

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Т. М. Ткаченко, С. М. Барайшук, С. С. Нефёдов

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.
ПРАКТИКУМ**

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

Минск
БГАТУ
2022

УДК 621.31(07)
ББК 31.23я7
Т48

Рецензенты:
кафедра физики твердого тела БГУ
(доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой *В. В. Узлов*);
кандидат физико-математических наук, главный специалист отдела
организации исследований и использования результатов БРФФИ
(куратор секции технических наук) *Т. В. Шёлковая*

Ткаченко, Т. М.
Т48 Электротехнические и конструкционные материалы. Практикум :
учебное пособие / Т. М. Ткаченко, С. М. Барайшук, С. С. Нефёдов. –
Минск : БГАТУ, 2022. – 236 с.
ISBN 978-985-25-0177-4.

Содержит 8 практических и 7 лабораторных работ по материаловедению. Рассмотрены структура, свойства и характеристики конструкционных материалов, а также основы физических явлений, происходящих в диэлектриках, проводниках, полупроводниках и магнитных материалах.

Для студентов, обучающихся по специальностям 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям)»; 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (по направлениям)», инженеров-электриков, занятых эксплуатацией электротехнологического оборудования.

УДК 621.31(07)
ББК 31.23я7

ISBN 978-985-25-0177-4

© БГАТУ, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Практическая работа № 1. Методы анализа структуры и свойств материалов	6
Практическая работа № 2. Основные типы кристаллических структур металлов. Дефекты кристаллических структур	27
Практическая работа № 3. Металлы и сплавы. Способы обработки сплавов	37
Практическая работа № 4. Стали, чугуны: классификация и основные методы маркировки	45
Практическая работа № 5. Способы получения металлических заготовок. Прокат	71
Практическая работа № 6. Пластмассы. Практическое распознавание типовых видов пластмасс	80
Практическая работа № 7. Диэлектрики: пассивные и активные. Электроизоляционные материалы	91
Практическая работа № 8. Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов	106
Лабораторная работа № 1. Изучение явления пробоя диэлектриков	114
Лабораторная работа № 2. Измерение электрических характеристик твердых диэлектриков	128
Лабораторная работа № 3. Изучение зависимости удельного сопротивления проводников от температуры	140
Лабораторная работа № 4. Изучение зависимости сопротивления полупроводниковых компонентов от температуры	153
Лабораторная работа № 5. Изучение зависимости электротехнических характеристик полупроводниковых компонентов от освещенности	164

Лабораторная работа № 6. Исследование магнитных свойств магнитомягких ферритов	174
Лабораторная работа № 7. Изучение электрической прочности твердых диэлектриков.....	188
Список рекомендуемой литературы	203
Приложение 1. Механические свойства материалов	206
Приложение 2. Определение типа дефектов кристаллической решетки.....	216
Приложение 3. Диаграммы состояния сплавов	222
Приложение 4. Маркировка сталей и чугунов.....	224
Приложение 5. Расшифровка маркировок сталей и чугунов	225
Приложение 6. Расчет числа заготовок	227
Приложение 7. Органолептические признаки основных видов пластмасс	230

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем издании представлены 8 практических и 7 лабораторных работ, выполняемых в рамках изучения дисциплины «Электротехнические и конструкционные материалы» на кафедре практической подготовки студентов агроэнергетического факультета БГАТУ.

Практические работы направлены на изучение основных классов современных конструкционных материалов, их структуры и свойств, а также основных механических характеристик и способов их измерений.

В лабораторных работах рассматриваются особые свойства материалов, которые проявляются у них в электрических и магнитных полях. Электрические и магнитные свойства, а также основные электротехнические характеристики материалов изучаются по классам – диэлектрики, проводники, полупроводники и магнитные материалы. В работах предлагается провести испытания диэлектриков на пробой, определить удельные объемное и поверхностное сопротивления некоторых твердых диэлектриков. Рассмотрены способы оценки температурного коэффициента удельного сопротивления металлов различных групп, а также зависимость электротехнических параметров простейших полупроводниковых компонентов от влияния внешних факторов. Явление магнитного гистерезиса показано на примере практически важного класса современных магнитных материалов – магнитомягких ферритов.

Практическая работа № 1

МЕТОДЫ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: изучить методы анализа структуры и свойств материалов.

Задачи работы:

1. Изучить методы структурных исследований и анализа механических свойств.
2. Научиться проводить макроанализ конструкционного материала, оценивать свойства с использованием простейших средств.
3. Научиться работать с таблицами механических свойств.

Краткие теоретические сведения

Методы анализа состава и структуры материалов

Существует много разнообразных способов, при помощи которых изучают строение и химический состав материалов.

Изучение химического состава. Для определения химического состава используются методы количественного анализа. Если не требуется большой точности, то используют спектральный анализ. Спектральный анализ основан на разложении и исследовании спектра электрической дуги или искры, искусственно возбуждаемой между медным электродом и исследуемым металлом. Зажигается дуга, луч света через призмы попадает в окуляр для анализа спектра. Цвет и концентрация линий спектра позволяют определить содержание химических элементов.

Более точные сведения о составе дает рентгеноспектральный анализ. Проводится на микроанализаторах. Позволяет определить состав фаз сплава, характеристики диффузионной подвижности атомов.

Изучение структуры материалов. Существуют понятия макроструктуры и микроструктуры материалов.

Макроструктурой любого металла или сплава называется структура, видимая невооруженным глазом или при очень небольшом увеличении.

Микроструктурой называется строение металла или сплава, видимое при большом увеличении.

Субмикроструктура – структура внутри одного зерна металла.

Макроструктурный анализ – изучение структуры материалов визуально или с помощью простейших оптических приборов с увеличением до 50 крат. Наиболее доступным при этом является изучение изломов (рис. 1.1).

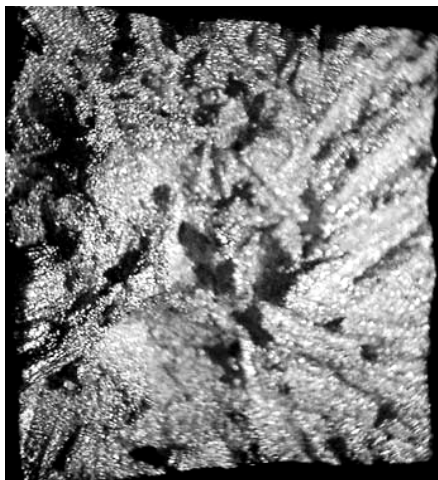


Рис. 1.1. Излом бронзовой отливки (×50)

Для металлов и сплавов мелкокристаллический излом означает лучшее качество – более высокие механические свойства. На изломах, например, в сталях легко наблюдаются дефекты: крупное зерно, грубая волокнистость, трещины, раковины и т. п. Другим способом макроисследования является изучение строения металлических материалов на специальных темплатах (образцах). После травления специальными растворами шлифованной поверхности темплета на ней выявляется кристаллическая структура, волокнистость, дендритное строение, неоднородность металла. Например, травление поперечного среза сварного шва дает возможность выявить места непровара, пузыри, зону термического влияния, трещины и т. п.

Микроструктурный анализ (рис. 1.2) – изучение поверхности при помощи световых микроскопов.

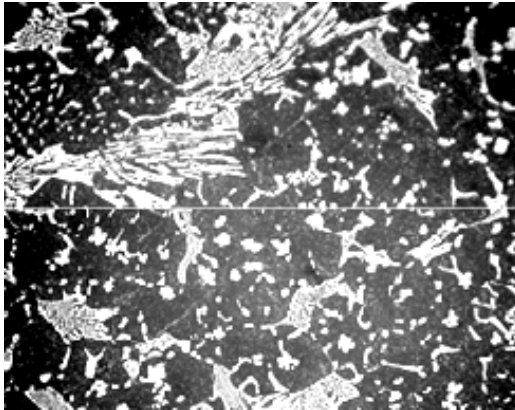


Рис. 1.2. Микроструктура литейной легированной стали ($\times 500$)

Увеличение составляет от 50 до 2000 крат. Позволяет обнаружить элементы структуры размером до 0,2 мкм. Образцами являются микрошлифы с блестящей полированной поверхностью, так как структура рассматривается в отраженном свете. Наблюдаются микротрещины и неметаллические включения. Для выявления микроструктуры поверхность травят реактивами, зависящими от состава сплава. Различные фазы протравливаются неодинаково и окрашиваются по-разному. Можно выявить форму, размеры и ориентировку зерен, отдельные фазы и структурные составляющие.

Для анализа субмикроструктуры (структуры внутри зерен), кроме световых микроскопов, используют электронные микроскопы с большой разрешающей способностью (увеличение до миллиона крат). Изображение формируется при помощи потока быстро летящих электронов. Электронные лучи с длиной волны $(0,04...0,12) \cdot 10^{-8}$ см дают возможность различать детали объекта, соответствующие по своим размерам межатомным расстояниям.

В просвечивающем электронном микроскопе поток электронов проходит через изучаемый объект. Изображение является результатом неодинакового рассеяния электронов на объекте (рис. 1.3).

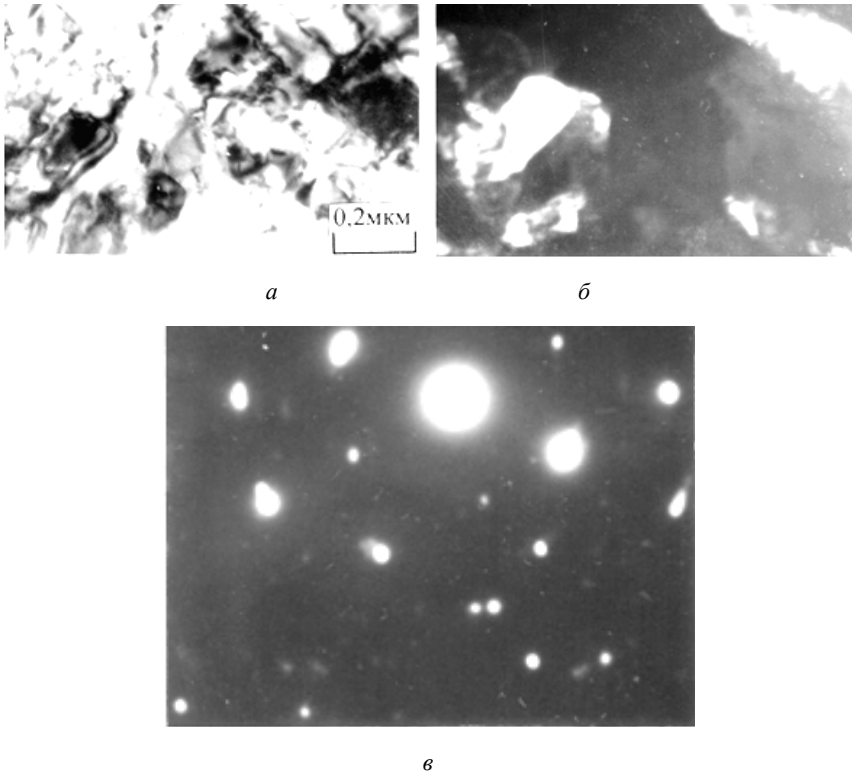


Рис. 1.3. Изображение субзерен феррита в стали 20, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии:
a – светлое поле; *б* – темное поле в рефлексе $[110]$ α -Fe;
в – микроэлектронограмма ($\times 50000$)

При прямом методе изучают тонкие металлические фольги, толщиной до 300 нм, на просвет. Фольги получают непосредственно из изучаемого сплава последовательно механическим и ионным утонением.

В растровом электронном микроскопе изображение создается за счет вторичной эмиссии электронов, излучаемых поверхностью, на которую падает непрерывно перемещающийся по этой поверхности поток первичных электронов. Изучается непосредственно поверхность металла, чаще всего изломы (рис. 1.4).

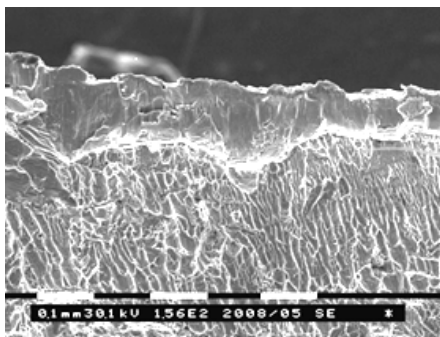


Рис. 1.4. Изображение излома поверхностного слоя титана, полученное с помощью растровой электронной микроскопии ($\times 1000$)

Разрешающая способность растровых электронных микроскопов несколько ниже, чем у просвечивающих микроскопов.

Атомно-силовой микроскоп основан на принципе взаимодействия между поверхностью исследуемого образца и острой вольфрамовой иглой длиной в несколько микрометров, закрепленной на свободном конце кантилевера (кронштейна). Межатомные силы между иглой и атомами поверхности образца заставляют кантилевер изгибаться. Измеряя отклонение кантилевера в ходе сканирования иглой поверхности, получают картину топографии поверхности. Пьезоэлектрический преобразователь обеспечивает контроль положения иглы по отношению к поверхности образца с высокой точностью, получая карту поверхности в нанометровом или атомном масштабе (рис. 1.5).

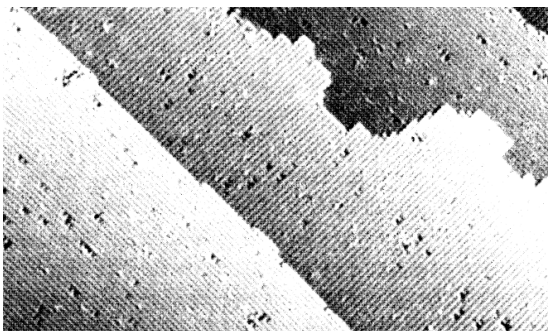


Рис. 1.5. Изображение выхода на поверхность кристаллографических плоскостей кремния, полученное с помощью атомно-силовой микроскопии ($\times 200000$)

Самым информативным методом исследований структуры является *рентгеноструктурный метод* анализа, позволяющий определять качественный и количественный фазовый состав сплавов, особенности субструктуры, тип твердых растворов, параметры кристаллических решеток, плотность линейных дефектов, микронапряжения и др. Метод основан на эффекте упругого взаимодействия рентгеновского излучения с исследуемым материалом. Взаимодействие волны с атомами кристаллической решетки приводит к ее дифракции и преимущественному рассеянию в некоторых направлениях.

Пример дифракционного спектра приведен на рис. 1.6.

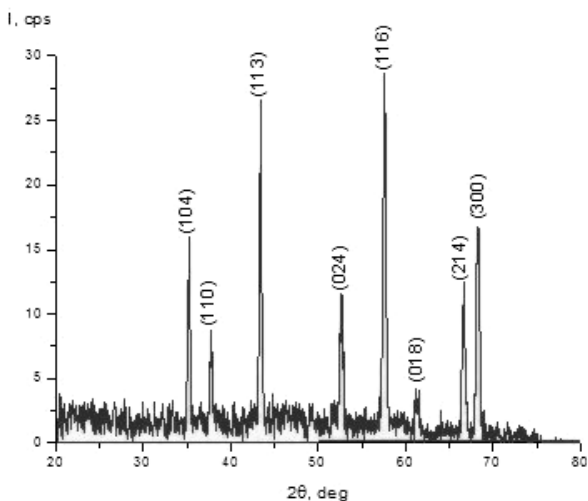


Рис. 1.6. Дифрактограмма порошка корунда Fe_2O_3

Направление (углы) и интенсивность дифракционных максимумов (рефлексов) определяют параметры кристаллической решетки и другие показатели кристаллического строения.

Методы оценки физических свойств материалов

К *физическим свойствам* металлов относят тепловые свойства: температуру плавления, теплопроводность, тепловое расширение, теплоемкость, механические свойства, а также электрические и магнитные свойства.

Цветом называют способность металла отражать падающие на него световые лучи; например, медь имеет красноватый цвет, алюминий – серебристо-белый. *Плотность* характеризуется массой, заключенной в единице объема. *Температура плавления* – температура перехода из твердого состояния в жидкое. Температура плавления железа – 1539 °С, олова – 232 °С, меди – 1083 °С. *Теплопроводность* – способность металлов поглощать тепло и отдавать его при охлаждении. Лучшей теплопроводностью обладают серебро, медь, алюминий. Теплопроводность учитывается в теплотехнических расчетах. *Тепловое расширение* – способность металла расширяться при нагревании и сжиматься при охлаждении. Это свойство учитывают при строительстве мостовых ферм, железнодорожных путей, при изготовлении подшипников скольжения. *Теплоемкостью* называют способность металла при нагревании поглощать определенное количество теплоты.

Электропроводность – способность металла проводить электрический ток. Для токонесущих проводов используют медь и алюминий с высокой электропроводностью, а в электронагревательных приборах и печах применяют сплавы с высоким электросопротивлением (нихром, константан, манганин).

Магнитными свойствами (способностью намагничиваться) обладают железо, никель, кобальт и их сплавы. Их называют ферромагнитными материалами. Они имеют огромное промышленное значение: используются в электродвигателях, генераторах, трансформаторах, телефонной, телеграфной технике и т. д. Иногда необходимы немагнитные материалы. Их получают изменяя состав и внутреннее строение сплавов.

Из физических в особую группу выделяют *механические свойства*, определяющие способность металлов сопротивляться воздействию внешних сил. Они зависят от химического состава металлов, их структуры, способа технологической обработки и других факторов. Зная механические свойства, можно судить о поведении металла при обработке и в процессе работы конкретных механизмов. По характеру действия на металл различают три вида нагрузок: статические – действующие постоянно или медленно возрастающие; динамические – действующие мгновенно, принимающие характер удара; циклические или знакопеременные, изменяющиеся или по величине, или по направлению, или одновременно и по величине, и по направлению.

К основным механическим свойствам металлов относят прочность, твердость, упругость, пластичность, ударную вязкость.

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

Прочность – способность металла сопротивляться разрушению или появлению остаточных деформаций под действием внешних сил. Большое значение имеет удельная прочность, ее находят отношением предела прочности к плотности металла. Для стали прочность выше, чем для алюминия, а удельная прочность ниже.

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

Пластичность – свойство металла изменять свои размеры и форму под действием внешних сил, не разрушаясь при этом.

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

Кроме указанных механических свойств можно назвать усталость (выносливость), ползучесть и др.

Характеристики прочности и пластичности металлов обычно определяют при испытаниях на статическое растяжение. При этом испытуемый образец закрепляют в захватах разрывной машины и деформируют при плавно возрастающей (статической) нагрузке.

Чтобы исключить влияние размеров образца, испытание проводят на стандартных образцах с определенным соотношением между расчетной длиной l_0 и площадью поперечного сечения F_0 . Наиболее широко применяются образцы круглого сечения (рис. 1.7).

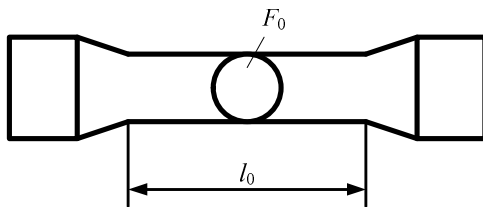


Рис. 1.7. Стандартный образец для испытаний на растяжение

По результатам испытаний строят диаграммы растяжения образца в координатах «нагрузка–деформация» $P-\Delta l$ (рис. 1.8) или «напряжение–деформация» $\sigma-\Delta l$.

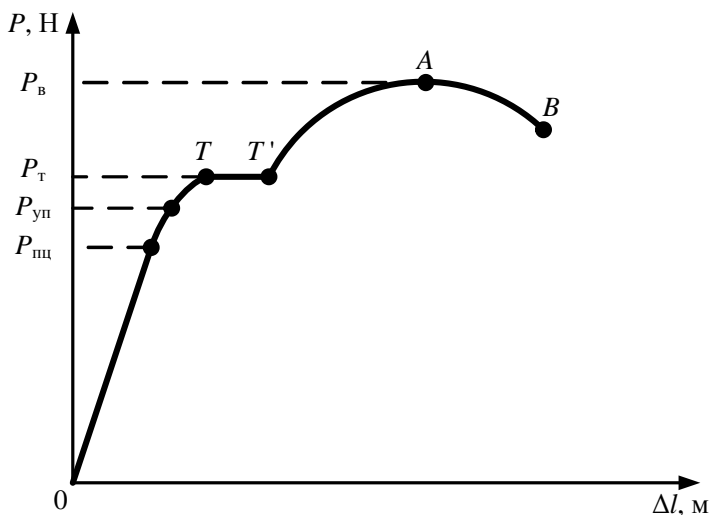


Рис. 1.8. Диаграмма растяжения образца из низкоуглеродистой стали:
 $P_{\text{уп}}$ – сила, действующая на образец в момент прекращения действия закона Гука;
 $P_{\text{т}}$ – сила, приводящая к пластической деформации образца;
 $P_{\text{в}}$ – сила, приводящая к разрушению образца

По кривой растяжения определяют следующие характеристики механических свойств металла:

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

$$\sigma_y = \frac{P_{\text{уп}}}{F_0}, \quad (1.1)$$

где P_y – нагрузка, соответствующая пределу упругости, Н;
 F_0 – площадь поперечного сечения, м^2 .

Если напряжения меньше σ_y , металл работает в области упругой деформации. У большинства металлов пределы пропорциональности и упругости близки по величине, поэтому в основном указывают предел упругости: $\sigma_y \approx \sigma_{0,02}$.

2. *Предел текучести* σ_t – это напряжение, при котором происходит увеличение деформации при постоянной нагрузке, МПа:

$$\sigma_{\tau} = \frac{P_{\tau}}{F_0}, \quad (1.2)$$

где P_{τ} – нагрузка, соответствующая пределу текучести, Н.

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

4. *Предел прочности* (временное сопротивление разрыву) $\sigma_{\text{в}}$ – это напряжение максимальной нагрузки, которую выдерживает образец до разрушения, МПа:

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\text{в}}}{F_0}, \quad (1.3)$$

где $P_{\text{в}}$ – нагрузка, соответствующая пределу прочности, Н.

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к разрушению образца.

Кроме характеристик прочности, определяют также характеристики пластичности. Основными характеристиками пластичности металлов являются относительное удлинение и относительное сужение.

Относительное удлинение (δ) измеряется в процентах и определяется по следующей формуле:

$$\delta = \frac{l_{\text{к}} - l_0}{l_0} 100 \%, \quad (1.4)$$

где l_0 и $l_{\text{к}}$ – начальная и конечная длины образца соответственно до и после разрыва, м.

Относительное сужение (Ψ) также измеряется в процентах и определяется по формуле

$$\Psi = \frac{F_0 - F_{\text{к}}}{F_0} 100 \%, \quad (1.5)$$

где F_0 и $F_{\text{к}}$ – начальная и конечная площади поперечного сечения соответственно до и после разрушения, м².

Твердость материала

Испытание на твердость – один из основных методов оценки качества изделия. Наибольшее распространение на практике получили

методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу. Пользуются также простым методом Мооса для грубой оценки твердости материала.

Твердость по Моосу. Шкала Мооса используется для быстрой сравнительной диагностики твердости материалов при помощи царапания. Метод назван по фамилии автора Фридриха Мооса (1811 г.).

Шкала представляет собой набор образцов эталонных минералов из десяти экземпляров, причем расположены они в порядке нарастания твердости. Им присвоены индексы системы Мооса от 1 до 10 (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Шкала эталонных материалов Мооса

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

Каждый из эталонных материалов характеризуется определенным значением твердости:

1. *Тальк.* Это очень распространенное вещество, широко применяемое в промышленности, начиная с производства детской присыпки и заканчивая резиновой промышленностью. По степени прочности на одном уровне с тальком находится графит.

2. *Гипс.* Если порошок гипса развести в воде, то при высыхании полученная кашица превращается в достаточно твердый материал. Это свойство гипса широко используется как в медицине, так и в архитектуре. Но белый порошок – это не просто измельченный минерал, а уже прошедший предварительную обработку – нагретый и обожженный. Именно так он приобретает свое полезное свойство – размягчаться,

а затем вновь затвердевать. Гипс, как и тальк, можно поцарапать ногтем, но гипс оставляет следы на тальке, значит, в рейтинге твердости стоит уровнем выше.

