14,18.
Уч.-изд. л. 13,09. Тираж 250 экз. Заказ 727.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный аграрный технический университет
ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006. ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.
220023, г. Минск, пр. Независимости, 99, к. 2.