3. *Кальцит* – карбонат кальция. Входит в состав мела, известняков. Из кальцита целиком состоит мрамор. В биологии кальцит относят к биоминералам, так как из него состоят раковины и скелеты беспозвоночных. Примерно такая же твердость по Моосу присуща золоту и серебру.

4. *Флюорит*. Его еще называют плавиковым шпатом, поскольку его применяют в производстве плавиковой кислоты. Из бесцветных кристаллов флюорита возможно производство линз, но твердость стекла выше твердости флюорита.

5. *Апатит*. Стеклом все еще царапается, но уже с трудом.

6. *Калиевый полевой шпат*. Применяется в качестве сырья для производства электрокерамики и фарфора. Ориентировочно такую же степень прочности (5,5–6,5) имеет минерал – опал.

7. *Кварц*. С точки зрения химии – это диоксид кремния. Это наиболее широко распространенный минерал в земной коре. Кварц способен оставить царапины на стекле, а сам обрабатывается алмазом.

8. *Топаз*. Этим камнем можно поцарапать стекло и кварц.

9. *Корунд*. Уступает в прочности только алмазу. Обработать корундом можно практически все минералы. К корундам относятся такие драгоценные камни, как рубин и сапфир.

10. *Алмаз*. В 1600 раз тверже талька. Никакой из минералов не оставляет отметин на гранях алмаза.

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

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

Материалы, имеющие индекс ниже 7, считаются мягкими, выше 7 – твердыми. В целом подавляющее большинство природных соединений имеют индекс Мооса от 2 до 6 (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Индексы твердости некоторых металлов по шкале Мооса

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

Твердость по Бринеллю (HB) определяют вдавливанием в поверхность металла стального закаленного шарика диаметром 2,5; 5 и 10 мм (рис. 1.9).

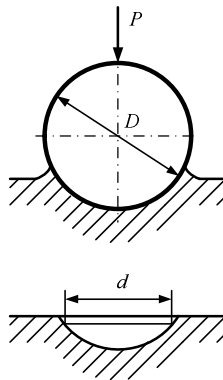


Рис. 1.9. Схема измерения твердости по Бринеллю (HB)

Прикладываемая нагрузка задается в зависимости от вида испытуемого материала и размера образца. Число твердости HB определяют следующим отношением:

$$HB = \frac{P}{F_{сф}}, \quad (1.6)$$

где P – приложенная нагрузка, кгс;

$F_{сф}$ – площадь сферической поверхности отпечатка, $м^2$.

Если поверхность отпечатка имеет форму шарового сегмента, то HB определяется по формуле

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1.7)$$

где D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

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

Твердость по Роквеллу определяют вдавливанием в поверхность алмазного конуса с углом при вершине 120° или стального закаленного шарика ($D = 1,6$ мм). Конус применяют для металлов с твердостью больше $230 HB$, а шарик – для металлов с твердостью меньше этой величины. Твердость определяется по глубине впадины (рис. 1.10).

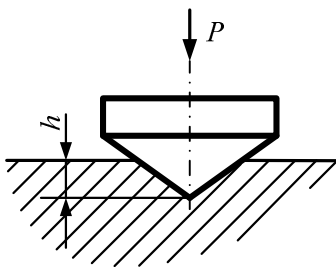


Рис. 1.10. Схема измерения твердости по Роквеллу

Твердость по Роквеллу в зависимости от твердости испытываемых материалов обозначают *HRA*, *HRB*, *HRC*.

Шкала *C* служит для испытания твердых материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 230 до 700 кгс/мм², например закаленной стали. Алмазный конус вдавливаются под нагрузкой 150 кгс. Интервал измерения твердости по шкале *C* – от 22 до 68 единиц, твердость обозначается *HRC*.

Шкала *A* используется при испытании очень твердых материалов, например твердых сплавов или тонких поверхностных слоев (0,5–1,0 мм). Применяют тот же алмазный конус, но вдавливают под нагрузкой в 60 кгс. Значение твердости определяют по шкале *C*, но обозначают *HRA*. Интервал измерения твердости по этой шкале от 70 до 85 единиц.

Шкала *B* предназначена для испытания мягких материалов, имеющих твердость по Бринеллю от 60 до 230 кгс/мм², например бронзы. Стальной шарик диаметром 1,59 мм вдавливаются под нагрузкой в 100 кгс. Твердость измеряется в пределах от 25 до 100 единиц шкалы *B* и обозначается *HRB*.

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

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

Преимущества метода Виккерса: можно измерять твердость как мягких, так и особо твердых металлов и сплавов; можно измерять твердость поверхностных слоев после закалки, наклепа, цементации, азотирования, а также твердость покрытий; высокая точность метода.

Метод измерения **микротвердости** предназначен для определения твердости структурных составляющих и фаз в металлах, а также очень тонких поверхностных слоев и покрытий толщиной в сотые доли миллиметра. Метод измерения микротвердости аналогичен методу Виккерса. Различие в том, что в данном методе четырехгранная пирамида имеет меньшие размеры, и используются меньшие нагрузки: от 5 до 500 г. Прибор для измерения микротвердости имеет обозначение ПМТ-3.

К современным методам оценки сопротивления материала вдавлению относится *наноиндентирование*, когда с помощью трехгранной или четырехгранной алмазной пирамиды, внедряемой в испытуемый образец с нагрузкой от 0,01 Н до 0,30 Н, строится диаграмма нагружения и снятия нагрузки, позволяющая оценить характеристики мельчайших структурных составляющих – наноразмерных объектов (рис. 1.11).

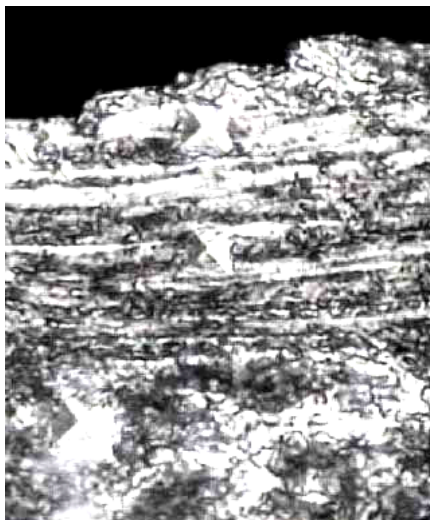


Рис. 1.11. Отпечатки нанотвердости на поперечном шлифе стали 60 ($\times 1000$)

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

Для проведения испытания образец устанавливают на маятниковом копре надрезом в сторону, противоположную удару маятника, который поднимают на определенную высоту (рис. 1.12).

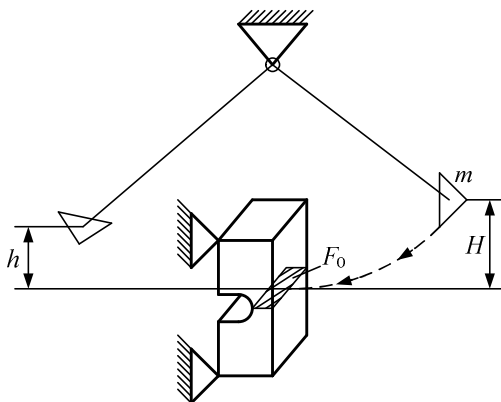


Рис. 1.12. Схема испытания на ударную вязкость (маятниковый копр):
 m – вес маятника; H – первоначальная высота подъема маятника;
 h – высота взлета маятника после удара; F – площадь сечения образца

На разрушение образца затрачивается работа, Дж:

$$A = P(H - h), \quad (1.8)$$

где P – вес маятника, кг;

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

Значение ударной вязкости определяется по формуле

$$KCV = \frac{A}{F_0}, \quad (1.9)$$

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

Известно, что большая часть поломок деталей машин вызвана усталостью материала. Как правило, усталостное разрушение происходит как бы внезапно, без заметных признаков пластической деформации. Усталостное разрушение развивается в деталях, работающих при напряжениях меньше предела текучести металла (σ_T). Образование усталостной трещины связано со строением металла – наличием различно ориентированных зерен, неметаллических включений, пор, дислокаций и других дефектов кристаллической решетки. Свойство металла сопротивляться усталости называется выносливостью.

Методика выполнения практической работы

Указания по самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме практической работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы», раздел «Механические свойства материалов»).

2. Подготовить отчет с кратким конспектом теоретического материала.

Задание 1. Выполнить макроанализ конструкционных материалов.

Порядок выполнения работы:

1. Провести макроанализ образцов конструкционных материалов.

1.1. Получить у преподавателя по индивидуальному заданию образцы материалов.

1.2. Провести органолептический анализ и описать свойства предложенных образцов материалов. Результаты представить в форме письменного отчета.

2. Оценить твердость материалов по методу Мооса.

2.1. Получить у преподавателя по индивидуальному заданию образцы материалов.

2.2. Получить у преподавателя резцы из сверхпрочного сплава и определить их твердость по табл. 1.2.

2.3. С помощью резцов по методу Мооса определить твердость предложенных образцов материалов. Результаты представить в форме письменного отчета.

3. Выполнить поиск механических характеристик металлов и сплавов в сети Интернет по индивидуальному заданию (табл. 1.3). Результаты представить в форме письменного отчета.

Таблица 1.3

Индивидуальные задания для поиска механических характеристик металлов и сплавов

№ варианта	Наименование материала	№ варианта	Наименование материала
1	Алюминий	11	Титан
2	Медь	12	Свинец

№ варианта	Наименование материала	№ варианта	Наименование материала
3	Никель	13	Олово
4	Цинк	14	Бериллиевая бронза
5	Золото	15	Латунь
6	Серебро	16	Электротехническая сталь
7	Платина	17	Нержавеющая сталь
8	Железо	18	Нихром
9	Кобальт	19	Серый чугун
10	Хром	20	Белый чугун

Задание 2. Изучить способы выбора конструкционных материалов по их механическим свойствам.

Порядок выполнения работы:

1. Ответить на вопросы, используя таблицы механических свойств (приложение 1).

1.1. Проанализировать табл. П1.1 и ответить на вопрос: из какой марки магния должны быть сделаны диски, если в процессе эксплуатации они подвергаются давящей вертикальной нагрузке?

1.2. Проанализировать табл. П1.2 и ответить на вопрос: алюминий какой марки надо использовать для изготовления деталей, если в процессе эксплуатации они будут подвергаться растягивающей нагрузке?

1.3. Проанализировать табл. П1.3 и ответить на вопрос: где в электротехнике (технике) могут быть использованы наиболее прочные шпильки класса 12.9?

1.4. Проанализировать табл. П1.4 и ответить на вопрос: из какого вида алюминия следует делать тонкую проволоку?

1.5. Проанализировать табл. П1.5 и ответить на вопрос: какие сорта дерева были бы наиболее подходящими для строительства дома? По заданию преподавателя сравнить по твердости металлы и сорта древесины.

1.6. Проанализировать табл. П1.6–П1.8 и ответить на вопросы:
– какой из металлов при растяжении растрескается раньше остальных?

- в каком металле растрескивание произойдет последним?
- из какого металла предпочтительнее сделать резец?
- из какого металла можно вытянуть наиболее тонкую проволоку?
- из какого металла можно раскатать наиболее тонкий лист?

Результаты представить в форме письменного отчета.

2. Решить задачи по практическому применению конструкционных материалов. Ответить на вопросы, используя поиск в сети Интернет.

2.1. Какая механическая характеристика металла должна быть максимальной при использовании его для изготовления пружины пружинных весов. Какой металл для этого используют?

2.2. Какая механическая характеристика металла должна быть максимальной при использовании его для изготовления лезвия ко-сы? Какой металл для этого используют?

2.3. Дан набор резцов из неизвестных материалов. По какому методу следует определить наиболее твердый из них?

2.4. Три сплава исследованы методом Бринелля, стальной шарик оставил в образцах отпечатки площадями 110, 130 и 150 отн. единиц площади соответственно. Какой образец наиболее твердый?

Результаты представить в форме письменного отчета.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам выполнения заданий 1 и 2. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Письменный отчет по результатам выполнения заданий 1 и 2.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое микро- и макроанализ?
2. Какие материалы относятся к конструкционным?
3. Перечислите основные группы конструкционных материалов?
4. Приведите примеры материалов, используемых в конструкциях электротрансформаторов и линий электропередач.

5. Какие группы свойств конструкционного материала выделяют для его характеристики?
6. Какими стандартными характеристиками механических свойств оцениваются металлы и сплавы?
7. Какие из конструкционных материалов исторически наиболее долго использует человек и какие из материалов являются наиболее перспективными? Как по времени менялось отношение человека к материалам натуральным и синтетическим?
8. Как проводятся микро- и макроанализ?
9. Как определяется твердость? Описать принципиальную общую схему всех методов.
10. Дайте описание основным характеристикам механических свойств, которые определяются при испытании на растяжение.
11. Укажите основные отличия металлов от неметаллов.
12. Какими основными механическими, технологическими, физическими и химическими свойствами обладают металлы?
13. Какой метод изучения структуры наиболее точный?
14. Опишите кратко методы определения твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.
15. Что такое индентор? Перечислите инденторы для методов определения твердости по Моосу, Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу.

Практическая работа № 2

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР МЕТАЛЛОВ. ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Цель работы: изучить кристаллическую структуру металлов.

Задачи работы:

1. Изучить основные типы кристаллических структур металлов
2. Изучить основные типы дефектов кристаллических структур.

Краткие теоретические сведения

Типы кристаллических решеток металлов

В твердых телах атомы могут размещаться в пространстве двумя способами:

1) беспорядочное расположение атомов, когда они не занимают определенного места друг относительно друга. Такие тела называются **аморфными**. Аморфные вещества обладают формальными признаками твердых тел, то есть они способны сохранять постоянный объем и форму. Однако они не имеют определенной температуры плавления или отвердевания.

2) возможно упорядоченное расположение атомов, когда атомы занимают в пространстве только определенные места. Такие вещества называются **кристаллическими**. Благодаря упорядоченному расположению атомов в пространстве, их центры можно соединить воображаемыми прямыми линиями. Совокупность таких пересекающихся линий представляет пространственную решетку, которую называют **кристаллической решеткой**.

Атомы не жестко закреплены в своих положениях, а совершают относительно своего среднего положения колебания с частотой около 10^{13} Гц. Амплитуда этих колебаний пропорциональна температуре.

Все металлы являются кристаллическими телами, имеющими определенный тип кристаллической решетки, состоящей из неподвижных положительно заряженных ионов, между которыми движутся свободные электроны (так называемый **электронный газ**). Такой тип структуры называется **металлической связью**.

Тип решетки определяется элементарным параллелограммом (элементарной ячейкой), многократное повторение которой по

трем пространственным осям образует решетку данного кристаллического тела.

Металлы имеют относительно сложные типы кубических решеток: объемноцентрированная (ОЦК) и гранецентрированная (ГЦК) кубические и гексагональная плотноупакованная (ГПУ). На рис. 2.1 представлены типы кристаллических решеток.

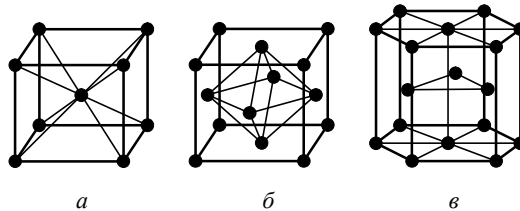


Рис. 2.1. Наиболее распространенные кристаллические решетки металлов: *a* – объемноцентрированная кубическая; *б* – гранецентрированная кубическая; *в* – гексагональная плотноупакованная

Основу ОЦК-решетки составляет элементарная кубическая ячейка (рис. 2.1, *a*), в которой положительно заряженные ионные остовы атомов металла находятся в вершинах куба и еще один остов в центре объема куба, то есть на пересечении его диагоналей. Такой тип решетки в определенных диапазонах температур имеют железо, хром, ванадий, вольфрам, молибден и другие металлы.

У ГЦК-решетки (рис. 2.1, *б*) элементарной ячейкой служит куб с центрированными гранями. Подобную решетку имеют железо, алюминий, медь, никель, свинец и другие металлы.

В ГПУ-решетке (рис. 2.1, *в*) атомы расположены в вершинах и в центре шестигранных оснований призмы, а три атома – в средней плоскости призмы. Такую решетку имеют магний, цинк, кадмий, бериллий, титан и др.

Решетки описываются набором особых характеристик.

Параметр решетки – это расстояние между атомами по ребру элементарной ячейки. Параметр решетки измеряется в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10 \text{ \AA}$).

Параметры кубических решеток характеризуются длиной ребра куба и обозначаются буквой *a*.

Для характеристики гексагональной решетки принимают два параметра – сторону шестиугольника *a* и высоту призмы *c*. Для гексагональной плотноупакованной решетки отношение $c/a = 1,633$.

Некоторые металлы имеют гексагональную решетку с менее плотной упаковкой атомов ($c/a > 1,633$). Например, для цинка $c/a = 1,86$, для кадмия $c/a = 1,88$.

Параметр a кубических решеток металлов находится в пределах от 0,286 до 0,607 нм. Для металлов с гексагональной решеткой a лежит в пределах 0,228–0,398 нм, c – в пределах 0,357–0,652 нм.

Параметры кристаллических решеток металлов могут быть измерены с помощью рентгеноструктурного анализа.

При подсчете числа атомов в каждой элементарной ячейке следует иметь в виду, что каждый атом входит одновременно в несколько ячеек. Например, для ГЦК-решетки каждый атом, находящийся в вершине куба, принадлежит 8 ячейкам, а атом, центрирующий грань, – двум. И лишь атом, находящийся в центре куба, полностью принадлежит данной ячейке. Таким образом, ОЦК-ячейки и ГЦК-ячейки содержат соответственно 2 и 4 атома.

Под *координационным числом* понимается количество ближайших соседей данного атома (рис. 2.2).

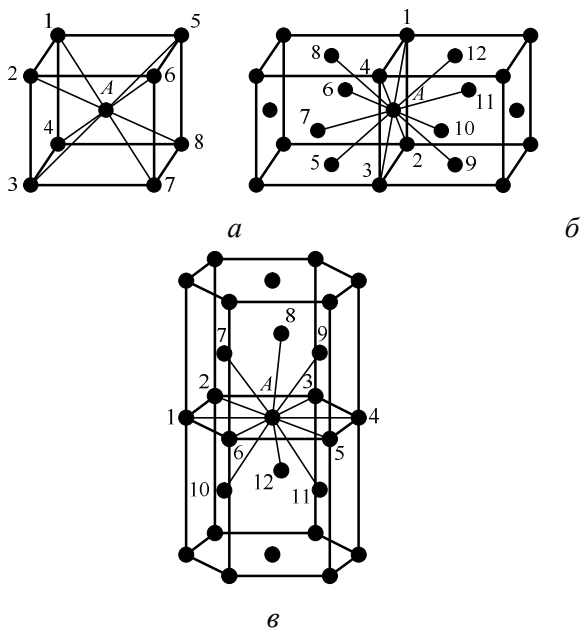


Рис. 2.2. Вычисление координационного числа атомов в различных решетках: a – объемноцентрированная кубическая; b – гранецентрированная кубическая; v – гексагональная плотноупакованная

В ОЦК-решетке (рис. 2.2, *а*) атом А (в центре) находится на наиболее близком равном расстоянии от восьми атомов, расположенных в вершинах куба, то есть координационное число этой решетки равно 8 (К8).

В ГЦК-решетке (рис. 2.2, *б*) атом А (на грани куба) находится на наиболее близком равном расстоянии от четырех атомов 1, 2, 3, 4, расположенных в вершинах куба, от четырех атомов 5, 6, 7, 8, расположенных на гранях куба, и, кроме того, от четырех атомов 9, 10, 11, 12, принадлежащих расположенной рядом кристаллической ячейке. Атомы 9, 10, 11, 12 симметричны атомам 5, 6, 7, 8. Таким образом, для ГЦК-решетки координационное число равно 12 (К12).

В ГПУ-решетке при $c/a = 1,633$ (рис. 2.2, *в*) атом А в центре шестигранного основания призмы находится на наиболее близком равном расстоянии от шести атомов 1, 2, 3, 4, 5, 6, размещенных в вершинах шестигранника, и от трех атомов 7, 8, 9, расположенных в средней плоскости призмы. Кроме того, атом А оказывается на таком же расстоянии еще от трех атомов 10, 11, 12, принадлежащих кристаллической ячейке, лежащей ниже основания. Атомы 10, 11, 12 симметричны атомам 7, 8, 9. Следовательно, для ГПУ-решетки координационное число равно 12 (Г12).

Плотность упаковки представляет собой отношение суммарного объема, занимаемого собственно атомами в кристаллической решетке, к ее полному объему. Различные типы кристаллических решеток имеют разную плотность упаковки атомов. В ГЦК-решетке атомы занимают 74 % всего объема кристаллической решетки, а межатомные промежутки («поры») – 26 %. В ОЦК-решетке атомы занимают 68 % всего объема, а «поры» – 32 %. Компактность решетки зависит от особенностей электронной структуры металлов и характера связи между их атомами.

От типа кристаллической решетки сильно зависят свойства металла.

Дефекты кристаллической решетки металла

Кристаллическая решетка, в которой отсутствуют нарушения порядка и все узлы заполнены однородными атомами называется идеальной кристаллической решеткой металла.

В решетке реального металла могут находиться различные дефекты.

Все дефекты кристаллической решетки принято делить на точечные, линейные, поверхностные и объемные.

Точечные дефекты соизмеримы с размерами атомов (рис. 2.3).

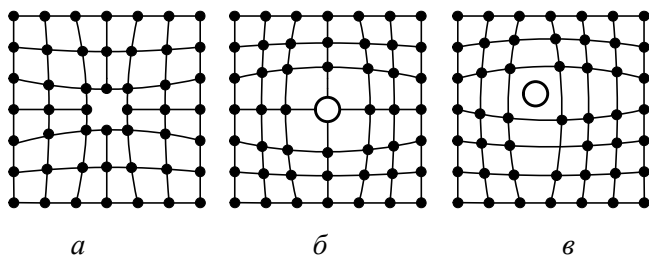


Рис. 2.3. Точечные дефекты:

a – вакансия; *б* – примесные атомы замещения; *в* – примесные атомы внедрения

К точечным дефектам относятся вакансии (рис. 2.3, *a*), то есть незаполненные узлы решетки, примесные атомы замещения (рис. 2.3, *б*), то есть атомы, по диаметру соизмеримые с атомами данного металла, и атомы внедрения, находящиеся в междоузлиях – примесные либо собственные (рис. 2.3, *в*). Влияние этих дефектов на прочность металла может быть различным в зависимости от их количества в единице объема и характера.

Линейные дефекты имеют длину, значительно превышающую их поперечные размеры. К ним относятся *дислокации*, то есть дефекты, образующиеся в решетке в результате смещений кристаллографических плоскостей.

Дислокации бывают двух видов. Наиболее характерной является *краевая дислокация* (рис. 2.4).

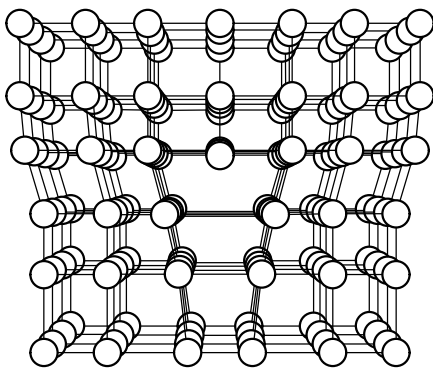


Рис. 2.4. Схема краевой дислокации в идеальном кристалле

Она образуется в результате возникновения в решетке так называемой полуплоскости или экстраплоскости. Нижний ряд экстраплоскости собственно и принято называть дислокацией.

Другим типом дислокации является *винтовая дислокация*, которая представляет собой некоторую условную ось внутри кристалла, вокруг которой закручены атомные плоскости (рис. 2.5).

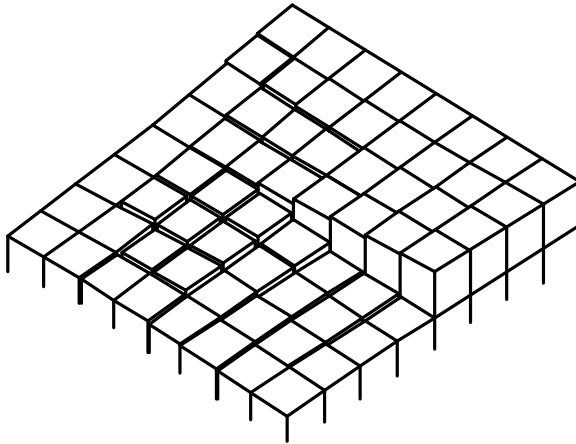


Рис. 2.5 Схема винтовой дислокации

В винтовой дислокации, так же как в краевой, существенные искажения кристаллической решетки наблюдаются только вблизи оси, поэтому такой дефект может быть отнесен к линейным.

Дислокации обладают высокой подвижностью, поэтому существенно уменьшают прочность металла, так как облегчают образование сдвигов в зернах-кристаллитах под действием приложенных напряжений. Дислокационный механизм сдвиговой пластической деформации внутри кристаллов может привести к разрушению изделия. Таким образом, дислокации непосредственно влияют на прочностные характеристики металла. Для оценки этого влияния используется плотность дислокаций, под которой принято понимать отношение суммарной длины дислокаций к объему содержащего их металла. Плотности дислокаций измеряются в см^{-2} или м^{-2} .

При плотности дислокаций 10^6 – 10^7 см^{-2} прочность минимальна. Это объясняется тем, что с ростом плотности дислокаций их передвижение происходит не только по параллельным, но и по пересекающимся

плоскостям, что существенно затрудняет процесс деформирования зерен. Максимальная плотность дислокаций может составить 10^{13} см^{-2} . При дальнейшем росте плотности дислокаций происходит разрушение металла.

Поверхностные дефекты чаще встречаются на границах зерен (рис. 2.6).

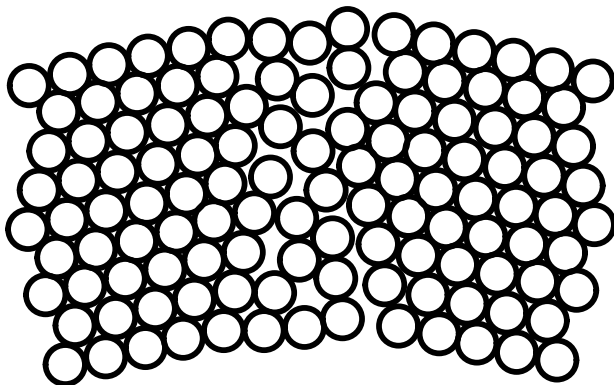


Рис. 2.6. Структура границы двух соседних кристаллических зерен

На границах кристаллическая решетка сильно искажена. В них скапливаются перемещающиеся изнутри зерен дислокации.

Из практики известно, что мелкозернистый металл прочнее крупнозернистого, так как у последнего меньше суммарная протяженность (площадь) границ. Можно сделать вывод, что поверхностные дефекты способствуют повышению прочности металла. Поэтому создано несколько технологических способов получения мелкозернистых сплавов: искусственное увеличение центров кристаллизации в расплаве, медленное охлаждение расплава и некоторые другие.

Объемные дефекты кристаллической решетки включают трещины и поры. Наличие данных дефектов, уменьшая плотность металла, снижает его прочность. Кроме того, трещины являются сильными концентраторами напряжений, в десятки и более раз повышающими напряжения, создаваемые в металле рабочими нагрузками. Последнее обстоятельство наиболее существенно влияет на прочность металла.

Методика выполнения практической работы

Указания по самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме практической работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы», раздел «Кристаллическое строение металлов»).
2. Подготовить отчет с кратким конспектом теоретического материала.

Задание. Изучить дефекты кристаллических решеток металлов.

Порядок выполнения работы:

1. По заданию преподавателя нарисовать кристаллическую решетку с дефектом:
 - кубическую объемноцентрированную решетку с дефектом внедрения;
 - кубическую гранецентрированную решетку с дефектом замещения.
 2. По заданию преподавателя определить типы дефектов кристаллической структуры металлов.
 - 2.1. Из приложения 2 выбрать вариант индивидуального задания.
 - 2.2. Определить и описать все типы дефектов.
- Результаты представить в форме письменного отчета.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам выполнения задания. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Письменный отчет по результатам выполнения задания.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое кристаллическая структура?
2. Какими параметрами описывают тип кристаллической структуры?
3. Какие основные типы кристаллических решеток металлов вы знаете?
4. Что такое плотность упаковки структуры?
5. Дайте определение элементарной ячейки.
6. Что такое монокристалл и поликристалл?
7. Что такое полиморфизм?
8. Что такое полиморфные модификации?
9. Что такое анизотропия свойств в кристаллах, чем она обусловлена? Приведите пример.
10. Опишите физическую сущность и механизм процесса кристаллизации.
11. Как влияет степень чистоты металла или наличие примесей в сплаве на протекание процесса кристаллизации?
12. От каких основных факторов зависит величина зерна металла и почему?
13. Опишите способы получения мелкозернистого металла из расплава.
14. Опишите способы улучшения качества металла при выплавке.
15. В чем сходство и различие кристаллических металлических и кристаллических неметаллических материалов?
16. Что такое текстурирование?
17. Опишите сущность кристаллизации по двум разным схемам кристаллизации (гомогенная и гетерогенная).
18. Изобразите кривую охлаждения (нагрева) чистого металла и аморфного материала.
19. Перечислите виды дефектов кристаллической структуры.
20. Перечислите виды точечных дефектов.
21. В чем состоит существенная разница между строением аморфных и кристаллических тел?
22. Что такое параметр решетки?

23. Почему поликристаллические тела являются изотропными?
24. Что представляют собой краевые дислокации? Какова их роль в протекании пластической деформации металла и как они влияют на его прочность?
25. Что такое плотность дислокаций и как она влияет на характер изменения прочности металла?
26. Что такое координационное число?
27. Сколько параметров необходимо, чтобы задать элементарную ячейку?
28. Какой вид точечных дефектов способствуют диффузии атомов?

Практическая работа № 3 МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ. СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ

Цель работы: ознакомиться с некоторыми основными понятиями теории сплавов.

Задачи работы:

1. Изучить некоторые типы сплавов.
2. Изучить основные методы получения и обработки сплавов.
3. Получить навыки работы с диаграммами состояний сплавов.

Краткие теоретические сведения

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

Четкую границу между металлами и сплавами провести трудно, так как даже в чистых металлах имеются «следовые» примеси других элементов. Однако обычно под сплавами понимают целенаправленно получаемые материалы, когда к основному металлу добавляют другие компоненты.

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

Способы получения сплавов:

1. Затвердевание однородной смеси из расплавленных компонентов – самый распространенный способ получения сплавов.
2. Порошковая металлургия (спекание порошков компонентов).
3. Соосаждение компонентов из газовой фазы.

По характеру взаимодействия компонент различают следующие виды сплавов:

- 1) **Механические смеси** – в двухкомпонентных системах компоненты A и B химически не взаимодействуют.
- 2) **Твердые растворы** – сплав, в котором в твердом виде компонент B растворен в кристаллической решетке компонента A .
- 3) **Химические соединения** – это сплав с определенным соотношением компонент A_nB_m .

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

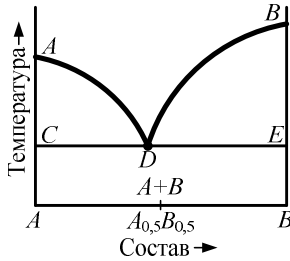
Сплав может состоять из одной фазы, то есть быть гомогенным. Сплав, состоящий из нескольких фаз, называется гетерогенным.

Простейшие диаграммы состояний сплавов. Для описания взаимодействия компонент сплавов в зависимости от температуры используют фазовые диаграммы.

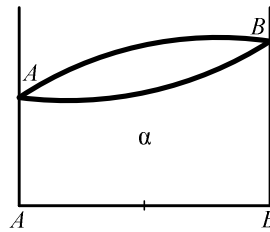
Фазовая диаграмма – это чертеж, где отражается фазовый состав и структура сплава в зависимости от концентрации компонент и температуры.

Простейшие диаграммы состояний 2-компонентной системы:

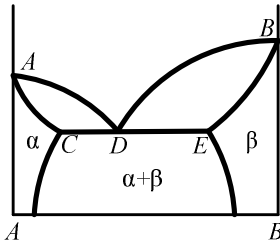
- 1) механическая смесь: в твердом состоянии компоненты (фазы) не-растворимы, растворимость только в жидком состоянии (рис. 3.1, а);
- 2) неограниченная взаимная растворимость фаз (рис. 3.1, б);
- 3) ограниченная растворимость компонент (рис. 3.1, в);
- 4) химическое соединение (рис. 3.1, г).



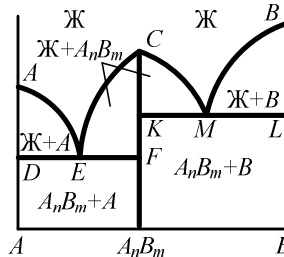
а



б



в



г

Рис. 3.1. Фазовые диаграммы:

а – механическая смесь; б – неограниченная взаимная растворимость фаз;

в – ограниченная растворимость компонент; г – химическое соединение

Эвтектика – равновесие жидкой фазы и двух или более твердых фаз. Свойство образовывать эвтектику характерно для систем, в которых взаимная растворимость компонентов в жидком состоянии не ограничена, а в твердом – ограничена или отсутствует.

Способы обработки металлов и сплавов.

1. Термическая обработка.
2. Механическая (термомеханическая).
3. Химическая (химико-термическая или термохимическая).

Термической (тепловой) обработкой называются процессы, сущность которых заключается в нагреве и охлаждении изделий по определенным режимам, в результате чего происходят изменения структуры, фазового состава, механических и физических свойств материала, без изменения химического состава.

Основные виды термической обработки металлов и сплавов: закалка, отжиг, отпуск и старение.

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

Отжиг – термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла до определенных температур, выдержке его при некоторой температуре и последующее медленное охлаждения вместе с печью. Применяют разнообразные формы отжига:

Отжиг первого рода. Это отжиг, при котором не происходит фазовых превращений, а если они имеют место, то не оказывают влияния на конечные результаты, предусмотренные целевым назначением отжига. Различают разновидности отжига первого рода: гомогенизационный и рекристаллизационный. Гомогенизационный – это отжиг с длительной выдержкой при температуре выше 950 °С (обычно 1100 °С–1200 °С) с целью выравнивания химического состава. Рекристаллизационный – это отжиг наклепанного сплава при температуре, превышающей температуру начала рекристаллизации, с целью устранения наклепа и получения определенной величины зерна.

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

Отпуск заключается в нагреве сплава до различных температур (в зависимости от вида отпуска, но всегда ниже критической точки),

выдержке при этой температуре и охлаждении с разными скоростями. Отпуск применяется к сплавам, которые подвергнуты закалке с полиморфным превращением. Назначение отпуска – получить необходимую кристаллическую структуру.

Старение – термическая обработка, при которой происходит распад пересыщенного твердого раствора. Старение применяется к материалам, подвергнутым закалке без полиморфного превращения. Иногда старение – это просто выдержка при комнатной температуре (выделяется излишек растворенного компонента). В результате старения происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска, после старения увеличиваются прочность и твердость, и уменьшается пластичность.

Механическая обработка – осуществляется при помощи пластического деформирования металла.

Пластическая деформация – деформация, сохраняющаяся после снятия нагрузки.

Механизм пластической деформации – скольжение дислокаций.

Пластическая деформация в кристалле осуществляется путем сдвига одной его части относительно другой (рис. 3.2).

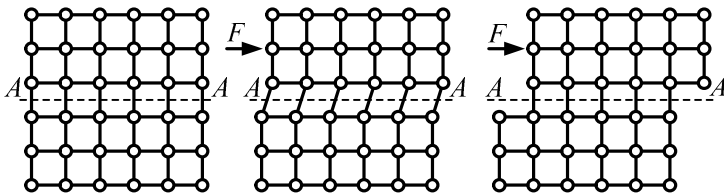


Рис. 3.2. Дислокационный механизм механической обработки кристалла

Сдвиг вызывают касательные напряжения, когда их значение превышает некое критическое. Пластическое деформирование осуществляется путем последовательного перемещения дислокаций. Так как в плоскости скольжения движутся сотни дислокаций, то в результате их выхода на поверхность образуются ступеньки, изменяющие форму каждого зерна. Зерна вытягиваются в направлении пластического течения.

При дальнейшей нагрузке движущиеся дислокации встречаются с препятствиями (точечными дефектами, другими дислокациями и др.) и тормозятся этими препятствиями или огибают их. При этом плотность дислокаций увеличивается, мешая дальнейшему движению

дислокаций. Поэтому для осуществления дальнейшей деформации требуется увеличение нагрузки.

То есть металл может выдерживать увеличенную нагрузку – он упрочняется. Это явление называется наклепом.

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

На последней стадии деформации на границе зерен в местах скопления дислокаций образуются зародыши разрушения – микротрещины. При дальнейшей нагрузке одна из микротрещин увеличивается и происходит разрушение детали.

Химико-термическая обработка металлов – тепловая обработка металлических изделий в химически активных средах для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностных слоев металла (без изменения состава, структуры и свойств его сердцевидных зон).

К основным видам химико-термической обработки относятся:

– **цементация** – насыщение поверхности детали из малоуглеродистой стали углеродом до 0,4 %–0,5 % с целью поверхностного упрочнения деталей. Насыщение углеродом дает возможность последующей закалки, так как малоуглеродистые стали не закаляются;

– **азотирование** – насыщение поверхности стали азотом для повышения твердости, износостойкости, усталостной прочности и коррозионной способности (образуются нитриды металлов);

– **цианирование** (нитроцементация) – насыщение поверхностного слоя изделий одновременно углеродом и азотом;

– **борирование** – насыщение поверхности детали бором и последующая закалка для повышения твердости, коррозионной стойкости, жаростойкости и износостойкости при высоких температурах;

– **алитирование** – насыщение поверхности детали алюминием, который образует впоследствии защитную окисную пленку, для повышения окалинностойкости деталей.

Методика выполнения практической работы

Указания по самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме практической работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы», раздел «Способы обработки металлов и сплавов»).

2. Подготовить отчет с кратким конспектом теоретического материала.

Задание 1. Изучить способы обработки сплавов.

Порядок выполнения работы:

1. Выполнить закалку сплава.

1.1. Изучить порядок работы и правила техники безопасности при работе с муфельной печью с терморегулятором согласно паспорту.

1.2. По индивидуальному заданию получить у преподавателя образец сплава (пластина из стали), емкость большого объема, спецодежду, рукавицы, клещи.

1.3. Наполнить емкость водой.

1.4. Установить с помощью терморегулятора значение температуры закалки 850 °С. Включить печь на разогрев и дождаться нагрева печи до указанной температуры.

1.5. Внести в печь стальную пластину. Выдержать ее в печи в течение 10 мин (до уравнивания температуры внутри печи и пластины).

1.6. Клещами достать пластину и резко охладить в емкости с водой.

1.7. После закалки сравнить структуру закаленного стального листа со структурой такого же незакаленного листа стали. Описать технологию процесса закалки стали. Результаты представить в форме письменного отчета.

2. Выполните задание и ответьте на вопрос.

2.1. Детали из меди, штампованные в холодном состоянии, имели низкую пластичность. Объясните причину этого явления и укажите, каким способом можно восстановить пластичность.

2.2. Можно ли сплав, многократно обработанный давлением (наклеп), использовать для изготовления пружин?

Результаты представить в форме письменного отчета.

Задание 2. Приобрести навыки работы с диаграммами состояний сплавов.

Порядок выполнения работы:

1. Описать простейшие диаграммы состояний сплавов.

1.1. По заданию преподавателя нарисовать диаграмму состояний сплава (приложение 3).

1.2. Расшифровать обозначения и дать краткую характеристику диаграммы состояний сплава.

Результаты представить в форме письменного отчета.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам выполнения заданий 1 и 2. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Рис. 3.1.
4. Письменный отчет по результатам выполнения заданий 1 и 2.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое монокристалл и поликристалл?
2. Что такое полиморфизм?
3. От каких факторов зависит состояние материала?
4. Как происходит образование твердого кристаллического вещества из расплава?
5. Что такое текстурирование?
6. Назовите две схемы кристаллизации.
7. Изобразите кривую охлаждения (нагрева) чистого металла.
8. Опишите способы получения мелкозернистого металла из расплава.
9. Что такое сплав?
10. Перечислите основные способы получения сплавов.
11. Что называют компонентами сплава?
12. Дайте определение понятию фаза сплава.
13. Перечислите и охарактеризуйте виды сплавов.
14. Дайте определение и приведите примеры твердых растворов.
15. Что такое гомогенный сплав?
16. Что такое гетерогенный сплав?
17. Что такое диаграмма состояний сплава?
18. В каких осях строится диаграмма состояния?
19. Начертите диаграмму состояния для случая неограниченной растворимости двух компонентов в твердом виде.

20. Начертите диаграмму состояния для непрерывного ряда твердых растворов в двухкомпонентной системе.
21. Что такое эвтектика?
22. Начертите диаграмму состояния для случая полной нерастворимости компонент и образования эвтектики.
23. Начертите диаграмму состояния для случая образования эвтектики, в случае ограниченной растворимости компонент (образование ограниченных твердых растворов по краям).
24. Начертите диаграмму состояния химического соединения.
25. Перечислите основные способы обработки сплавов.
26. Что такое наклеп?
27. Как и почему изменяется плотность дислокаций при пластической деформации?
28. Что такое термохимическая обработка?
29. Перечислите виды термохимической обработки.
30. Перечислите основные способы термообработки сплавов.
31. Объясните сущность закалки.
32. Объясните сущность процесса отжига.
33. Объясните сущность процесса старения.
34. Объясните сущность процесса отпуска.

Практическая работа № 4

СТАЛИ, ЧУГУНЫ: КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ МАРКИРОВКИ

Цель работы: изучить классификацию, область применения и методы маркировки сталей и чугунов.

Задачи работы:

1. Изучить общую классификацию сталей и чугунов.
2. Ознакомиться с основными видами маркировок сталей и чугунов и областью их применения.
3. Научиться расшифровывать состав стали по маркировке.

Краткие теоретические сведения

Классификация сталей

Сталь – деформируемый (ковкий) сплав железа с углеродом (до 2,14 %) и другими элементами. Получают их, главным образом, из смеси чугуна со стальным ломом в кислородных конвертерах, мартеновских печах и электропечах.

Сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14 % углерода, называют **чугуном**.

99 % всей стали – материал конструкционный в широком смысле слова: включая стали для строительных сооружений, деталей машин, упругих элементов, инструмента и для особых условий работы – теплостойкие, нержавеющей и т. п. Ее главные качества – прочность (способность выдерживать при работе достаточные напряжения), пластичность (способность выдерживать достаточные деформации без разрушения как при производстве конструкций, так в местах перегрузок при их эксплуатации), вязкость (способность поглощать работу внешних сил, препятствуя распространению трещин), упругость, твердость, усталость, трещиностойкость, хладостойкость, жаропрочность.

Классификация сталей и сплавов производится:

- по химическому составу;
- по структурному составу;

- по качеству (по способу производства и содержанию вредных примесей);
- по степени раскисления и характеру затвердевания металла в изложнице;
- по назначению (рис. 4.1).

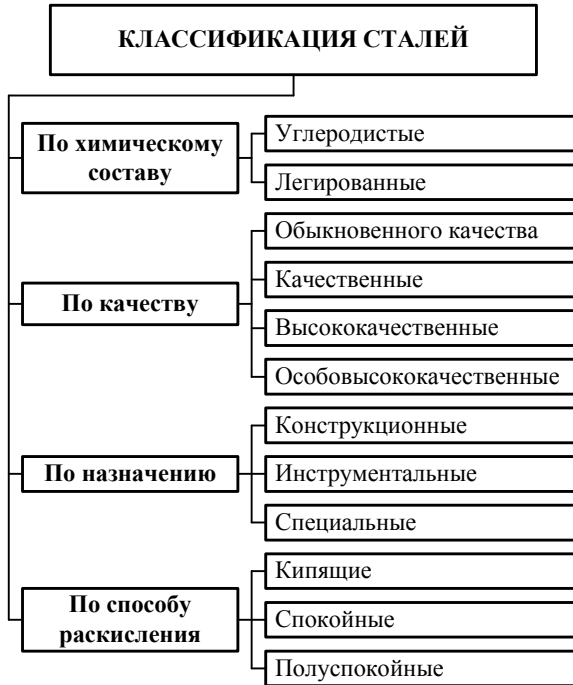


Рис. 4.1. Классификация сталей

Классификация сталей по химическому составу

По химическому составу углеродистые стали делят в зависимости от содержания углерода С на следующие группы:

- малоуглеродистые – менее 0,3 % С;
- среднеуглеродистые – 0,3 %–0,7 % С;
- высокоуглеродистые – более 0,7 % С (обычно не более 0,86 %).

Для улучшения технологических свойств стали легируют. *Легирующей* называется сталь, в которой, кроме обычных примесей,

содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.), а также Mn и Si в количествах, превышающих их обычное содержание как технологических примесей (1 % и выше). Как правило, лучшие свойства обеспечивает комплексное легирование.

В легированных сталях их классификация по химическому составу определяется суммарным процентом содержания легирующих элементов:

- низколегированные – менее 2,5 %;
- среднелегированные – 2,5 %–10,0 %;
- высоколегированные – более 10 %.

Классификация сталей по структуре

Легированные стали и сплавы делятся также на классы по структурному составу:

- в отожженном состоянии – доэвтектоидный, заэвтектоидный, ледебуритный (карбидный), ферритный, аустенитный;
- в нормализованном состоянии – перлитный, мартенситный и аустенитный.

К перлитному классу относят углеродистые и легированные стали с низким содержанием легирующих элементов, к мартенситному – с более высоким и к аустенитному – с высоким содержанием легирующих элементов.

Классификация сталей по содержанию примесей

По качеству, то есть по способу производства и содержанию вредных примесей (серы и фосфора), стали и сплавы делятся на четыре группы (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Классификация сталей по качеству

Группа	Содержание примесей	
	Серы S, %	Фосфора P, %
Обыкновенного качества (рядовые)	менее 0,060	менее 0,070
Качественные	менее 0,040	менее 0,035
Высококачественные	менее 0,025	менее 0,025
Особовысококачественные	менее 0,015	менее 0,025

Стали обыкновенного качества (рядовые) по химическому составу – углеродистые стали, содержащие до 0,6 % С. Эти стали выплавляются в конвертерах с применением кислорода или в больших мартеновских печах. Примером данных сталей могут служить стали СтО, СтЗсп, Ст5кп. Стали обыкновенного качества, являясь наиболее дешевыми, уступают по механическим свойствам сталям других классов.

Стали высококачественные выплавляются преимущественно в электропечах, а особо высококачественные – в электропечах с электрошлаковым переплавом или другими совершенными методами, что гарантирует повышенную чистоту по неметаллическим включениям (содержание серы и фосфора менее 0,03 %) и содержанию газов, а следовательно, улучшение механических свойств. Это такие стали, как 20А, 15Х2МА.

Особовысококачественные стали подвергаются электрошлаковому переплаву, обеспечивающему эффективную очистку от сульфидов и оксидов. Данные стали выплавляются только легированными. Их производят в электропечах и методами специальной электрометаллургии. Содержат не более 0,01 % серы и 0,025 % фосфора. Например, 18ХГ-Ш, 20ХГНТР-Ш.

Классификация сталей по назначению

По назначению стали и сплавы классифицируются на конструкционные, инструментальные и стали с особыми физическими и химическими свойствами.

Конструкционные стали принято делить на строительные, для холодной штамповки, цементируемые, улучшаемые, высокопрочные, рессорно-пружинные, шарикоподшипниковые, автоматные, коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие стали.

К *строительным* сталям относятся углеродистые стали обыкновенного качества, а также низколегированные стали. Основное требование к строительным сталям – их хорошая свариваемость. Примеры таких сталей: С255, С345Т, С390К, С440Д.

Для холодной штамповки применяют листовой прокат из низкоуглеродистых качественных марок стали 08Ю, 08пс и 08кп.

Цементируемые стали применяют для изготовления деталей, работающих в условиях поверхностного износа и испытывающих

при этом динамические нагрузки. К цементируемым относятся малоуглеродистые стали, содержащие 0,1 %–0,3 % углерода (такие как 15, 20, 25), а также некоторые легированные стали (15Х, 20Х, 15ХФ, 20ХН 12ХНЗА, 18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА, 18ХГТ, 30ХГТ, 20ХГР).

К *улучшаемым* сталям относят стали, которые подвергают улучшению – термообработке, заключающейся в закалке и высоком отпуске. К ним относятся среднеуглеродистые стали (35, 40, 45, 50), хромистые стали (40Х, 45Х, 50Х), хромистые стали с бором (30ХРА, 40ХР), хромоникелевые, хромокремнемарганцевые, хромоникельмолибденовые стали.

Высокопрочные стали – это стали, у которых подбором химического состава и термической обработкой достигается предел прочности примерно вдвое больший, чем у обычных конструкционных сталей. Такой уровень прочности можно получить в среднеуглеродистых легированных сталях, таких как 30ХГСН2А, 40ХН2МА, 30ХГСА, 38ХНЗМА, ОЗН18К9М5Т, 04ХИН9М2Д2ТЮ.

Пружинные (рессорно-пружинные) стали сохраняют в течение длительного времени упругие свойства, поскольку имеют высокий предел упругости, высокое сопротивление разрушению и усталости. К пружинным относятся углеродистые стали (65, 70) и стали, легированные элементами, которые повышают предел упругости – кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом, ванадием, бором (60С2, 50ХГС, 60С2ХФА, 55ХГР).

Подшипниковые (шарикоподшипниковые) стали имеют высокую прочность, износоустойчивость, выносливость. К подшипниковым предъявляют повышенные требования на отсутствие различных включений, макро- и микропористости. Обычно шарикоподшипниковые стали характеризуются высоким содержанием углерода (около 1 %) и наличием хрома (ШХ9, ШХ15).

Автоматные стали используют для изготовления неотчетственных деталей массового производства (винты, болты, гайки и др.), обрабатываемых на станках-автоматах. Эффективным металлургическим приемом повышения обрабатываемости резанием является введение в сталь серы, селена, теллура, а также свинца, что способствует образованию короткой и ломкой стружки, а также уменьшает трение между резцом и стружкой. Недостаток автоматных сталей – пониженная пластичность. К автоматным сталям относятся такие стали, как А12, А20, А30, А40Г, АС11, АС40, АЦ45Г2, АСЦ30ХМ, АС20ХГНМ.

Износостойкие стали применяют для деталей, работающих в условиях абразивного трения, высокого давления и ударов (крестовины железнодорожных путей, траки гусеничных машин, щеки дробилок, черпаки землеройных машин, ковши экскаваторов и др.). Пример износостойкой стали – высокомарганцовистая сталь 110Г13Л.

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали – легированные стали с большим содержанием хрома (не менее 12 %) и никеля. Хром образует на поверхности изделия защитную (пассивную) оксидную пленку. Углерод в нержавеющей сталях – нежелательный элемент, а чем больше хрома, тем выше коррозионная стойкость. Структура для наиболее характерных сплавов этого назначения может быть:

- ферритно-карбидной и мартенситной (12X13, 20X13, 20X17H2, 30X13, 40X13, 95X18 – для слабых агрессивных сред (воздух, вода, пар);

- ферритной (15X28) – для растворов азотной и фосфорной кислот;

- аустенитной (12X18НЮТ) – для морской воды, органических и азотной кислот, слабых щелочей;

- мартенситно-стареющей (ЮХ17Н13МЗТ, 09Х15Н8Ю) – для фосфорной, уксусной и молочной кислот.

Сплав 06ХН28МТ может эксплуатироваться в условиях горячих (до 60 °С) фосфорной и серной (концентрации до 20 %) кислот. Коррозионностойкие стали и сплавы классифицируют в зависимости от агрессивности среды, в которой они используются, и по их основному потребительскому свойству на собственно коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные и криогенные.

Изделия из собственно коррозионностойких сталей (лопатки турбин, клапаны гидравлических прессов, пружины, карбюраторные иглы, диски, валы, трубы и др.) работают при температуре эксплуатации до 550 °С.

Жаропрочные стали способны работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и при этом обладают достаточной жаростойкостью. Данные стали и сплавы применяются для изготовления труб, клапанных, паро- и газотурбинных деталей (роторы, лопатки, диски и др.). Для жаропрочных и жаростойких машиностроительных сталей используются малоуглеродистые (0,1 %–0,45 % содержания углерода С) и высоколегированные (Si, Cr, Ni, Со и др.). Жаропрочные стали и сплавы в своем составе обязательно содержат никель, который

обеспечивает существенное увеличение предела длительной коррозионной прочности при незначительном увеличении предела текучести и временного сопротивления, и марганец. Они могут дополнительно легироваться молибденом, вольфрамом, ниобием, титаном, бором, йодом и др. Так, микролегирование бором, а также редкоземельными и некоторыми щелочноземельными металлами повышает такие характеристики, как число оборотов при кручении, пластичность и вязкость при высоких температурах. Рабочие температуры современных жаропрочных сплавов составляют примерно 45 %–80 % от температуры плавления. Эти стали классифицируют по температуре эксплуатации (ГОСТ 20072–74):

– при 400 °С–550 °С – 15ХМ, 12Х1МФ, 25Х2М1Ф, 20Х3МВФ;

– при 500 °С–600 °С – 15Х5М, 40ХЮС2М, 20Х13;

– при 600 °С–650 °С – 12Х18Н9Т, 45Х14Н14В2М, ЮХЦН23ТЗМР. ХН60Ю, ХН70Ю, ХН77ТЮР, ХН56ВМКЮ, ХН62МВМКЮ.

Жаростойкие (окалиностойкие) стали обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах, в том числе серосодержащих, при температурах 550 °С–1200 °С в воздухе, печных газах (15Х5, 15Х6СМ, 40Х9С2, 30Х13Н7С2, 12Х17, 15Х28), окислительных и науглероживающих средах (20Х20Н14С2, 20Х23Н18) и работают в ненагруженном или слабонагруженном состоянии, так как могут проявлять ползучесть при приложении больших нагрузок. Жаростойкие стали характеризуют по температуре начала интенсивного окисления. Величина этой температуры определяется содержанием хрома в сплаве. Так, при 15 % Cr температура эксплуатации изделий составляет 950 °С, а при 25 % Cr – до 130 °С. Жаростойкие стали также легируют никелем, кремнием, алюминием.

Криогенные машиностроительные стали и сплавы по химическому составу являются низкоуглеродистыми (0,10 % С) и высоколегированными (Cr, Ni, Mn и др.) сталями аустенитного класса (08Х18НЮ, 12Х18НЮТ, ОЗХ20Н16АГ6, ОЗХ13АП9 и др.). Основными потребительскими свойствами этих сталей являются пластичность и вязкость, которые с понижением температуры (от +20 °С до –196 °С) либо не меняются, либо мало уменьшаются, то есть не происходит резкого уменьшения вязкости, характерного при хладноломкости. Криогенные машиностроительные стали классифицируют по температуре эксплуатации в диапазоне от –196 °С до –296 °С и используют для изготовления деталей криогенного оборудования.

Инструментальные стали по назначению делят на стали для режущих, измерительных инструментов, штамповые стали.

Стали для режущих инструментов должны быть способными сохранять высокую твердость и режущую способность продолжительное время, в том числе и при нагреве. В качестве сталей для режущих инструментов применяют углеродистые, легированные инструментальные, быстрорежущие стали.

Углеродистые инструментальные стали содержат 0,65 %–1,32 % углерода. Например, стали марок У7, У7А, У13, У13А. К данной группе, помимо нелегированных углеродистых инструментальных сталей, условно относят также стали с небольшим содержанием легирующих элементов, которые не сильно отличаются от углеродистых.

В группу легированных инструментальных сталей входят стали, содержащие легирующие элементы в количестве 1 %–3 %. Легированные инструментальные стали имеют повышенную (по сравнению с углеродистыми инструментальными сталями) теплостойкость – до 300 °С. Наиболее широко используют стали 9ХС (сверла, фрезы, зенкеры), ХВГ (протяжки, развертки), ХВГС (фрезы, зенкеры, сверла больших диаметров).

Быстрорежущие стали применяют для изготовления различного режущего инструмента, работающего на высоких скоростях резания, так как они обладают высокой теплостойкостью – до 650 °С. Наибольшее распространение получили быстрорежущие стали марок Р9, Р18, Р6М5, Р9Ф5, РЮК5Ф5.

Инструментальные стали для измерительных инструментов (плиток, калибров, шаблонов) помимо твердости и износостойкости должны сохранять постоянство размеров и хорошо шлифоваться. Обычно применяют стали У8–У12, Х, 12Х1, ХВГ, Х12Ф1. Измерительные скобы, шкалы, линейки и другие плоские и длинные инструменты изготавливают из листовых сталей 15, 15Х. Для получения рабочей поверхности с высокой твердостью и износостойкостью инструменты подвергают цементации и закалке.

Штамповые стали обладают высокой твердостью и износостойкостью, прокаливаемостью и теплостойкостью.

Стали для штампов холодного деформирования должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и прочностью, сочетающейся с достаточной вязкостью, также должны быть теплостойкими. Например, Х12Ф1, Х12М, Х6ВФ, 6Х5В3МФС,

7ХГ2ВМ. Во многих случаях для изготовления штампов для холодного деформирования используют быстрорежущие стали.

Стали для штампов горячего деформирования должны иметь высокие механические свойства (прочность и вязкость) при повышенных температурах и обладать износостойкостью, окалиностойкостью, разгаростойкостью и высокой теплопроводностью. Примером таких сталей могут служить стали 5ХНМ, 5ХНВ, 4ХЗВМФ, 4Х5В2ФС, 3Х2В8Ф, 4Х2В5МФ.

Валковые стали применяют для рабочих, опорных и прочих валков прокатных станов, бандажей составных опорных валков, ножей для холодной резки металла, обрезных матриц и пуансонов. К валковым сталям относят такие марки стали, как 90ХФ, 9Х1, 55Х, 60ХН, 7Х2СМФ. Требования к стали для валков:

1. Высокая закаливаемость. Для обеспечения высокой закаливемости необходимо использование таких марок стали, устойчивость переохлажденного аустенита которых в обеих областях превращения, по возможности, достаточна для развития мартенситного превращения при минимальных скоростях охлаждения, например, в масле.

2. Глубокая прокаливаемость. Это глубина закаленного слоя или, другими словами, глубина проникновения мартенсита. Она зависит от химического состава, размеров деталей и условий охлаждения. Легирующие элементы, а также увеличение содержания углерода (0,8 %) в стали способствуют увеличению ее прокаливаемости, поэтому необходимую прокаливаемость обеспечивают за счет оптимизации химического состава стали. Для данного типа стали необходима практически сквозная прокаливаемость, так как при этом обеспечивается жесткость валка, без которой затруднительно получение высокой точности проката. Среди элементов, увеличивающих прокаливаемость – кремний и бор.

3. Высокая износостойкость – необходима для безаварийной работы станка. При высокой износостойкости образование абразивных частиц износа не происходит, система подшипников работает более надежно.

4. Высокая контактная прочность. Контактная прочность рабочего слоя валков должна быть выше контактных напряжений, возникающих в процессе прокатки с учетом естественных нагрузок.

5. Минимальная склонность к деформации и короблению в процессе термической обработки и неизменность размеров в процессе эксплуатации.

6. Удовлетворительная обрабатываемость при мехобработке, хорошая шлифуемость и полируемость для обеспечения высокой чистоты поверхности валков и, следовательно, высокого качества поверхности прокатываемого материала.

Основные виды чугунов и их классификация

Чугун – сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14 % углерода и постоянные примеси. Чугуны мало пластичны, не прокатываются и не куются. Они обладают пониженной температурой плавления и хорошими литейными свойствами. За счет этого из чугунов можно делать отливки значительно более сложной формы, чем из сталей.

Классификация чугунов по химическому составу

По химическому составу чугуны делятся на нелегированные и легированные.

В чугунах, кроме железа и углерода, содержатся (в качестве обычно определяемых постоянных примесей) кремний, марганец, фосфор и сера. Чугуны содержат также незначительные количества кислорода, водорода и азота.

Нелегированными считаются чугуны, в которых количество марганца не превосходит 2 % и кремния 4 %. При наличии этих элементов в больших количествах или при содержании специальных примесей чугуны считаются легированными. Принято считать, что в малолегированных чугунах количество специальных примесей (Ni, Cr, Cu и т. п.) не превышает 3 %.

При малом и умеренном легировании стремятся улучшить общие свойства чугуна – однородность структуры, сохранение прочности и упругости при нагреве до относительно невысоких температур – 300 °С–400 °С, повышение износостойкости, повышение прочности и т. д.

При среднем, повышенном и высоком легировании чугун приобретает специальные свойства, так как значительно меняется состав твердых растворов и карбидов. В этом случае наибольшее значение приобретает изменение характера металлической основы. Путем легирования можно получить непосредственно в литом состоянии мартенсит, игольчатый троостит и аустенит. Это повышает коррозионностойкость, жаростойкость и меняет магнитные свойства.

Классификация чугунов по структуре и условиям образования графита

По степени графитизации, формам графита и условиям их образования различают следующие типы чугунов:

- а) белый;
- б) половинчатый;
- в) серый с пластинчатым графитом;
- г) высокопрочный с шаровидным графитом;
- д) ковкий.

Перечисленные названия нельзя считать достаточно удачными, поскольку они отражают только вид излома или некоторые свойства и совершенно не характеризуют вид структуры. Однако эти названия исторически сложились и их придерживаются.

Характер металлической основы чугуна определяется степенью графитизации, состоянием легирования и видом термической обработки.

По степени графитизации белый чугун является почти неграфитизированным, половинчатые чугуны являются малографитизированными, а остальные чугуны – значительно графитизированными (рис. 4.2).

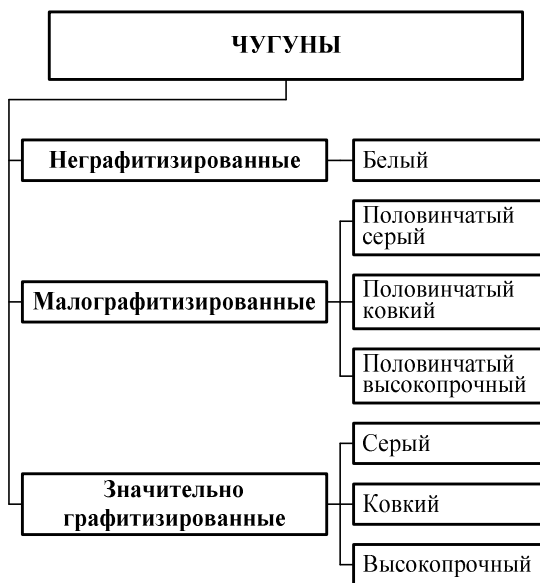


Рис. 4.2. Схема классификации чугунов по степени графитизации, виду излома, форме и условиям образования графита

В белых и половинчатых чугунах обязательно наличие ледебурита, а в значительно графитизированных чугунах ледебурита не должно быть.

Структура чугуна в одной отливке может быть различной и принадлежать к разным типам чугуна; иногда даже специально добиваются получения различных структур в разных слоях, например при производстве отбеленных прокатных валков и дробильных шаров. Наружные слои состоят из белого чугуна, переходные слои из половинчатого чугуна, сердцевина из значительно графитизированного чугуна.

Белый чугун – чугун, у которого почти весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита. Такое название белый чугун получил по виду излома, который имеет матово-белый цвет. Белый чугун имеет большую твердость ($HB\ 450\text{--}550$), хрупок и очень трудно обрабатывается резцами (даже из твердых сплавов) и, как следствие, для изготовления деталей машин не используется. На рис. 4.3 показана микроструктура нелегированного белого доэвтектического чугуна, состоящая из ледебурита, перлита и вторичного цементита.

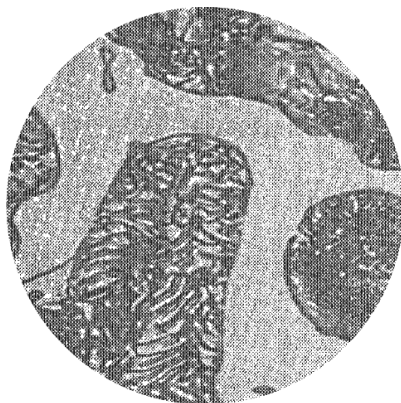


Рис. 4.3. Структура белого чугуна (ледебурит, перлит и вторичный цементит)

В легированных или термообработанных чугунах вместо перлита может быть троостит, мартенсит или аустенит.

Отливки из белого чугуна из-за большой твердости и хрупкости имеют ограниченное применение. Они применяются как износостойкие, коррозионностойкие и жаростойкие.

У белого чугуна вид излома светло-кристаллический, лучистый (рис. 4.4).

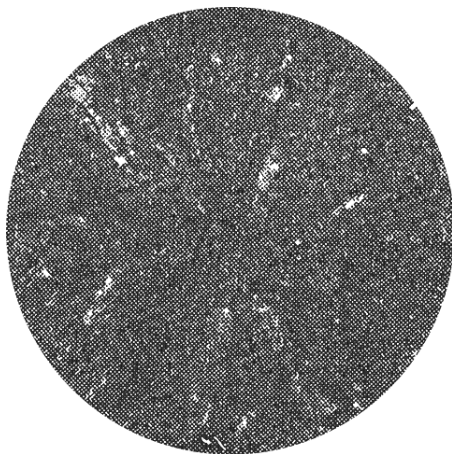


Рис. 4.4. Вид излома белого чугуна

Половинчатый чугун характерен тем, что наряду с карбидной эвтектикой в структуре имеется и графит. Это означает, что количество связанного углерода превосходит его предельную растворимость в аустените в реальных условиях затвердевания.

Структура половинчатого чугуна – ледебурит + перлит + графит. В легированных и термически обработанных чугунах можно получить мартенсит, аустенит или игольчатый тростит.

Половинчатым чугун называется потому, что вид излома у него представляет собой сочетание из светлых и темных участков кристаллического строения. Половинчатый чугун тверд и хрупок; применение изделий из половинчатого чугуна ограничено. Чаще всего эта структура встречается в отбеленных отливках в качестве переходной зоны между отбеленным слоем и графитизированной частью.

Серый чугун (СЧ) наиболее распространенный машиностроительный материал. Главное отличие серого чугуна заключается в том, что графит в плоскости шлифа имеет пластинчатую форму (рис. 4.5).

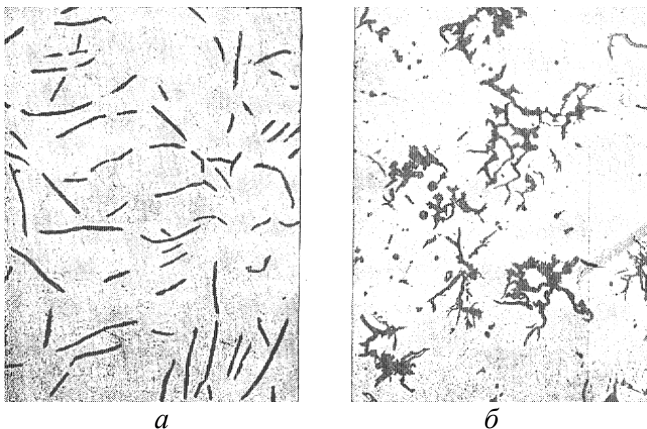


Рис. 4.5. Структура серого чугуна ($\times 100$):

a – с пластинчатым графитом прямолинейным;

б – с пластинчатым графитом колониями большой степени изолированности

Когда пластинки очень дисперсны, графит называют дисперсным или точечным.

Пластинчатый графит различают по степени изолированности, характеру расположения, форме и размерам пластинок (рис. 4.6).

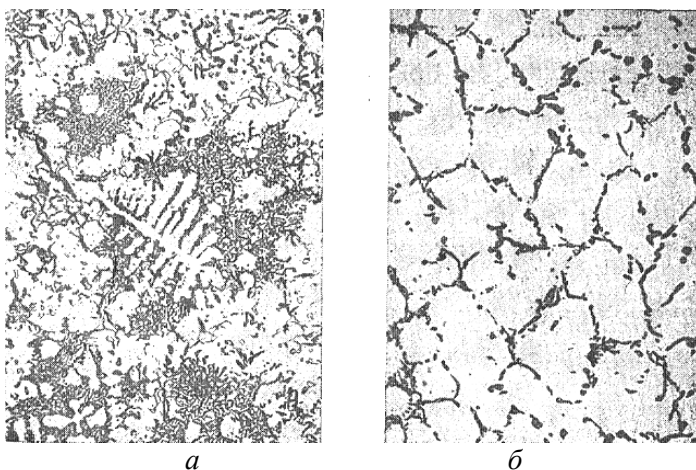


Рис. 4.6. Структура серого чугуна ($\times 100$):

a – пластинчатый графит, колониями малой степени изолированности;

б – междендритный графит

На рис. 4.7 показан серый чугун со сложными структурами пластинчатого графита: розеточный (рис. 4.7, *а*) и завихренный (рис. 4.7, *б*).

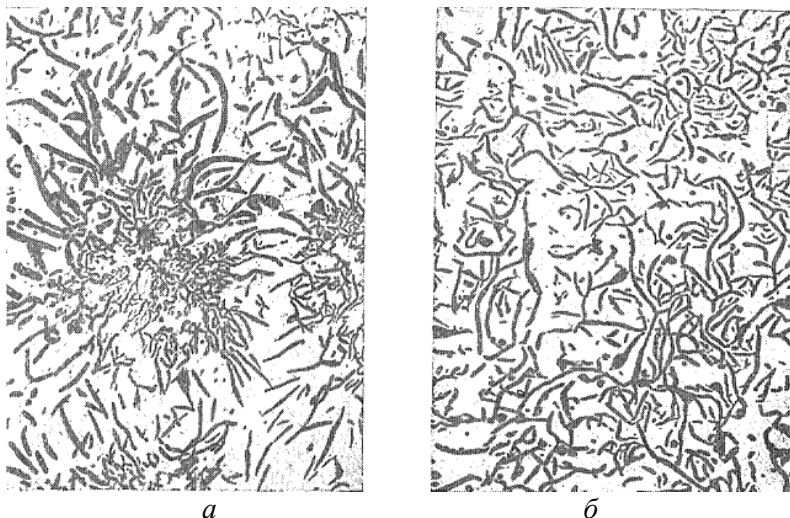


Рис. 4.7. Структура серого чугуна ($\times 100$):
а – розеточный графит; *б* – завихренный графит

Отливки из серого чугуна производятся любой толщины. Вследствие сильного ослабляющего действия пластинок графита серому чугуну свойственны почти полное отсутствие относительного удлинения (менее 0,5 %) и весьма низкая ударная вязкость.

В связи с тем, что серый чугун независимо от характера металлической основы имеет низкую пластичность, большей частью стремятся к получению его с перлитной основой, поскольку перлит значительно прочнее и тверже феррита. Снижение количества перлита и повышение за счет этого количества феррита приводят к потере прочности и износостойкости без повышения пластичности. Не дают также большой пластичности легирование серого чугуна и получение аустенитной основы.

На рис. 4.8, *а* показана структура перлитно-графитного серого чугуна, а на рис. 4.8, *б* структура перлитно-ферритного серого чугуна с примерно равным количеством перлита и феррита.

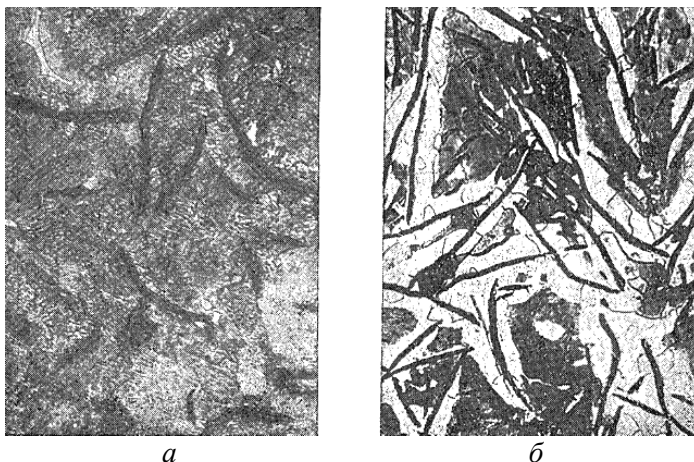


Рис. 4.8. Структура серого чугуна ($\times 100$):

a – сорбит, графит и фосфиды ($\times 400$); *б* – перлитно-ферритный серый чугун ($\times 100$)

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧ). Принципиальное отличие высокопрочного чугуна от других видов чугуна заключается в шаровидной форме графита (рис. 4.9), которая получается главным образом путем введения в жидкий чугун специальных модификаторов (Mg, Ce).

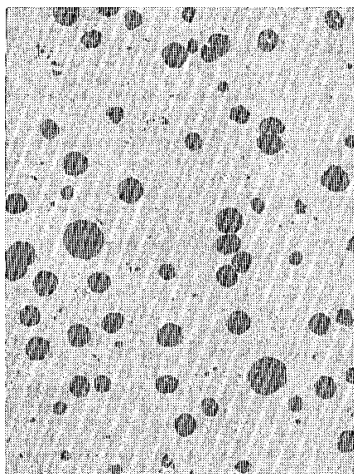


Рис. 4.9. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом ($\times 400$)

Поэтому высокопрочный чугун часто называют магниевым, хотя в ГОСТе он назван «высокопрочным». Размеры и количество графитных включений бывают различными.

Шаровидная форма графита является наиболее благоприятной из всех известных форм. Шаровидный графит меньше других форм графита ослабляет металлическую основу. Металлическая основа высокопрочного чугуна бывает в зависимости от требуемых свойств перлитной (рис. 4.10, *а*), перлитно-ферритной (рис. 4.10, *б*) и ферритной (рис. 4.10, *в*).

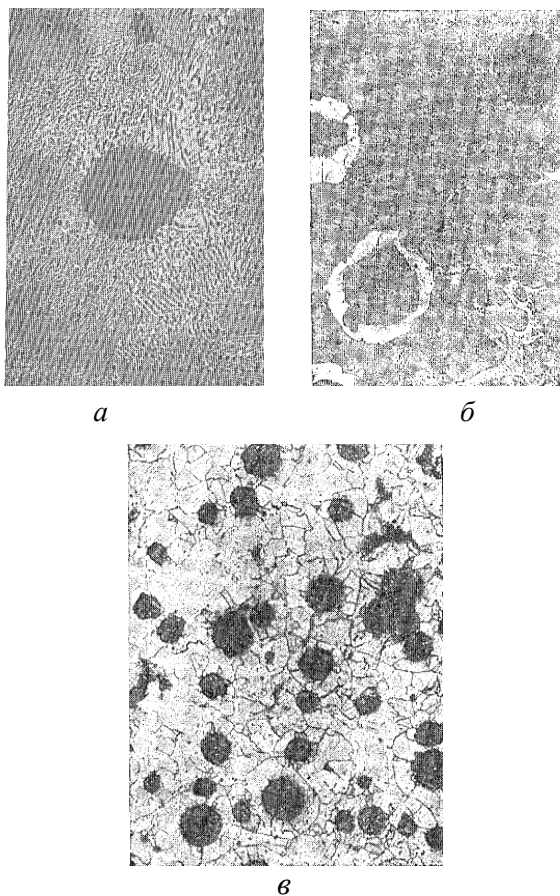


Рис. 4.10. Высокопрочный чугун:
а – перлитный ($\times 400$); *б* – феррито-перлитный ($\times 100$); *в* – ферритный ($\times 200$)

Путем легирования и термообработки можно получить аустенитную, мартенситную или игольчато-трооститную основу.

Отливки из высокопрочного чугуна так же, как и серого чугуна, могут производиться любой толщины.

Ковкий чугун (КЧ). Главное отличие ковкого чугуна заключается в том, что графит в нем имеет хлопьевидную или шаровидную форму. Хлопьевидный графит бывает различной компактности и дисперсности (рис. 4.11), что отражается на механических свойствах чугуна.

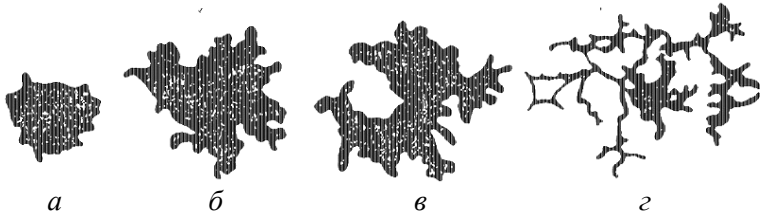


Рис. 4.11. Ковкий чугун с хлопьевидным (а, б, в) и крабовидным (г) графитом

Промышленный ковкий чугун производится главным образом с ферритной основой; в ней, однако, всегда имеется перлитная кайма. В последние годы стали широко применяться чугуны с феррито-перлитной и перлитной основой. Чугун с ферритной основой (рис. 4.12) обладает большой пластичностью.

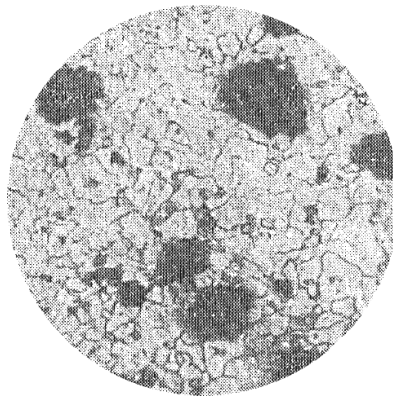


Рис. 4.12. Ковкий чугун с ферритной основой

Излом у ферритного ковкого чугуна черно-бархатистый; с увеличением количества перлита в структуре излом становится значительно светлее.

Отливки из ковкого чугуна бывают ограниченной толщины, обычно не более 40–50 мм. Толщина отливок лимитируется трудностью получения сквозного отбеливания.

Классификация чугунов по свойствам

Классифицировать чугуны можно по механическим и специальным свойствам.

По механическим свойствам чугунные отливки делят:

а) по твердости (по Бринеллю):

- мягкие чугуны (HB до 149);
- средней твердости ($HB = 149–197$);
- повышенной твердости ($HB = 197–269$);
- твердые (HB выше 269);

б) прочности (σ_b – предел прочности при растяжении):

- обыкновенной прочности (σ_b до 20 кг/мм²);
- повышенной прочности ($\sigma_b = 20–38$ кг/мм²);
- высокой прочности ($\sigma_b = 40$ кг/мм² и выше);

в) пластичности (δ – относительное удлинение).

- непластичные (δ до 1 %);
- малопластичные ($\delta = 1\%–5\%$);
- пластичные ($\delta = 5\%–10\%$);
- повышенной пластичности (δ выше 10 %).

Обыкновенной прочности бывают только серые чугуны. Повышенной прочности бывают серые и ковкие чугуны, высокой прочности ковкие чугуны и чугуны с шаровидным графитом.

Классификация по способу изготовления чугуна отливок и их обработки

Большое влияние на свойства чугуна оказывает плавильный агрегат (ваграночный чугун, электроплавильный чугун и т. п.), поскольку от этого зависит степень перегрева жидкого чугуна. Часто приходится встречаться с тем, что какой-нибудь один или несколько технологических факторов играют решающую роль в деле изменения свойств чугуна. Например, добавка стали в ваграночную

шихту улучшает свойства чугуна. Такой чугун называют сталистым. Хорошие результаты достигаются модифицированием жидкого чугуна перед разливкой его в формы. В этом случае чугун называется модифицированным.

Соответственно можно классифицировать чугуны по характеру шихты, способу плавки и способу обработки жидкого чугуна.

Большое влияние на свойства чугуна оказывает также состояние формы и характер заливки в нее. По способу получения отливок чугунное литье можно разделить на кокильное (измельчение структуры за счет ускоренного охлаждения), центробежное (плотная структура), армированное (упрочнение отливок) и т. п.

Значительное изменение свойств чугунов достигается термообработкой. С помощью термической обработки можно изменить степень дисперсности металлической основы и ее характер вплоть до превращения ее в игольчато-трооститную и мартенситную. До некоторого предела можно изменить количество связанного углерода, а при химико-термической обработке можно в поверхностных слоях изменить и состав чугуна. По виду термической обработки можно разделить отливки на отожженные, нормализованные, улучшенные, поверхностно-закаленные, азотированные и т. п.

Классификация по видам отливок и областям их применения

Чугунные отливки по видам отливок и областям их применения можно делить на станочные, цилиндровые, автомобильные, подшипниковые, прокатные валки из отбеленного чугуна и т. п.

Из приведенных классификаций наиболее четкой является классификация по структуре, наименее четкой является классификация по видам отливок, поскольку чугуны с одинаковой структурой и одинаковым составом могут быть пригодны для различных видов отливок и отраслей машиностроения.

Необходимо отличать главные (определяющие) признаки классификации (форма графита) от уточняющих признаков, к которым относится характер металлической основы, способ изготовления и т. п. Например, при описании серого чугуна (с пластинчатым графитом) необходимо уточнять, какой серый чугун по металлической основе, как он получен (модифицированием или термической обработкой), легирован ли и чем он легирован.

Расшифровка маркировки сталей и чугунов

Маркировка сталей

Конструкционные стали, не содержащие легирующих элементов, обозначаются буквосочетанием «Ст». Цифры, стоящие следом, – это содержание углерода, исчисляемое в сотых долях процента. Несколько иначе маркируются низколегированные конструкционные стали. Легированные стали маркируют следующим образом:

- вначале пишут две цифры – они показывают умноженное на 100 процентное содержание углерода;
- после цифр пишут букву – она обозначает ту легирующую добавку, которая содержится в стали;
- после буквы снова пишут число – оно обозначает содержание данной добавки в стали в процентах.

Также существуют свои обозначения для разных типов сталей в зависимости от их состава и предназначения (приложение 4).

Буквенные обозначения применяются также для указания способа раскисления стали:

- кп – кипящая сталь;
- пс – полуспокойная сталь;
- сп – спокойная сталь.

Конструкционные стали обыкновенного качества нелегированные обозначают буквами Ст. (например, Ст.3; Ст.3кп).

Цифра, стоящая после букв, условно обозначает процентное содержание углерода в стали (в десятых долях), индекс «кп» указывает на то, что сталь относится к кипящей, то есть не полностью раскисленная в печи и содержащая незначительное количество закиси железа, что обуславливает продолжение кипения стали в изложнице. Отсутствие индекса означает, что сталь спокойная.

Конструкционные нелегированные качественные стали (например, Ст.10; Ст.20; Ст.30; Ст.45) обозначают двузначным числом, указывающим на среднее содержание углерода в стали – 0,10 %; 0,20 % и т. д.

Конструкционная низколегированная сталь 09Г2С расшифровывается как сталь, с содержанием углерода около 0,09 % и легирующих компонентов марганца, кремния и других менее 2,5 %.

Стали 10ХСНД и 15ХСНД отличаются разницей углерода, в таких сталях среднее содержание каждого элемента содержится менее 1 % процента, поэтому цифры за буквой не ставятся.

Конструкционные легированные стали, такие как 20Х; 30Х; 40Х, обозначают буквами и цифрами. В данном случае марка показывает содержание углерода и основного легирующего элемента хрома. Цифры после каждой буквы обозначают примерное содержание соответствующего элемента, однако при содержании легирующего элемента менее 1,5 % цифра после соответствующей буквы не ставится.

30ХГСА – хромокремнемарганцевая сталь, обладает большой прочностью и повышенным сопротивлением к ударным нагрузкам. В состав марки ходит углерод 0,30 %, сталь также содержит марганец, кремний и хром, примерно в равных долях по 0,8 %–1,1 %

Содержание серы и фосфора не должно превышать 0,03 % для каждого из этих элементов, поэтому в конце таких марок ставится буква А, что свидетельствует о дополнительных показателях качества марок (например, 20ХН4ФА; 38ХН3МА). Также обозначаются и конструкционные рессорно-пружинные стали, такие как 60С2А, 65Г, где первые цифры показывают углерод в сотых долях процента (0,60 и 0,65 соответственно).

Расшифровка сталей конструкционных подшипниковых производится также, как и легированных, но первая буква маркировки – Ш (например, ШХ4; ШХ15; ШХ15СГ). Цифра 15 говорит о содержании легирующего хрома, примерная доля которого равна 1,5 %, соответственно, в стали ШХ4 – 0,4 %.

Качественные стали для производства паровых котлов и сосудов высокого давления обозначают как конструкционные нелегированные стали с добавлением буквы К (например, 20К; 22К).

Литейные конструкционные стали обозначаются как качественные и легированные, но в конце наименования ставят букву Л (35ХМЛ; 40ХЛ и т. п.).

Стали строительные обозначают буквой С и цифрами, соответствующими минимальному пределу текучести стали. Дополнительно применяют обозначения: Т – термоупрочненный прокат, К – повышенная коррозионная стойкость (С345Т; С390К и т. п.). Аналогично буквой Д обозначают повышенное содержание меди (С345Д; С375Д).

Стали инструментальные нелегированные делят на качественные, обозначаемые буквой У и цифрой, указывающей среднее содержание углерода (например, У7; У8; У10), и высококачественные,

обозначаемые дополнительной буквой А в конце наименования (например, У8А; У10А; У12А) или дополнительной буквой Г, указывающей на дополнительное увеличение содержания марганца (например, У8ГА).

Стали инструментальные легированные обозначаются также, как и конструкционные легированные. Например, сталь марки ХВГ: буквы указывают на наличие в ней основных легирующих элементов – хрома, вольфрама, марганца. Эта сталь отличается от 9ХВГ повышенным содержанием в ней углерода (примерно 1 %), поэтому цифра в начале марки не ставится.

Стали быстрорежущие расшифровываются следующим образом: обозначение начинается с буквы Р, затем следует цифра, указывающая среднее содержание вольфрама (например, Р18; Р9), затем следуют буквы и цифры, определяющие массовое содержание элементов. Например, у стали Р6М5 цифра 5 показывает долю молибдена в этой марке. Содержание хрома не указывают, так как оно составляет стабильно около 4 % во всех быстрорежущих сталях и всегда пропорционально содержанию ванадия. Следует заметить, что если содержание ванадия превышает 2,5 %, буква Ф и цифра указываются (например, Р6М5Ф3).

Сталь электротехническая нелегированная АРМКО, другое название – технически чистое железо (например, 10880; 20880). Такие марки содержат минимальное количество углерода (менее 0,04 %), благодаря чему имеют очень малое удельное электрическое сопротивление. Первая цифра указывает на вид обработки (1 – кованный или горячекатаный, 2 – калиброванный). Вторая цифра показывает, что сталь: 0 – нелегированная, без нормируемого коэффициента старения, 1 – с нормируемым коэффициентом старения. Третья цифра указывает на группу по основной нормируемой характеристике. Четвертая и пятая – количественные значения основной нормируемой характеристики.

Правила маркировки сталей были разработаны в СССР и действуют по настоящее время на территории России и СНГ.

Маркировка чугунов

Серые чугуны маркируются буквами «СЧ» и цифрами, характеризующими величину предела прочности (временного сопротивления) при испытаниях на растяжение (σ_b , МПа·10⁻¹): СЧ 10; СЧ 15; СЧ 20; СЧ 25; СЧ 30; СЧ 35 и т. д.

Пример расшифровки: СЧ 25 – серый чугун, $\sigma_b = 250$ МПа.

Высокопрочные чугуны с шарообразным графитом маркируются буквами «ВЧ» и цифрами, характеризующими величину временного сопротивления при испытаниях на растяжение (σ_b , МПа·10⁻¹): ВЧ 10; ВЧ 15; ВЧ 20; ВЧ 25; ВЧ 30; ВЧ 35 и т. д.

Пример расшифровки: ВЧ 50 – высокопрочный чугун, $\sigma_b = 500$ МПа.

Высокопрочные чугуны с вермикулярным графитом маркируются буквами «ЧВГ» и цифрами, характеризующими временное сопротивление при испытаниях на растяжение (σ_b , МПа·10⁻¹): ЧВГ 30; ЧВГ 35; ЧВГ 40; ЧВГ 45 и т. д.

Пример расшифровки: ЧВГ 40 – чугун с вермикулярным графитом, $\sigma_b = 400$ МПа.

Ковкие чугуны маркируются буквами «КЧ» и цифрами: первая характеризует величину временного сопротивления при испытаниях на растяжение σ_b в МПа·10⁻¹, вторая – относительное удлинение в % (КЧ 33-8; КЧ 37-12; КЧ 55-4; КЧ 65-3 и т. д.).

Пример расшифровки: КЧ 55-4 – ковкий чугун, $\sigma_b = 550$ МПа, $\delta = 4$ %.

Методика выполнения практической работы

Указания по самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме практической работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы», раздел «Стали и чугуны»).

2. Подготовить отчет с кратким конспектом теоретического материала.

Задание 1. Расшифровать марки сталей и чугунов.

Порядок выполнения работы:

1. Расшифровать марки сталей и чугунов по индивидуальному заданию.

1.1. Изучить правила расшифровки маркировки сталей и чугунов по примерам и приложению 4.

1.2. По заданию преподавателя выписать из приложения 5 марки сталей и чугунов по вариантам и расшифровать их. Результаты представить в форме письменного отчета.

Задание 2. Подобрать конструкционные материалы по заданным условиям.

Порядок выполнения работы:

1. Произвести подбор материалов по индивидуальному заданию (табл. 4.2). Результаты представить в форме письменного отчета.

Таблица 4.2

Индивидуальные задания для подбора материалов

№ варианта	Задание
1	Выбрать материал одностоечной промежуточной опоры воздушных линий электропередачи
2	Какие материалы используются в производстве трансформаторных подстанций
3	Выбрать материал опор воздушных линий электропередачи при напряжении более 220 В
4	Подобрать материал корпуса трансформаторных распределительных подстанций с внешним обслуживанием
5	Подобрать материал оболочки силового кабеля для передачи электрической энергии токами промышленной частоты
6	Подобрать материал для болтов и заклепок различных диаметров, которые можно использовать для соединений деталей и элементов стальных конструкций
7	Подобрать материал для обычного подшипника качения
8	Подобрать материал для вкладыша подшипника качения
9	Перечислить конструкционные материалы, применяемые в производстве коллекторного электродвигателя постоянного тока
10	Материалы, используемые в производстве асинхронного электродвигателя
11	Перечислить конструкционные материалы, используемые в силовом трансформаторе
12	Подобрать материалы для альтернативной энергетики

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам выполнения заданий 1 и 2. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Письменный отчет по результатам выполнения заданий 1 и 2.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое сплав?
2. Что такое компонента сплава?
3. Что представляет собой фаза сплава?
4. Какие сплавы образуются в системе «железо–углерод»?
5. Перечислите компоненты сталей и чугунов.
6. Начертите кривую охлаждения железа.
7. Перечислите основные фазы, образующиеся при сплавлении железа с углеродом.
8. Что такое сталь и чугун?
9. Что такое АРМКО?
10. Что такое феррит?
11. Что такое аустенит?
12. Что такое цементит?
13. Приведите общую классификацию сталей.
14. Укажите основные примеси в сталях.
15. С какой целью в сталь вводят легирующие элементы?
16. Какие химические элементы придают стали коррозионную стойкость?
17. Что обозначают цифры после букв в маркировке легированной стали?
18. Приведите общую классификацию чугунов.
19. Приведите классификацию чугунов по химическому вхождению углерода.
20. Приведите классификацию чугунов по виду микровключений.
21. Сплавы каких цветных металлов чаще используют в конструкциях?
22. Охарактеризуйте сплавы алюминия.
23. Охарактеризуйте сплавы меди.
24. Охарактеризуйте сплавы титана.

Практическая работа № 5 СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК. ПРОКАТ

Цель работы: изучить некоторые способы получения металлических заготовок.

Задачи работы:

1. Изучить основной сортамент проката.
2. Научиться рассчитывать вес стандартных металлических заготовок.

Краткие теоретические сведения

Продукция металлургии проходит различные виды обработки, претерпевает изменения на всевозможных станках с целью получения металлических заготовок – предметов труда, последующей обработкой которых получают необходимые детали.

Металлические заготовки получают *литьем, прокаткой, резанием, сваркой* и сочетанием этих методов.

В машиностроении, строительстве, на транспорте широко применяется металлический прокат: листы, полосы, ленты, рельсы, балки и т. д. Прокат получают в результате обжатия слитка металла в горячем или холодном состоянии между вращающимися валками прокатного стана. Так обрабатывают сталь, цветные металлы и их сплавы. Комплекс оборудования, с помощью которого производится прокатка, называется прокатным станом. Важнейшей особенностью деформации металла при прокатке является получение волокнистой структуры металла с ориентировкой волокон вдоль направления прокатки, то есть перпендикулярно осям вращения валков.

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

Профиль проката (форма его поперечного сечения) зависит от формы валков. Сортамент стального проката включает следующие основные группы:

- 1) сортовой прокат;
- 2) листовой прокат;

- 3) трубы бесшовные;
- 4) периодический прокат.

Сортовой прокат делится на прокат простого, фасонного и специального профиля. Простой профиль 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 главным образом используется для различных строительных конструкций, включая железнодорожные пути. Специальный прокат включает в себя вагонные колеса, шпунтовые сваи, автоободья и т. д.

Листовой прокат делится на толстолистовую сталь толщиной свыше 4 мм и тонколистовую – 0,20–3,75 мм.

Трубы бесшовные – различного диаметра с разной толщиной стенок, разнообразного назначения.

Периодический прокат – прокат с периодически изменяющимся по длине профилем. Он используется в качестве заготовок для штамповки (например, заготовок шатунов автомобильных двигателей) или непосредственно для механической обработки.

Для выпуска проката из цветных металлов и сплавов существуют специально разработанные сортаменты (для меди, алюминия, латуни, дюралья в виде листов, ленты, труб, прутков и других изделий).

На рис. 5.1 показаны основные профили сортового проката. Различают следующие профили: простые (круг, квадрат, шестиугольник, полоса, лист), фасонные (рельс, балка, швеллер, тавр и др.), специальные (колеса, арматурная сталь и др.).

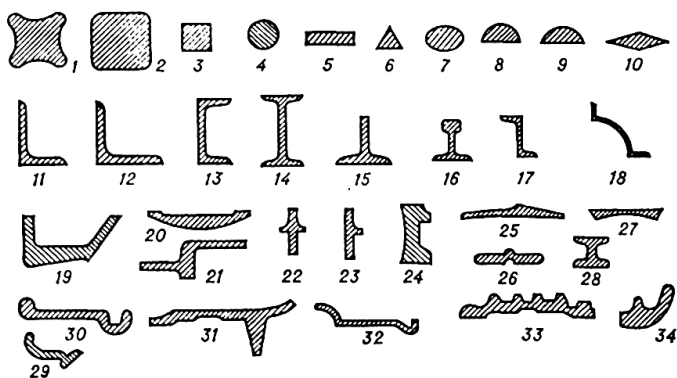


Рис. 5.1. Профили сортового проката:
1–10 – простые; 11–18 – фасонные; 19–34 – специальные

Чаще всего сортовой прокат используется в качестве заготовок для различных деталей. Например, из шестигранного прутка делают болты, гайки. Из круглого проката вытачивают цилиндрические детали на токарных станках. Уголкового проката применяется в производстве рам, каркасов, стеллажей и т. д. Прокаткой можно придать заготовке форму готовой детали, тем самым избежать дополнительной обработки и, следовательно, уменьшить отходы металла, сэкономить время.

Разница между холодным и горячим видами проката существенна, поскольку воздействие на металл при высоких или низких температурных режимах дает определенные отличия в результатах. Техпроцесс при обоих видах обработки один и тот же – заготовка размещается между двумя вращающимися в разных направлениях валами, которыми и прессуется до нужного состояния профиля. Ввиду того, что холодный прокат не связан с продолжительным нагревом металла до высоких температур и обработка осуществляется в большей степени за счет механической нагрузки, а не пластичности материала, лист получается ровнее. Горячий прокат, наоборот, изготавливается при постоянной термообработке, обычно это твердые сплавы, имеющие незначительную пластичность. Из-за непрерывного нагрева поверхность листов окисляется, рекристаллизация происходит неравномерно, поэтому разные участки горячекатаного изделия могут быть разной толщины.

Определение массы профиля прямоугольного сечения

Наиболее распространенные типы профилей, с которыми приходится сталкиваться в быту, – это, в первую очередь, металлические изделия круглого или прямоугольного сечения. К первым можно отнести прутки, арматуру, трубы, а второй тип – это полые профили с квадратным сечением, металлические балки, катаный лист. Проще всего рассчитать изделия с прямоугольным профилем (рис. 5.2).

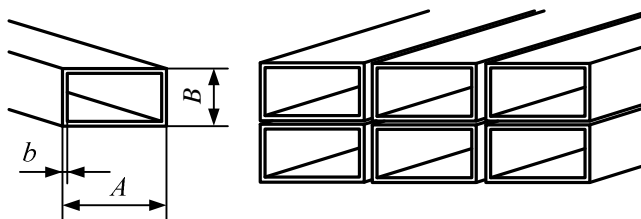


Рис. 5.2. Труба с прямоугольным профилем

Формула для определения массы любого металлического изделия, независимо от его сечения, кг:

$$m = \rho V, \quad (5.1)$$

где ρ – плотность, кг/м³;
 V – объем, м³.

Каждому металлу или сплаву соответствует определенная плотность, которую можно узнать в ГОСТе. Объем рассчитывается исходя из формы профиля. Для этого необходимо определить площадь сечения профиля: для листа – произведение ширины A листа на его толщину B ; для трубы квадратного сечения – сумма ширины A и толщины B , умноженная на 2 и на толщину стенки профиля b . Умножив полученное значение площади на длину профиля L , можно определить ее объем. Тогда из формулы (5.1) массу листа можно рассчитать, как

$$m = \rho ABL. \quad (5.2)$$

А масса трубы квадратного профиля

$$m = \rho(A + B) \cdot 2 \cdot b \cdot L. \quad (5.3)$$

Определение массы профиля круглого сечения

Часто для строительных работ приходится закупать арматуру и трубы. Но предварительно нужно рассчитать массу металлического изделия, чтобы правильно организовать транспортировку. Для расчета массы профиля круглого сечения арматуры используется формула (5.1) с учетом известной формулы площади окружности:

$$m = \rho \frac{\pi D^2}{4} L, \quad (5.4)$$

где D – диаметр окружности поперечного сечения, м.

Так можно рассчитать любой вес стального круга: проволоки, арматуры. На практике массу арматуры определяют по справочным таблицам (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Справочная таблица для определения массы арматуры круглого профиля

Диаметр арматуры, мм	Вес 1 метра арматуры, кг	Погонных метров в тонне, м
d 6	0,222	4504,50
d 8	0,395	2531,65
d 10	0,617	1620,75
d 12	0,888	1126,13
d 14	1,210	826,45
d 16	1,580	632,91
d 18	2,000	500,00
d 20	2,470	404,86
d 22	2,980	335,57
d 25	3,850	259,74
d 28	4,830	207,04
d 32	6,310	158,48
d 36	7,990	125,16
d 40	9,870	101,32
d 45	12,480	80,13
d 50	15,410	64,89
d 55	18,650	53,62
d 60	22,190	45,07
d 70	30,210	33,10
d 80	39,460	25,34

При расчете массы трубы круглого профиля площадь поперечного сечения определяется, как

$$S = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}, \quad (5.5)$$

где D – внешний диаметр трубы, м;

d – внутренний диаметр трубы, м.

Внутренний диаметр можно рассчитать, как разность между внешним диаметром и толщиной стенки профиля, умноженной на 2. Тогда формула для расчета массы трубы с круглым сечением будет выглядеть следующим образом:

$$m = \rho \frac{\pi(D^2 - (D - 2b)^2)}{4} L. \quad (5.6)$$

Определение массы шестигранного профиля

Шестигранный пруток используется редко, ввиду специфической формы и, зачастую, как заготовка для производства различных изделий: например, гаек. Можно найти массу такого профиля, зная его размер (номер), с помощью справочной таблицы (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Справочная таблица для определения массы арматуры шестигранного профиля

Размер	Вес, кг	Размер	Вес, кг	Размер	Вес, кг	Размер	Вес, кг
№ 10	0,68	№ 20	2,72	№ 32	6,96	№ 48	15,66
№ 11	0,82	№ 21	3	№ 34	7,86	№ 50	16,98
№ 12	0,98	№ 22	3,29	№ 36	8,81	№ 52	18,4
№ 13	11,15	№ 24	3,92	№ 38	9,82	№ 55	20,58
№ 14	1,33	№ 25	4,25	№ 40	10,86	№ 57	22,35
№ 15	1,53	№ 26	4,59	№ 41	11,54	№ 60	24,5
№ 16	1,74	№ 27	4,96	№ 42	11,99	–	–
№ 17	1,96	№ 28	5,33	№ 43	12,71	–	–
№ 18	2,2	№ 29	5,27	№ 46	14,53	–	–
№ 19	2,45	№ 30	6,12	№ 47	14,95	–	–

Размер или, иначе говоря, номер шестигранника определяется по диаметру окружности, вписанной в сечение профиля, имеющее форму шестиугольника, то есть это расстояние между его противоположными сторонами. При отсутствии готовых данных, площадь сечения, которое имеет форму шестиугольника, определяется по формуле

$$S = \frac{3\sqrt{3} \cdot a^2}{2}, \quad (5.7)$$

где a – ширина грани, м.

Тогда формула для расчета массы арматуры с шестигранным сечением будет выглядеть следующим образом:

$$m = \rho \frac{3\sqrt{3} \cdot a^2}{2} L. \quad (5.8)$$

Методика выполнения практической работы

Указания по самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме практической работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы», раздел «Методы получения металлических заготовок»).

2. Подготовить отчет с кратким конспектом теоретического материала.

Задание. Рассчитать количество заготовок по заданным условиям.

Порядок выполнения работы:

1. По индивидуальному заданию определить количество штук проката определенного сечения для загрузки в транспорт определенной грузоподъемности.

1.1. По заданию преподавателя выписать по вариантам исходные данные для расчета из приложения 6.

1.2. Рассчитать количество штук проката по методике, изложенной в методических указаниях.

Результаты расчета представить в форме письменного отчета.

2. По индивидуальному заданию, используя сеть Интернет, ответить на вопросы (табл. 5.3). Результаты представить в форме письменного отчета.

Таблица 5.3

Индивидуальные задания

№ варианта	Задание
1	Как соединить стальные или чугунные трубы?
2	Как довести размеры детали, полученной ковкой, до нужной точности?

№ варианта	Задание
3	Как соединить расколовшееся изделие из чугуна?
4	Как соединить медные трубы?
5	Как соединить алюминиевые трубы?
6	Как избавиться от металлической трещины в изделии?
7	Найдите и перечислите детали в электроаппаратостроении, получаемые литьем.
8	Найдите и перечислите кованые и штампованные детали в электроаппаратостроении.
9	Как соединить алюминиевый и медный провод?
10	Как производится резка заготовок из тонколистового (до 12 мм) и толстолистового (свыше 12 мм) проката?
11	Как разрезают заготовки из меди, алюминия и их сплавов?
12	Как достигается экономичность раскроя материала?
13	Перечислите способы получения заготовок методом литья. Какие из этих способов характерны для единичного и мелкосерийного производства, а какие – для массового производства?
14	Укажите преимущества и недостатки различных способов литья.
15	Какие существуют способы горячей обработки металлов давлением?
16	Что такое свободная ковка и какие основные операции могут быть выполнены этим способом?
17	В чем состоит отличие горячей объемной штамповки от свободнойковки?
18	Укажите области применения холодной листовой штамповки в электроаппаратостроении.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам выполнения задания. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Письменный отчет по результатам выполнения задания.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое металлическая заготовка?
2. Перечислите основные технологии получения заготовок.
3. Перечислите механические способы получения заготовок.
4. Укажите необходимые свойства сплавов для механического получения заготовок.
5. Как получают прокат?
6. Перечислите виды проката.
7. Что такое периодический прокат?
8. Что такое сортамент проката?
9. Что такое профиль проката?
10. Перечислите основные профили проката.
11. Перечислите достоинства и недостатки получения заготовок прокаткой.
12. Как называется совокупность механизмов для получения проката?
13. Перечислите достоинства и недостатки получения заготовок ручной ковкой.
14. В чем заключаются достоинства и недостатки получения заготовок штамповкой?
15. Перечислите прочие (кроме механических) способы получения заготовок.
16. Применяют ли один и тот же сплав для получения из него заготовок и литьем, и давлением?
17. Перечислите классы сварки по ГОСТу.
18. Что такое холодная сварка?
19. Перечислите основные этапы получения заготовок литьем.
20. Перечислите литейные свойства сплава.
21. Укажите наиболее используемые способы литья.
22. Перечислите достоинства и недостатки получения заготовок литьем.
23. Охарактеризуйте резку струей.

Практическая работа № 6 ПЛАСТМАССЫ. ПРАКТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ТИПОВЫХ ВИДОВ ПЛАСТМАСС

Цель работы: изучить основные свойства пластмасс.

Задачи работы:

1. Изучить классификацию и маркировку пластмасс.
2. Получить простейшие навыки распознавания типовых видов пластмасс.
3. Ознакомиться с технологией переработки пластмасс.

Краткие теоретические сведения

Пластмассы – это материалы, полученные на основе синтетических или естественных полимеров (смола).

Особенности строения полимеров – они состоят из макромолекул, в которых более или менее регулярно чередуется большое число одинаковых или неодинаковых атомных группировок, соединенных химическими связями в длинные цепи, по форме которых различают линейные полимеры, разветвленные и сетчато-пространственные.

По составу макромолекул полимеры делятся на три класса:

- 1) карбоцепные, основные цепи которых построены только из углеродных атомов;
- 2) гетероцепные, в основных цепях которых, кроме атомов углерода, содержатся атомы кислорода, азота, серы;
- 3) элементоорганические полимеры, содержащие в основных цепях атомы кремния, бора, алюминия, титана и других элементов.

В полимер при получении пластмасс могут вводиться наполнители, стабилизаторы, пигменты, могут составляться композиции с добавкой органических и неорганических волокон, сеток и тканей. То есть пластмассы в большинстве случаев являются композиционными материалами.

Соотношение (массовая доля) названных компонентов в пластмассах может быть, например, таким: связующее вещество (полимер) – 30 %–60 %, наполнители – 40 %–65 %, пластификаторы – около 1 %, красители – 1 %–1,5 %, смазывающие вещества – 1 %–2 %.

Основа пластмассы – полимер (связующее). Под **полимерами** понимают высокомолекулярные вещества, молекулы которых (макромолекулы) состоят из многочисленных повторяющихся структурных звеньев. Молекулярная масса их может составлять от $5 \cdot 10^3$ до 10^6 . Полимеры синтезируются путем полимеризации или поликонденсации мономеров (простых структурных единиц) в присутствии катализаторов при строго определенных температурных режимах и давлениях.

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 смолы, эпоксидные смолы и др.

В отдельных случаях пластмасса, например полиэтилен, может целиком состоять из связующего вещества – полимера.

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 свойствами.

В зависимости от поведения полимера при нагревании различают два вида пластмасс: **термопласты** – материалы, которые могут многократно нагреваться и переходить при этом из твердого в вязко-текучее состояние; **реактопласты** – которые могут претерпевать этот процесс лишь однократно, так как при их первичном отверждении произошла химическая реакция.

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.).

Отвердители (различные амины), или *катализаторы* (перекисные соединения) вводят в терморезактивные пластмассы для ускорения процессов отверждения пластмасс.

Красители органического или минерального происхождения придают пластмассам желаемый цвет.

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.

Смазывающие вещества вводят для уменьшения прилипаемости пластмассовых изделий к металлическим частям пресс-формы.

Кроме названных, в пластмассы вводятся с различными целями и другие добавки.

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.

Пластические массы характеризуются внешними отличительными признаками, по которым можно ориентировочно установить их вид. При изучении пластмасс необходимо учитывать особенности характерных для них признаков: цвет (цветовой тон, яркость); блеск (матовые, зеркальные); прозрачность (прозрачные, полупрозрачные, непрозрачные); характер поверхности (гладкая, шероховатая, маслянистая, скользкая на ощупь); твердость или физическое состояние (твердые, жесткие, гибкие, мягкие, эластичные); характер звучания при ударе или постукивании (звонкий металлический или глухой); строение на изломе (гладкое, стекловидное для пластмасс без наполнителя и неоднородное, шероховатое – с наполнителем); плотность (тяжелые, легкие).

Так, полиэтиленовые изделия легко деформируются даже при небольшом усилии, имеют матовую парафинообразную на ощупь поверхность, не дают яркого тона при окрашивании. Ударопрочный полистирол, в отличие от аморфного – непрозрачен. Группа прозрачных жестких пластмасс, кроме аморфного полистирола, обычно представлена полиметилметакрилатом и поликарбонатом. Полистирол, в отличие от двух последних пластмасс, хрупок, при легком постукивании издает звонкий звук, напоминающий металлический. Полиметилметакрилат имеет невысокую поверхностную твердость – легко царапается, издает глухой звук при ударе. Следует иметь в виду, что отдельные признаки не имеют универсального значения. Так, если изделия из полистирола и аминопласта, имеющие одинаковый цвет, непрозрачны, их сложно отличить друг от друга по звуку. Поэтому для распознавания можно использовать внешние отличительные признаки изделий, обусловленные способом производства. Например, изделия из полистирола изготавливают литьем под давлением и они имеют след от литника, поверхность с зеркальным блеском. Изделия из аминопласта, полученные прессованием, имеют менее блестящую поверхность, которая производит впечатление кованой, заметна неоднородность поверхности и отсутствует след от литника. Вид пластмассы более точно определяют по характеру ее поведения при нагревании, горении в пламени и вне пламени горелки.

Поведение образца при нагревании позволяет определить группу пластмассы по термическим свойствам (плавятся термопластичные, обугливаются термореактивные пластмассы).

Если пластмасса легко воспламеняется, то ее удаляют из пламени и наблюдают характер горения вне пламени. При этом отмечают отношение пластмассы к нагреву (размягчается, плавится, обугливается); характер горения (в пламени и вне пламени горелки, яркость пламени, цвет, наличие копоти, скорость горения); запах продуктов горения (острый, резкий, фруктовый и т. д.).

В зависимости от состава и строения пластмассы имеют различные технические названия.

Однородные и композиционные (пресс-порошковые) твердые пластмассы, выпускаемые в виде листов (толщина от 0,5 до 2,0 мм), пластин (2–8 мм) и плит (более 8 мм), предназначенные для переработки методами механической обработки, гнутья, штампования и выдувания, получают техническое наименование с добавлением слова «листовой».

Мягкие и эластичные пластмассы, содержащие значительное количество пластификаторов или изготовленные на основе эластичных при нормальной температуре связующих, выпускаемые в виде листов, шлангов, лент и т. д., носят техническое название «пластикат».

Материалы, выпускаемые в виде тонких пленок (толщиной менее 0,5 мм), вне зависимости от степени мягкости и растяжимости получают техническое наименование «пленка».

Материалы с малым удельным весом, имеющие закрытую пористую ячеистую структуру, получают техническое наименование: при удельном весе от 0,03 до 0,30 – «пенопласты», при удельном весе выше 0,3 с открытой пористой структурой – «поропласты».

Пластмассы с волокнистым наполнителем получают техническое наименование по характеру наполнителя с добавлением слова «волокнит»: волокнит – пластмассы с наполнителем в виде органического волокна (хлопка); стекловолокнит – пластмассы с наполнителем в виде стеклянного волокна; асбоволокнит – пластмассы с наполнителем в виде распушенного асбеста; текстолокнит – пластмассы с наполнителем в виде текстильной крошки или обрезков тканей; древоволокнит – пластмассы с наполнителем в виде древесного волокна.

Пластмассы со слоистыми наполнителями, физико-механические свойства которых определяются свойствами скорее наполнителей, нежели связующего, получают техническое наименование по характеру наполнителя с добавлением слова «лит»: текстолит – пластмассы

с наполнителем в виде ткани из органического волокна; стеклотекстолит – пластмассы с наполнителем в виде ткани из стеклянного волокна; асботекстолит – пластмассы с наполнителем в виде асбестовой ткани; бумаголит (гетинакс) – пластмассы с наполнителем в виде бумаги или картона; древолит – пластмассы с наполнителем в виде древесного шпона; асболит – пластмассы с наполнителем в виде асбестового картона.

Пластмассы с порошковыми наполнителями называются карболиты (фенопласты, аминопласты).

Органолептически определяя способ изготовления, необходимо учитывать следующие отличительные признаки изделий: форму (листовая, плоская, сложная); наличие боковых швов, следов литника; характер поверхности; элементы монтажных операций. Следует отметить, что экструзией вырабатываются изделия, имеющие сечение круглой формы (трубы, стержни). Экструзией с последующим раздуванием вырабатываются воронки и другие изделия. Литьем под давлением перерабатываются только термопластичные пластмассы. Форма изделий различна, в том числе и сложная. На дне в центре или с боку имеется след от литника. При выдувании изделия имеют форму тел вращения (шар, цилиндр) и боковые швы от формы. При прессовании форма посуды плоская или полая (чаще коническая), поверхность гладкая, блестящая. Прессованием перерабатывают только фенопласты и аминопласты. Каландрованием вырабатывают пленочные или листовые материалы из полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида и др. Вакуумным либо пневмоформованием вырабатывают крупные изделия без острых углов и граней из термопластов. У изделий отсутствует литник, форма несложная. Последовательность технологических операций при изготовлении изделий из термопластичных и термореактивных полимеров различными методами неодинакова. Примером может служить последовательность изготовления изделия методом экструзии.

Анализ кода пластмасс

Для анализа пластмасс можно пользоваться простым методом экспресс-анализа, который не требует использования дорогостоящей аппаратуры. Экспресс-анализ представляет собой визуально-органолептический метод идентификации по виду пламени горящей пластмассы, запаху продуктов сгорания, растворимости полимера и примерного определения его удельного веса по его

поведению в воде и растворах солей с известным удельным весом. Методика достаточно проста: анализируются физико-механические особенности пластмасс (твердость, гладкость, эластичность и т. д.) и их поведение в пламени спички (зажигалки): различные виды пластмасс горят по-разному и даже издают разные звуки при горении.

ПЭВД (полиэтилен высокого давления). Горит синеватым, светящимся пламенем с оплавлением и горящими потеками полимера. При горении становится прозрачным, это свойство сохраняется длительное время после гашения пламени. Горит без копоти. Горящие капли при падении с достаточной высоты (около полутора метров) издают характерный звук. При остывании капли полимера похожи на застывший парафин, очень мягкие; при растирании между пальцами – жирны на ощупь. Дым потухшего полиэтилена имеет запах парафина. Плотность ПЭВД: 0,91–0,92 г/см³.

ПЭНД (полиэтилен низкого давления). Более жесткий и плотный, чем ПЭВД, хрупок. Проба на горение – аналогична ПЭВД. Плотность: 0,94–0,95 г/см³.

ПЭСД (полиэтилен среднего давления). Самый жесткий из полиэтиленов, плотность: 0,96–0,97 г/см³. Все виды полиэтилена размягчаются при помещении в кипящую воду. При комнатной температуре нерастворимы в органических растворителях. При температуре 100 °С и выше полностью растворяются в бензоле. Плавают в воде.

Пенополиэтилен. Губчатая масса белого цвета. Свойства при горении аналогичны ПЭВД.

ПП (полипропилен). При внесении в пламя горит ярко светящимся пламенем аналогично горению ПЭВД, но запах более острый и сладковатый. При горении образуются потеки полимера. В расплавленном виде прозрачен, при остывании – мутнеет. Если коснуться расплава спичкой, то можно вытянуть длинную, достаточно прочную нить. Капли остывшего расплава жестче, чем у ПЭВД, твердым предметом давятся с хрустом. Дым с острым запахом жженой резины, сургуча. Плотность ПП: 0,90–0,91 г/см³, легче ПЭВД и так же плавает в воде.

ПЭТФ (полиэтилентерефталат). Прочный, жесткий и легкий материал. Плотность составляет 1,36 г/см³. Обладает хорошей термостойкостью в диапазоне температур от –40 °С до +200 °С, устойчив к действию разбавленных кислот, масел, спиртов, минеральных

солей и большинству органических соединений, за исключением сильных щелочей и некоторых растворителей. При горении выделяется сильно коптящее пламя. При удалении из пламени самозатухает.

ПС (полистирол). При сгибании полоска легко гнется, потом резко ломается с характерным треском. На изломе наблюдается мелкозернистая структура. Горит ярким, сильно коптящим пламенем (хлопья копоти тонкими паутинками взмывают вверх). Запах сладковатый, цветочный. ПС хорошо растворяется в органических растворителях (стирол, ацетон, бензол). Плотность ПС: от 1,05 до 1,08 г/см³. Тонет в воде.

Пенопласт (пенополистирол). Легкий, пористый материал белого цвета. Один из лучших и доступных тепло-звукоизоляционных материалов. Объемная масса: 0,01–0,10 г/см³. Проба на горение аналогична полистиролу. Легко растворяется в ацетоне.

ПВХ (поливинилхлорид). Эластичен, трудногорюч (при удалении из пламени самозатухает). При горении сильно коптит, в основании пламени можно наблюдать яркое голубовато-зеленое свечение. Очень резкий, острый запах дыма. При сгорании образуется черное, угледобное вещество (легко растирается между пальцами в сажу). Растворим в четыреххлористом углероде, дихлорэтано. Плотность: 1,38–1,45 г/см³.

ПММА (полиметилметакрилат) – органическое стекло. Прозрачный, хрупкий материал. Горит синевато-светящимся пламенем с легким потрескиванием. У дыма острый фруктовый запах (эфира). Легко растворяется в дихлорэтано.

ПА (полиамид). Материал имеет отличную масло-бензостойкость и стойкость к углеводородным продуктам, которые обеспечивают широкое применение ПА в автомобильной и нефтедобывающей промышленности (изготовление шестерен, искусственных волокон и т. д.). ПА отличается сравнительно высоким влагопоглощением, которое ограничивает применение ответственных изделий, изготовленных из него, во влажных средах. Горит голубоватым пламенем. При горении разбухает с шипением, образует горящие потеки. Дым с запахом паленого волоса. Застывшие капли очень твердые и хрупкие. ПА растворим в растворе фенола, концентрированной серной кислоте. Плотность: 1,10–1,13 г/см³. Тонет в воде.

Полиуретан. Основная область применения – подошвы для обуви. Очень гибкий и эластичный материал (при комнатной температуре).

На морозе хрупок. Горит коптящим, светящимся пламенем. У основания пламя голубое. При горении образуются горящие капли-потеки. После остывания эти капли – липкое, жирное на ощупь вещество. Полиуретан растворим в ледяной уксусной кислоте.

Пластик АВС. Все свойства по горению аналогичны полистиролу. От полистирола достаточно сложно отличить. Пластик АВС более прочный, жесткий и вязкий. В отличие от полистирола более устойчив к бензину. Этот вид пластика широко применяется для изготовления корпусов электрических машин и аппаратов.

Методика выполнения практической работы

Указания по самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме практической работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы», раздел «Полимерные материалы: пластмассы, эластомеры»).
2. Подготовить отчет с кратким конспектом теоретического материала.

Задание. Выполнить органолептический анализ образцов пластмасс.

Порядок выполнения работы:

1. По индивидуальному заданию проанализировать свойства и определить сорт набора образцов пластмасс.
- 1.2. Получить у преподавателя образцы пластмассовых изделий.
- 1.3. Используя основные сведения к работе и набор паспортизированных образцов пластмасс, изучить внешние отличительные признаки, позволяющие ориентировочно установить вид пластмассы.
- 1.4. Изучить непаспортизированные образцы пластмасс. Сравнить органолептические признаки образцов с данными табл. П7.1 (приложение 7). Сделать предварительное заключение о виде пластмассы. В процессе работы следует проанализировать весь комплекс органолептических признаков, акцентируя внимание на тех из них, которые отличают исследуемый вид пластмассы от других видов.
- 1.5. Для проведения пробы на горение испытуемый образец зажечь пинцетом и внести сбоку в пламя горелки. Проанализировать термические свойства и характер горения образца, окраску пламени,

запах продуктов сгорания. Сравнить признаки горения образцов с данными табл. П7.2 (приложение 7) и сделать окончательное заключение о виде пластмассы.

Результаты испытаний занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты испытаний образцов пластмасс

Номер образца	Органолептические признаки	Результаты проб на горение	Прочие признаки и различия	Установленный вид пластмассы

2. По заданию преподавателя дать краткую характеристику технологиям:

- переработки реактопластов в Республике Беларусь;
 - переработки термопластов в Республике Беларусь.
- Результаты представить в форме письменного отчета.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам выполнения задания. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Табл. 6.1 с результатами испытаний.
3. Письменный отчет по результатам выполнения задания.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое полимер?
2. Что такое структурное звено полимера?
3. Какие материалы называются пластмассами?
4. Приведите классификацию пластмасс.

5. Какие пластмассы являются термопластичными?
6. Какие пластмассы называют реактопластами?
7. Какие пластмассы являются термореактивными?
8. Назовите основное отличие реактопластов от термопластов.
9. Чем объясняется обратимость свойств термопластов, их невысокая прочность?
10. Опишите физические свойства пластмасс.
11. В чем заключаются преимущества пластмасс как конструкционных материалов?
12. Перечислите недостатки пластмасс.
13. Укажите основные компоненты пластмасс.
14. Объясните наличие связующего вещества в пластмассах.
15. С какой целью в пластмассы вводятся наполнители? Приведите классификацию наполнителей.
16. Какие вещества и с какой целью вводят в пластмассы в качестве пластификаторов?
17. Опишите свойства полиэтилена.
18. Опишите свойства полипропилена.
19. Опишите свойства полистирола.
20. Опишите свойства поливинилхлорида.
21. Опишите свойства тефлона.
22. Опишите свойства полиамида.
23. Опишите свойства органического стекла.
24. Перечислите способы переработки термопластов в готовые изделия.
25. Перечислите способы получения деталей из реактопластов.
26. Какие смолы широко используются в качестве термореактивного связующего? Опишите их особенности.
27. Опишите пластмассы с наполнителем из пресс-порошков.
28. Опишите пластмассы с волокнистым наполнителем.
29. Опишите свойства гетинакса.
30. Опишите свойства текстолита.
31. Опишите древесно-слоистые пластинки.
32. Опишите свойства стеклотекстолита.

Практическая работа № 7

ДИЭЛЕКТРИКИ: ПАССИВНЫЕ И АКТИВНЫЕ. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Цель работы: изучить свойства электроизоляционных материалов.

Задачи работы:

1. Изучить различия и основные классы активных и пассивных диэлектриков.
2. Изучить классификацию, характеристики, номенклатуру и область применения электроизоляционных материалов.

Краткие теоретические сведения

Активные и пассивные диэлектрики. Электроизоляционные материалы (ЭИМ)

Диэлектрические материалы можно классифицировать по различным признакам, например: по агрегатному состоянию на газообразные, жидкие и твердые; по химическому составу – на органические и неорганические. Основным элементом в молекулах органических материалов является углерод. По способу получения диэлектрические материалы могут быть естественными (природными) и синтетическими (искусственными). Синтетические материалы могут быть созданы с заранее заданным комплексом электрических и физико-химических свойств, поэтому именно они нашли широкое применение в электротехнике.

Классификация диэлектриков по механизму поляризации – наиболее важная с точки зрения их практического применения в электротехнике.

Диэлектрики считаются *пассивными* (линейными), если они поляризуются только во внешнем электрическом поле, их электротехнические свойства стабильны при различных внешних воздействиях; по применению это конденсаторные (для конденсаторов постоянной емкости) и электроизоляционные материалы.

Диэлектрики *активные* (нелинейные) могут поляризоваться самопроизвольно или под неэлектрическими воздействиями, их свойствами можно управлять с помощью, например, температуры, механическими напряжениями и др.

К активным диэлектрикам относят сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты, материалы квантовой электроники, суперионные проводники и др. Строгая классификация активных диэлектриков невозможна, поскольку один и тот же материал может проявлять признаки различных активных диэлектриков. Например, сегнетоэлектрики часто имеют одновременно и свойства пьезоэлектриков.

Электроизоляционные материалы (ЭИМ) относятся к пассивным диэлектрикам и используются для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами.

Назначение электрической изоляции – не допускать прохождения электрического тока по каким-либо нежелательным путям, помимо тех путей, которые, предусмотрены электрической схемой устройства.

Газообразные диэлектрики

Все газы – диэлектрики. Основные характеристики газообразных диэлектриков – это диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность. Кроме того, для газов важны теплофизические характеристики, в первую очередь теплопроводность.

Значение *диэлектрической проницаемости* ϵ газов обычно близко к 1, отличие от единицы можно обнаружить в 3–4 знаке после запятой. Причина этого – малая концентрация молекул в газовой фазе.

Удельная электропроводность газов обычно порядка 10^{-13} См/м, причем основным фактором, вызывающим проводимость в не очень сильных полях, является ионизирующее излучение.

Диэлектрические потери в газах незначительны.

Электрическая прочность у газов, по сравнению с прочностью жидкостей и твердых диэлектриков, невелика и сильно зависит как от внешних условий, так и от природы газа. Обычно пробивные характеристики разных газов сопоставляют при нормальных условиях (н. у.). Эти условия – давление 1 атм, температура 20 °С, электроды, создающие однородное поле, площадью 1 см², межэлектродный зазор 1 см. Воздух при н. у. имеет электрическую прочность 30 кВ/см. Коэффициент k показывает отношение электрической прочности газа к электрической прочности воздуха. Значения для некоторых газов, используемых в технике следующие: для водорода – 0,5, гелия – 0,2, азота – 2,9, фреона-12 – 2,4, для перфторированных углеводородных газов – 4–10.

Из электроотрицательных газов с высокой электрической прочностью наибольшее применение нашел элегаз SF₆. Свое название он получил от сокращения «электрический газ». Из других полезных свойств можно отметить следующие: химическая инертность, нетоксичность, негорючесть, термостойкость (до 800 °С), взрывобезопасность, слабое разложение в разрядах, низкая температура сжижения. В отсутствие примесей элегаз совершенно безвреден для человека. На основе элегазовой изоляции созданы и эксплуатируются ряд электроустройств, из них кабели, конденсаторы, выключатели, компактные ЗРУ (закрытые распределительные устройства).

Жидкие электроизоляционные материалы

Такие материалы осуществляют электрическое разделение частей электроустановки с разными потенциалами.

Их можно использовать для пропитки твердых диэлектриков для повышения их электрической прочности и одновременно для увеличения эффективности охлаждения электрооборудования.

Классификация жидких диэлектрических материалов приведена на рис. 7.1.

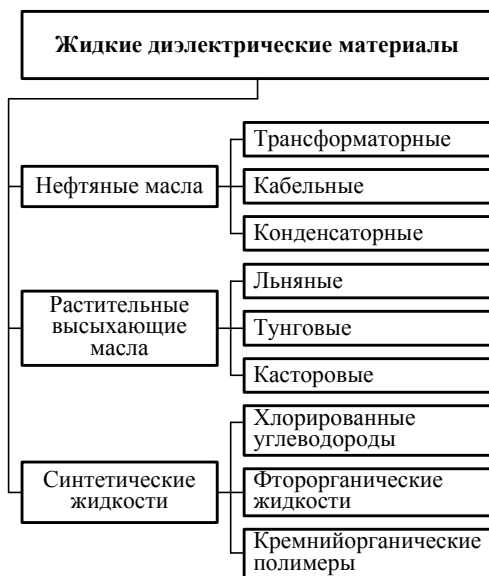


Рис. 7.1. Классификация жидких ЭИМ

Нефтяные (минеральные) электроизоляционные масла получают из нефти путем 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, щелочью, промывки водой и сушки.

Из всех жидких электроизоляционных материалов наибольшее применение в электротехнике находит *трансформаторное масло*. Используется для заполнения баков силовых трансформаторов.

По своим диэлектрическим характеристикам хорошо очищенное от примесей и влаги трансформаторное масло является неполярным диэлектриком. Значение диэлектрической проницаемости при 20 °С равно 2,2–2,3; $\text{tg}\delta$ не более 0,003 при частоте 50 Гц. Величина $\text{tg}\delta$ зависит от степени очистки трансформаторного масла.

Основными недостатками трансформаторного масла являются старение, воспламеняемость, горючесть, гигроскопичность.

Конденсаторное масло получается из трансформаторного после дополнительной обработки его в вакууме для удаления из него растворенного воздуха, что снижает диэлектрические потери.

Конденсаторное масло служит для пропитки изоляции 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.

Кабельное масло отличается от трансформаторного повышенной вязкостью, а от конденсаторного – пониженными электрическими свойствами.

Кабельные масла используются в производстве силовых электрических кабелей; пропитывая бумажную изоляцию этих кабелей, они повышают ее электрическую прочность, а также способствуют отводу теплоты. Кабельные масла бывают различных типов. Так, 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 $\text{мм}^2/\text{с}$ при 100 °С, температурой застывания не выше минус 10 °С и температурой вспышки не ниже 220 °С.

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 материала, высыхает и образует твердую, прочно пристающую к подложке электроизоляционную пленку.

Высыхание масел не объясняется испарением жидкости, а есть сложный химический процесс, связанный с поглощением маслом некоторого количества кислорода из воздуха. Поэтому при высыхании масла, его масса не уменьшается, а несколько увеличивается.

Скорость высыхания масел увеличивается с повышением температуры, при освещении, а также в присутствии катализаторов химических реакций высыхания – сиккативов. В качестве сиккативов используют соединения свинца, кальция, кобальта и др. Технологически удобно вводить эти металлы в масло в виде способных растворяться в нем солей различных кислот, например резинатов.

Отвердевшие пленки высыхающих масел в тяжелых углеводородах, например, в трансформаторном масле, не растворяются даже при нагреве, так что являются практически маслостойкими, но к ароматическим углеводородам, например бензолу, они менее стойки. При нагреве отвержденная пленка не размягчается.

Наиболее распространенные высыхающие растительные масла – льняное и тунговое. Льняное масло золотисто-желтого цвета, получается из семян льна. Его плотность 0,93–0,94 мг/м³, температура застывания – около –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 °С до –5 °С.

Синтетические жидкие диэлектрики применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить длительную и надежную работу высоковольтных электрических аппаратов при повышенных тепловых нагрузках и напряженности электрического поля в пожаро- или взрывоопасной среде.

Хлорированные углеводороды получают из различных углеводородов путем замены в их молекулах некоторых (или всех) атомов

водорода атомами хлора. Наиболее широкое применение имеют полярные продукты хлорирования дифенила, имеющие общий состав $C_{12}H_{10-n}Cl_n$. Это трудногорючие и негорючие жидкости. В зарубежной литературе они называются хлорбифенилами. Коммерческие названия некоторых из них – «совол», «совтол», «калория-2». Однако у этого класса веществ имеются два очень существенных недостатка – высокая токсичность и сильное влияние на озоновый слой.

Поэтому идет поиск других термостойких электроизоляционных жидкостей, среди которых наиболее перспективными являются *кремнийорганические жидкости*. Кремнийорганические жидкости (силоксаны). Это большой класс жидкостей с различными электро- и теплофизическими характеристиками. Хорошо очищенные жидкости обладают следующими параметрами: $\varepsilon = 2,5-3,5$; $\text{tg}\delta < 10^{-3}$; $\rho > 10^{12}$ Ом·м.

К недостаткам силоксанов относится то, что кремнийорганические жидкости не могут обеспечить пожаробезопасность и, следовательно, не могут полностью заменить хлордифенилы. Кроме того, они в несколько раз дороже трансформаторного масла.

Фторорганические жидкости. В зарубежной литературе они называются перфторуглероды. По сути, это эквивалент обычным органическим жидкостям, только вместо атома водорода везде находится атом фтора. Например, есть аналоги органическим соединениям, таким как пентан C_5H_{12} – перфторпентан C_5F_{12} , гексан C_6H_{14} – перфторгексан C_6F_{14} , триэтил (пропил,бутил)амин – перфтортриэтил(пропил,бутил)амин и т. п. Существует также перфтортрансформаторное масло. Фторорганические жидкости имеют малый $\text{tg}\delta$, ничтожно малую гигроскопичность и высокую огнеустойчивость. Некоторые фторорганические жидкости могут длительно работать при температуре 200 °С и выше. 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). Недостаток – как и кремнийорганические соединения, фторорганические жидкости весьма дорогостоящие.

В табл. 7.1 представлены электротехнические характеристики некоторых жидких ЭИМ.

Таблица 7.1

Электротехнические характеристики некоторых жидких ЭИМ (при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Наименование жидкого диэлектрика	Особенности строения	ρ , Ом·м	ϵ
Бензол	Неполярные	$10^{10}-10^{13}$	2,2
Трансформаторное масло			
Совол	Слабополярные	10^8-10^{10}	4,5
Касторовое масло			4,6
Дистиллированная вода	Сильнополярные	10^3-10^5	80
Этиловый спирт			33
Ацетон			22

Твердеющие электроизоляционные материалы

К ним относятся электроизоляционные лаки, эмали, компаунды.

Электроизоляционные лаки – это коллоидные растворы лаковой основы в летучих растворителях.

Лаковая основа – смолы, битумы, высыхающие масла. Растворители – ароматические углеводороды, спирты, сложные и простые эфиры, скипидар и др. После высыхания лаки образуют пленку, обладающую электроизоляционными свойствами. В состав лака могут входить дополнительные вещества. Сиккативы – вещества, ускоряющие процесс высыхания растительных масел и лаков. Пластификаторы – вещества, придающие эластичность и ударную прочность лаковой пленке. Отвердители – соединения, способствующие отверждению пленки лака. Инициаторы и ускорители – вещества, ускоряющие процесс образования полимеров. По назначению и выполняемым функциям электроизоляционные лаки принято подразделять на три основные группы: пропиточные, покрывные, клеящие.

Электроизоляционные эмали – это лаки, в составе которых имеются пигменты – высокодисперсные неорганические вещества, повышающие твердость и механическую прочность лаковой пленки, ее теплопроводность, дугостойкость. Пигмент-порошок неорганического состава (обычно оксиды металлов), придающий пленке

определенную окраску, улучшающий ее механическую прочность, теплопроводность и адгезию к поверхности, на которую нанесен лак.

Эмаль 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 электрических машин и аппаратов).

Компаундами называются изоляционные составы, жидкие в момент их применения, затем отвердевающие. Электроизоляционные компаунды не содержат растворителей.

Электроизоляционные компаунды могут быть терморезистивными (неразмягчающимися после своего отвердевания) или термопластичными (размягчающимися при последующих нагревах).

По применению компаунды делятся на две основные группы: пропиточные и заливочные.

Назначение пропиточных компаундов 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.

Распространены эпоксидные компаунды, представляющие собой эпоксидную смолу с добавлением наполнителей, пластификаторов и других ингредиентов. Непосредственно перед использованием компаунда в него вводится отвердитель. В зависимости от вида отвердителя эпоксидные компаунды могут отвердевать или при охлаждении, или при нагреве.

Битумы – аморфные материалы, представляющие собой сложные смеси углеводородов. Они имеют черный (или темно-коричневый) цвет, при достаточно низких температурах хрупки. Битумы растворяются в углеводородах, 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.

Твердые электроизоляционные материалы

ЭИМ на основе древесины – *бумага, картон, фибра*.

Преимуществом этих материалов является их производство из возобновляемого сырья (из древесной массы).

Бумагу получают варкой щепы и опилок в щелочном растворе с добавками. Чем выше плотность бумаги, тем выше ее механическая и электрическая прочность. Плотность конденсаторных бумаг может более чем в 1,5 раза превышать плотность воды. Электрическая прочность бумаги толщиной 10 мкм, пропитанной трансформаторным маслом, составляет до 10 МВ/см.

Электротехнический картон используется в качестве диэлектрических дистанцирующих прокладок, шайб, распорок, в качестве изоляции магнитопроводов, пазовой изоляции вращающихся машин и т. п. Картон, как правило, используется после пропитки трансформаторным маслом. Недостатком картона является гигроскопичность, в результате попадания влаги уменьшается механическая прочность и резко уменьшается электрическая прочность (в 4 и более раз).

Фибра (от лат. fibra – волокно) – материал, изготавливаемый пропиткой нескольких слоев бумаги-основы концентрированным раствором хлорида цинка (реже раствором серной кислоты и роданида кальция) и последующим прессованием. Фибра (марки ФТ, ФЭ, ФСВ, ФП, ФПК, ГКФ, ФКДГ) представляет собой прессованный картон из смеси целлюлозной и древесной массы, пропитанный хлористым цинком или хлористым кальцием. Выпускается в виде черных и неокрашенных листов.

Полимерные материалы

Полимер – соединение, в котором молекулы состоят из структурно повторяющихся звеньев. Материалы на основе полимеров – пластмассы и резины.

Основное свойство резин и каучуков – эластичность. Это позволяет изготавливать из каучуков не только изоляторы, но и гибкие кабели. В энергетике используются разные типы каучуков: натуральные каучуки, бутадиеновые, бутадиен-стирольные, этиленпропиленовые и кремнийорганические.

В табл. 7.2 приведены параметры некоторых полимерных диэлектриков.

Параметры некоторых полимерных диэлектриков (при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Наименование параметра	Полиэтилен	Фторопласт-4	Поливинилхлорид	Эпоксидные смолы
ρ , Ом·м	10^{15}	$10^{15} - 10^{18}$	$10^{11} - 10^{13}$	$10^{12} - 10^{13}$
ε (на частоте 1 МГц)	2,2–2,4	1,9–2,2	3,1–3,4	3,9–4,2
$\text{tg}\delta$ (на частоте 1 МГц)	$(2-4) \cdot 10^{-4}$	$(2,0-2,5) \cdot 10^{-4}$	0,015–0,018	–
$E_{\text{пр}}$, МВ/м	45–55	25–27	35–45	20–80
$T_{\text{раб}}$, $^{\circ}\text{C}$	90	260	90	120–140

Композиционные порошковые пластмассы и слоистые диэлектрики

Композиты – это многофазные материалы, состоящие из пластичной матрицы, обеспечивающей материалу непрерывность, и армирующего наполнителя (или нескольких).

Самым простым примером композита является железобетон, в котором матрицей является бетон, а наполнителем – железная арматура.

В качестве связующего вещества композиционных пластмасс (матрицы) используют формальдегидные, эпоксидные, кремнеорганические и другие смолы. Наполнитель улучшает электрические и механические свойства изделия. Среди композиционных пластмасс наилучшими электрическими свойствами обладают пластмассы на основе анилиноформальдегидной смолы.

Из композиционных пластмасс изготавливают корпуса промышленной и бытовой радиоаппаратуры, измерительных приборов, ламповые панельки, электротехническую арматуру и др.

Слоистые пластики являются разновидностью композиционных пластмасс, в которых в качестве наполнителя используют листовые слоистые материалы. К слоистым пластикам относятся гетинакс и текстолит.

Гетинакс получают горячей прессовкой бумаги, пропитанной фенолформальдегидной смолой. Для производства используется прочная и нагревостойкая бумага. Пропитанную бумагу собирают в пакеты и прессуют при температуре $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Во время прессования

смола сначала размягчается, заполняя поры между листами и волокнами, а затем затвердевает. В результате волокнистая основа связывается в прочный монолитный материал. Слоистое строение гетинакса обуславливает анизотропию свойств. Гетинакс является сильнополярным диэлектриком. Его диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 6-7$, а тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,04-0,08$ (на частоте 10^6 Гц).

Текстолиты – композиты, получаемые горячей прессовкой слоев тканей, пропитанных полимерной смолой. Частным случаем является *стеклотекстолит*, когда в качестве наполнителя используют слои стеклоткани.

Электротехнический фарфор – искусственный минерал, образованный из глинистых минералов, полевого шпата и кварца в результате термообработки по керамической технологии. Основные свойства: относительно высокая стойкость к атмосферным воздействиям, положительным и отрицательным температурам, к воздействию химических реагентов, высокие механическая и электрическая прочность, дешевизна исходных компонентов. В табл. 7.3 представлены основные параметры электротехнического фарфора.

Таблица 7.3

Основные электротехнические параметры фарфора (при $T = 20$ °C)

Электротехнический параметр	Значение параметра
Диэлектрическая проницаемость	7
Удельное объемное сопротивление	10^{11} Ом·м
Удельное поверхностное сопротивление	10^9-10^{12} Ом
Тангенс угла диэлектрических потерь	$2 \cdot 10^{-2}$
Электрическая прочность	25–30 кВ/мм

Электротехническое стекло имеет преимущества перед фарфором: более стабильная сырьевая база, проще технология, допускающая большую автоматизацию, возможность визуального контроля неисправных изоляторов. При пробое изолятора в гирлянде, его диэлектрическая «юбка», в случае выполнения юбки из стекла, разрушается и падает на землю, тогда как при пробое фарфорового изолятора юбка остается целой. Поэтому неисправные стеклянные изоляторы видны невооруженным глазом, тогда как

диагностика вышедших из строя фарфоровых изоляторов возможна только с помощью специальных приборов, например, приборов ночного видения «Филин». В табл. 7.4 представлены основные параметры электротехнического стекла в нормальных условиях (н. у.).

Таблица 7.4

Основные параметры электротехнического стекла (при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Параметр	Значение параметра
Диэлектрическая проницаемость	7
Удельное объемное сопротивление	$10^{12}\text{ Ом}\cdot\text{м}$
Удельное поверхностное сопротивление	10^{14} Ом
Тангенс угла диэлектрических потерь	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Электрическая прочность	48 кВ/мм
Теплопроводность	0,92 Вт/(м·К)
Теплоемкость	1 кДж/(кг·К)
Плотность	2500 кг/м^3
Прочность на разрыв	90 МПа

В табл. 7.5 приведены сравнительные данные по электрической прочности в нормальных условиях некоторых распространенных газообразных, жидких и твердых диэлектриков.

Таблица 7.5

Сравнительные данные по электрической прочности в нормальных условиях некоторых распространенных диэлектриков

Наименование диэлектрика	Электрическая прочность, кВ/см (50 Гц)
Элегаз	89
Водород	15
Трансформаторное масло	280
Конденсаторное масло	300
Кабельное масло	200
Полиэтилен	450–550
Слюда	100–250 (70–160)
Поливинилхлорид	150–350
Фенопласт электроизоляционный	130–180

Наименование диэлектрика	Электрическая прочность, кВ/см (50 Гц)
Фарфор (стеатит)	400
Электрокартон	400–500 (пропитанный)
Гетинакс	40–50
Стекло (кварц)	300–400
Кремнийорганическая резина	300
Фторопласт	200–350

В табл. 7.6 приведены электротехнические свойства некоторых пластмасс.

Таблица 7.6

Электрические параметры некоторых пластмасс (в н.у.)

Наименование пластмассы	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м
Гетинакс	4,5–8,0	10^9 – 10^{12}
Капрон	3,6–5,0	10^{10} – 10^{11}
Лавсан	3,0–3,5	10^{14} – 10^{16}
Органическое стекло	3,5–3,9	10^{11} – 10^{13}
Пенопласт	1,0–1,3	$\approx 10^{11}$
Полистирол	2,4–2,6	10^{13} – 10^{15}
Полихлорвинил	3,2–4,0	10^{10} – 10^{12}
Полиэтилен	2,2–2,4	$\approx 10^{15}$
Стеклотекстолит	4,0–5,5	10^{11} – 10^{12}
Текстолит	6,0–8,0	10^7 – 10^{19}
Целлулоид	4,1	10^9
Эбонит	2,7–3,5	10^{12} – 10^{14}

Методика выполнения практической работы

Указания по самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме практической работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы», раздел «Диэлектрики»).

2. Подготовить отчет с кратким конспектом теоретического материала.

Задание. Охарактеризовать электроизоляционные материалы.

Порядок выполнения работы:

1. По заданию преподавателя дать краткую характеристику одному из классов электроизоляционных материалов (описать основные свойства и характеристики):

- сегнетоэлектрики;
- пьезоэлектрики;
- пироэлектрики;
- электреты.

Результаты представить в форме письменного отчета.

2. Привести примеры электроизоляционных материалов и дать им краткую характеристику.

2.1. Используя методические указания и интернет-ресурсы, изучить классификацию, характеристики, номенклатуру и область применения активных диэлектриков и электроизоляционных материалов.

2.2. Самостоятельно подобрать примеры активных (5–6 примеров конкретных материалов) и пассивных (12–15 примеров, по 3–4 для изоляции различных агрегатных состояний) диэлектриков.

2.3. Дать краткую характеристику выбранным материалам, заполнив табл. 7.7 и 7.8.

Таблица 7.7

Активные диэлектрические материалы и область их применения

Наименование активного диэлектрика	Механизм поляризации	Способ получения	Применение в электротехнике

Таблица 7.8

Электроизоляционные материалы и область их применения

Наименование электроизоляционного материала	Способ получения	Применение в электротехнике

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам выполнения задания. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Письменный отчет по результатам выполнения задания.
4. Табл. 7.7 и 7.8 с результатами работы.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Какую классификацию диэлектриков нужно считать основной?
2. Как классифицируются любые, в том числе диэлектрические, материалы? Опишите все возможные подходы.
3. Назовите признаки активных диэлектриков.
4. Приведите примеры активных диэлектриков и их использования.
5. Перечислите особенности пассивных (линейных) диэлектриков.
6. Какие требования предъявляются к электроизоляционным материалам?
7. Приведите примеры использования линейных диэлектриков.
8. Приведите примеры жидких ЭИМ – натуральных и синтетических.
9. Назовите особенности применения жидких ЭИМ в технике.
10. Перечислите твердеющие ЭИМ. Опишите особенности их применения в технике.
11. Опишите отличия лаков от эмалей, лаков от компаундов.
12. Перечислите ЭИМ на основе древесины.
13. Как на электрическую прочность ЭИМ влияет влажность?
14. Перечислите основные полимерные ЭИМ.
15. Перечислите основные композиционные ЭИМ на полимерной основе.
16. Какие изоляционные материалы особенно подвержены воздействию высоких и низких температур?
17. Каким должен быть коэффициент температурного расширения изоляционного материала относительно металла токопроводящей жилы, если изоляцию используют в виде кембрика токопроводящей жилы?

Практическая работа № 8 КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: изучить классы нагревостойкости электроизоляционных материалов.

Задачи работы:

1. Изучить тепловые свойства диэлектриков.
2. Изучить классификацию, характеристики, номенклатуру и область применения электроизоляционных материалов соответственно их классу нагревостойкости.

Краткие теоретические сведения

Тепловые свойства диэлектриков. Классы нагревостойкости

К тепловым свойствам материалов относятся теплоемкость, температура плавления (кипения), нагревостойкость, хладостойкость и др.

Теплопроводность – процесс переноса теплоты от более нагретых частей к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры. Тепловые потери в проводниках и магнитопроводах электрических машин и аппаратов, кабелях передаются в окружающую среду через изоляцию. От теплопроводности электрической изоляции зависит нагрев электрооборудования, а следовательно, его срок службы.

Теплопроводность характеризуется коэффициентом теплопроводности материала γ_T [Вт/(м·К) или Вт/(м·°С)]. Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Коэффициент теплопроводности некоторых материалов

Наименование материала	γ_T , Вт/(м·К)
Воздух	0,05
Бумага	0,10
Лакоткань	0,13

Наименование материала	γ_t , Вт/(м·К)
Фарфор	1,60
Кристаллический кварц	12,5
Гетинакс	0,35
Текстолит	0,25

Теплоемкость определяет количество теплоты, необходимое для нагревания (или охлаждения) вещества определенной массы до заданной температуры. Теплоемкость C [Дж/(кг·К)] входит в уравнение:

$$Q = C m (T - T_0), \quad (8.1)$$

где Q – количество тепла, необходимое для нагрева тела, Дж;
 m – масса нагреваемого тела, кг;
 T_0, T – начальная и конечная температуры соответственно, К.

Температура плавления $T_{пл}$ (К) является характерным параметром для твердых кристаллических диэлектриков.

Температура размягчения $T_{разм}$ (К), определяемая по специальной методике (по Вику или Мартенсу), характеризует переход аморфных материалов в определенном интервале температур из твердого состояния в жидкое.

Термическое расширение оценивается температурным коэффициентом линейного расширения TKl (или α) и температурным коэффициентом объемного расширения TKV (или β) (табл. 8.2). При этом $TKV = 3TKl$.

Таблица 8.2

Значения коэффициента объемного расширения некоторых диэлектриков

Наименование материала	Значение коэффициента объемного расширения TKV , K^{-1}
Бензин	0,000124
Ртуть	0,000110
Эфир	0,000160

Наименование материала	Значение коэффициента объемного расширения ТКV, K ⁻¹
Глицерин	0,000051
Нефть	0,000100
Керосин	0,000100
Спирт	0,000110
Вода	0,000180

Кварцевое стекло имеет значение $TKI = 5,5 \cdot 10^{-7} \cdot K^{-1}$. Такое малое значение позволяет стеклу не разрушаться при резких перепадах температур.

Вода, в зависимости от температуры, имеет различный коэффициент объемного расширения:

- $0,53 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ при температуре 5 °С–10 °С;
- $1,50 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ при температуре 10 °С–20 °С;
- $3,02 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ при температуре 20 °С–40 °С;
- $4,58 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ при температуре 40 °С–60 °С;
- $5,87 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ при температуре 60 °С–80 °С.

Холодостойкость (морозостойкость) – способность работать при пониженных температурах (характерна для резин). Во многих случаях эксплуатации важна холодостойкость, то есть способность изоляции работать без ухудшения эксплуатационной надежности при низких температурах, например от –60 °С до –70 °С. При низких температурах, как правило, электрические свойства изоляционных материалов улучшаются, однако многие материалы, гибкие и эластичные в нормальных условиях, при низких температурах становятся хрупкими и жесткими, что создает затруднения для работы изоляции.

Теплостойкость – температура, при кратковременном достижении которой, происходит ухудшение характеристик.

Термостойкость – температура, при которой происходят химические изменения материала.

Горючесть – способность к воспламенению, поддержанию огня, самовоспламенению.

Нагревостойкость – это способность электроизоляционного материала без существенного ухудшения практически важных характеристик выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого с нормальным временем эксплуатации. Нагревостойкость – максимальная температура, при которой не уменьшается срок службы.

Превышение предельной рабочей температуры изоляции в процессе эксплуатации приводит к интенсивному тепловому старению изоляции и снижению срока службы электрооборудования. Связь между сроком службы изоляционного материала ($\tau_{\text{сл}}$) и рабочей температурой (t_p) выражается следующей формулой:

$$\tau_{\text{сл}} = \tau_0 \cdot e^{-b \cdot t_p}, \quad (8.2)$$

где τ_0 – срок службы изоляционного материала при 0°C , лет;
 b – коэффициент, зависящий от свойств материала.

Срок службы уменьшается в два раза при повышении температуры на постоянное значение $\Delta t = 0,695 / b$ ($\Delta t = 7^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}$). Например, изоляция имеет $\Delta t = 8^\circ\text{C}$ и срок службы 10 лет при $t_p = 105^\circ\text{C}$. Если в процессе эксплуатации температура рабочая будет увеличена до 113°C , то срок службы составит 5 лет; при 121°C – 2,5 года.

В соответствии с ГОСТ 8865–93 (МЭК 85–84) все электроизоляционные материалы разделены на классы нагревостойкости (табл. 8.3). Класс нагревостойкости характеризует максимально допустимую рабочую температуру.

Таблица 8.3

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Обозначение класса	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Максимальная рабочая температура, $^\circ\text{C}$	90	105	120	130	155	180	200	220	250

К классам нагревостойкости Y, A, E 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.

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов:

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

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

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

В (130 °С) – материалы на основе щепаной слюды, слюдопластов и слюдинитов, в том числе с бумажной или тканевой органической подложкой, стеклоткани и стеклолакачулки; 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 °С) – 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 °С) – материалы на основе щепаной слюды без подложки или с неорганической подложкой, стекловолокнистые материалы; асбестовые материалы (пряжа, ткани, бумага).

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

220 (220 °С) – слюда, стекло, стекловолокнистые материалы, кварц.

250 (250 °С) – микалекс, непропитанный асбоцемент, керамика, политетрафторэтилен, асбест.

Электроизоляционные материалы классов нагревостойкости В, F, Н, С, 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, как хрупкость, способность разрушаться без заметной пластической деформации.

Методика выполнения практической работы

Указания по самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме практической работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы», раздел «Диэлектрики»).

2. Подготовить отчет с кратким конспектом теоретического материала.

Задание. Охарактеризовать электроизоляционные материалы по их тепловым свойствам.

Порядок выполнения работы:

1. По заданию преподавателя дать краткую характеристику электроизоляционным материалам.

1.1. Используя методические указания и интернет-ресурсы изучить классификацию, характеристики, номенклатуру и тепловые свойства электроизоляционных материалов.

1.2. Самостоятельно подобрать примеры электроизоляционных материалов к каждому классу нагревостойкости (по 3–4 на каждый класс).

1.3. Дать краткую характеристику выбранным материалам, заполнив табл. 8.4.

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Класс нагревостойкости	Примеры ЭИМ	Способ получения	Достоинства	Недостатки	Применение в электротехнике

2. По заданию преподавателя дать краткую характеристику электроизоляционным материалам с различным значением температурного коэффициента объемного расширения. Привести примеры их применения в энергетике.

2.1. Самостоятельно подобрать 3–4 примера электроизоляционных материалов с малой величиной температурного коэффициента объемного расширения. Дать краткую характеристику выбранным материалам.

2.2. Самостоятельно подобрать 3–4 примера электроизоляционных материалов с относительно большой величиной температурного коэффициента объемного расширения. Дать краткую характеристику выбранным материалам.

Результаты представить в форме письменного отчета.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам выполнения задания. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Письменный отчет по результатам выполнения задания.
4. Табл. 8.4 с результатами работы.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите основные тепловые свойства диэлектриков.
2. Что такое теплопроводность?

3. Как теплопроводность изоляции влияет на стабильность работы электрической машины?
4. Каким параметром описывают тепловое расширение материала?
5. Что такое температурный коэффициент линейного расширения?
6. Что такое температурный коэффициент объемного расширения?
7. Что такое холодостойкость материала?
8. Чем определяется допустимая рабочая температура диэлектрика?
9. Что такое нагревостойкость?
10. Что такое время жизни диэлектрика?
11. Одинаково ли действует низкая температура на эксплуатационную надежность различных типов изоляции? Если нет – назвать, у каких видов изоляции электрические свойства не ухудшаются, у каких – ухудшаются.
12. Связано ли время жизни изоляции с температурой ее эксплуатации? Если да, то как?
13. На какие классы нагревостойкости делят электроизоляционные материалы?
14. Приведите несколько примеров диэлектриков каждого класса нагревостойкости.
15. Как связана нагревостойкость изоляции обмоток электродвигателя и время его максимальной работы, указанное в паспорте?
16. Укажите электротехнические устройства, для стабильной работы которых особенно важна холодостойкость изоляции.

Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРОБОЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучить явление пробоя жидких и газообразных диэлектриков.

Задачи работы:

1. Изучить характеристики трансформаторного масла и его образцы. Определить электрическую прочность трансформаторного масла.
2. Получить зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном и неоднородном электрических полях.

Краткие теоретические сведения

Диэлектрики – материалы, способные поляризоваться, то есть способные создавать электростатическое поле.

По механизму поляризации диэлектрики делят на *пассивные* (линейные), поляризующиеся только во внешнем электрическом поле, и *активные* (нелинейные), способные поляризоваться и в поле, и без него.

Пассивные (линейные) диэлектрики применяются в качестве электроизоляционных материалов (ЭИМ). Находясь во внешнем электрическом поле, они могут потерять изоляционные свойства, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение.

Пробой – явление образования токопроводящего канала в диэлектрике под действием электрического поля.

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

Значение пробивного напряжения зависит от толщины h диэлектрика и формы электрического поля, обусловленной конфигурацией электродов и самого диэлектрика. Таким образом, значение пробивного напряжения характеризует не столько свойства материала, сколько способность конкретного образца противостоять конкретному электрическому полю.

Для сравнения свойств различных материалов более удобной характеристикой является электрическая прочность.

Электрическая прочность – минимальная напряженность однородного электрического поля $E_{\text{пр}}$ (кВ/мм), приводящая к пробое диэлектрика:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}.$$

Время, проходящее от включения напряжения до полного разрушения диэлектрика в электрическом поле, называют временем жизни, долговечностью или сроком службы. Ограниченное время жизни диэлектрика связано с тем, что в результате длительного воздействия электрического поля, особенно при повышенной температуре, основные свойства диэлектриков постепенно ухудшаются. Происходит старение диэлектрика (или деградация).

Старение материала (в общем случае) – ухудшение его начальных свойств под действием физических, химических или биологических факторов.

Электрическое старение – ухудшение электрических свойств диэлектрика при длительном воздействии электрического поля.

Старение является подготовительной стадией пробоя.

По природе процессов, определяющих развитие подготовительной стадии пробоя, различают три основных механизма пробоя:

- электрический;
- тепловой;
- электрохимический.

1. **Электрический пробой** обусловлен явлениями ударной ионизации и фотоионизации. Такой пробой характерен для газов, но может происходить и в неполярных жидких и твердых диэлектриках. Пробивная напряженность при электрическом пробое зависит от плотности диэлектрика и степени однородности электрического поля. В однородном поле пробой газа наступает при более высоком значении $E_{\text{пр}}$, чем в неоднородном поле.

2. **Тепловой пробой** характерен для твердых диэлектриков и обусловлен чрезмерным выделением тепла из-за больших диэлектрических потерь. При этом в диэлектрике происходят необратимые процессы термического разрушения материала (обугливание, растрескивание, оплавление и т. д.), в результате чего растет ток сквозной проводимости. Для теплового пробоя характерна сильная зависимость $E_{\text{пр}}$ от температуры, частоты тока, размеров детали и условий ее охлаждения.

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

Каждый из указанных механизмов пробоя может произойти в одном и том же диэлектрике в зависимости:

- от характера электрического поля, в котором он находится – постоянного или переменного, импульсного, низко- или высокочастотного;
- времени воздействия напряжения;
- однородности диэлектрика – наличия в нем дефектов;
- толщины слоя диэлектрика;
- температуры и т. д.

Поверхностный пробой иногда рассматривают отдельно. Это не особый вид пробоя, а комплексное явление, когда пробой газа происходит вблизи поверхности твердой изоляции. Сама твердая изоляция в этот момент не пробивается, однако ее электротехнические характеристики значительно ухудшаются.

После снятия напряжения пробоя:

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

Пробой жидкостей

Изоляционные жидкости используются во многих видах высоковольтного электрооборудования – трансформаторах, коммутационных аппаратах, конденсаторах, кабелях. В них изоляционные жидкости выполняют, как правило, две основные функции – диэлектрика и охладителя. Применение электроизоляционных жидкостей позволяет обеспечить надежную и длительную работу электрической изоляции находящихся под напряжением элементов конструкции и отводить от них теплоту, выделяющуюся при работе. Различают:

- природные (нефтяные и растительные) изоляционные жидкости;
- синтетические изоляционные жидкости (кремнийорганические или фторорганические жидкости, хлорорганическая – совол, различного рода производные на ароматической основе, сложные эфиры различных типов, полиизобутилены и пр.).

В электротехнике в качестве жидкого диэлектрика широкое применение получило трансформаторное масло – продукт нефтеперегонки.

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

Трансформаторное масло используется в силовом трансформаторе; оно заполняет поры в волокнистой изоляции, а также промежутки между проводами обмоток и между обмотками и баком трансформатора, при этом значительно повышая электрическую прочность изоляции. Кроме того, трансформаторное масло улучшает отвод теплоты, выделяемой за счет потерь в обмотках и сердечнике трансформатора.

Трансформаторное масло используется также в масляных выключателях высокого напряжения. В этих аппаратах гашение 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 заполнения маслonaполненных вводов, некоторых типов реакторов, реостатов и других электрических аппаратов.

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), ацетилена – 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 избыточной воды, которая не смешивается с маслом и осаждается на дно сосуда. Примесь воды в количестве 0,01 % (особенно в виде эмульсии) уже 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 80,0) значительно больше, чем масла (2,1–2,4). Под влиянием сил электрического поля капельки воды приобретают удлинённую форму в направлении силовых линий и втягиваются в места с наибольшей напряжённостью поля. Волокнистые примеси ещё в большей степени снижают электрическую прочность масла. Они более гигроскопичны, чем масло, интенсивно впитывают 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. 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, припой, медь, алюминий). Осадки могут покрыть сплошным слоем систему охлаждения трансформатора, чем ухудшают условия охлаждения, приводят к повышению температуры обмоток и порчи изоляции. При этом продукты начавшего старения масла приводят к ускорению его старения. Старение масла является подготовительной стадией пробоя.

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

Очистка масла от воды и механических примесей производится пропусканием под давлением сквозь фильтровальную бумагу в фильтр-прессах, воздействием центробежной силы в центрифуге, распылением нагретого масла в камере, заполненной азотом и т. п.

Регенерация – удаление из масла продуктов старения и восстановление исходных свойств, которое достигается обработкой адсорбентами (вещества с сильно развитой поверхностью, которые поглощают воду и полярные примеси).

Свойства и характеристики используемого в технике масла должны отвечать требованиям стандарта. Трансформаторное масло при хранении и в процессе эксплуатации периодически подвергается испытаниям.

Испытания делят на два вида:

А. На пробой (определение электрической прочности, наличия влаги, наличия механических примесей, содержания взвешенного углерода).

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

Масло трансформаторов подвергается испытаниям в соответствии с требованиями нормативных документов и 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.

Основные свойства качественного трансформаторного масла приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Нормированные характеристики трансформаторного масла

Характеристика	Нормированное значение	Единица 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	2,1–2,4	–
Электрическая прочность при 20 °С и 50 Гц (не ниже)	18	кВ/мм
Рабочая температура	95	°С
Температура вспышки паров	135	°С
Температура застывания (не выше)	–45	°С
Температурный коэффициент расширения	0,0007	1/°С

Характеристика	Нормированное значение	Единица измерения
Коэффициент теплопроводности при 20 °С–90 °С	0,11	Вт/(м·°С)
Кинематическая вязкость (не более): при 20 °С при 50 °С	30 90	мм ² /с

Методика определения электрической прочности трансформаторного масла. Методика определения электрической прочности трансформаторного масла строго стандартизирована и включает следующие условия:

1. Пробу масла следует брать в абсолютно чистую и сухую стеклянную или алюминиевую посуду, закрывать стеклянной пробкой. При взятии пробы сначала сливают отстой и эмульсию, посуду прополаскивают несколько раз.

2. Используются абсолютно чистые и сухие сосуд и электроды, после чистки и промывки нельзя прикасаться к 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 1,0–1,5 кВ/с.

7. Следует делать шесть пробоев, первый из которых не учитывается при расчете среднего значения пробивного напряжения.

Пробой газов

Для газов характерен только электрический пробой. В газах присутствует незначительное число электронов и ионов, возникших в результате начальной ионизации (в результате внешних воздействий). При наложении внешнего электрического поля происходит ударная ионизация газа, которая вызывает лавинообразное размножение заряженных частиц. Лавина распространяется к аноду со скоростью около 10⁵ м/с и вблизи анода достигает своего наибольшего развития. Однако прораствание одной электронной лавины еще не приводит к формированию проводящего канала,

поскольку образовавшиеся электроны быстро уходят из разрядного промежутка на анод. Для полного развития пробоя, ударной ионизации должны сопутствовать другие процессы, обеспечивающие восполнение и накопление числа заряженных частиц между электродами. В зависимости от характера этих сопутствующих процессов в газах различают лавинный и лавинно-стримерный пробой.

Лавинный пробой характеризуется вторичными процессами на катоде. Ионная бомбардировка поверхности катода приводит к выбиванию вторичных электронов (ионная ударная ионизация). Вторичные электроны, ускоряясь полем, образуют новые, более интенсивные лавины. Время формирования лавинного пробоя составляет 10^{-5} – 10^{-4} с.

Лавинно-стримерный пробой развивается за время 10^{-7} – 10^{-6} с, то есть гораздо быстрее лавинного. Отличие этого вида пробоя газов в том, что часть электронов, ускоренных электрическим полем, при столкновениях с молекулами газа не ионизирует их, а переводит в возбужденное состояние, затем такая возбужденная частица, возвращаясь в основное состояние, испускает фотон. Фотоны распространяются во все стороны, в том числе по пути следования основной электронной лавины. Отдельные лавины нагоняют друг друга и сливаются в сплошной канал ионизированного газа – стример. От катода распространяется мощная электронная волна, которая проявляется в виде искры. Образовавшаяся искра может перерасти в электрическую дугу, если мощность источника питания достаточна, чтобы поддержать этот процесс.

Пробой газа в однородном и неоднородном полях протекает различно.

Однородное электрическое поле в разрядном промежутке можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между двумя сферами, если расстояние между ними не превышает их диаметра. В однородном поле пробой газа происходит внезапно, без каких-либо предварительных стадий, однако электрическая прочность газа в однородном поле не является величиной постоянной. Она зависит не только от параметров состояния газа, но и от расстояния между электродами, достигая высоких значений в малых зазорах.

Пробой газа в неоднородном поле характеризуется меньшими значениями пробивного напряжения, чем в однородном поле при одинаковых межэлектродных зазорах. Сильно неоднородное поле

возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, между двумя проводами и т. п.

Главной особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда, называемого короной. Корона предшествует полному разряду между электродами и возникает в местах максимальной неоднородности поля, где его напряженность в первую очередь достигает критических значений (например, вблизи острия или острой кромки электрода). При дальнейшем возрастании напряжения корона превращается в искровой разряд или в электрическую дугу.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Задание 1. Изучить явление пробоя трансформаторного масла.

Подготовка к работе:

Испытание трансформаторного масла на электрическую прочность производится в специальном аппарате СКАТ-М100В (рисунок).

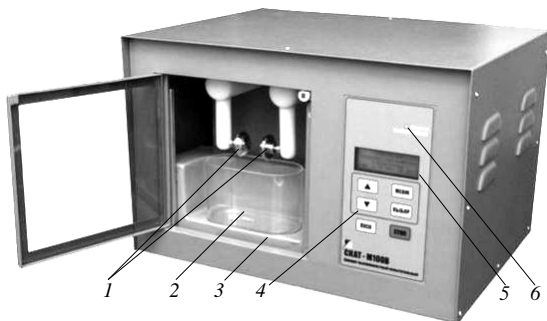


Рис. Аппарат высоковольтный испытательный СКАТ-М100В:

- 1 – высоковольтные электроды; 2 – емкость для жидкого диэлектрика;
3 – автоматический подъемный стол; 4 – панель управления;
5 – жидкокристаллический дисплей; 6 – индикатор высокого напряжения

1. Изучить паспорт аппарата СКАТ-М100В. Произвести подготовку аппарата к работе. Проверить заземление аппарата, которое должно быть выполнено гибким медным проводом сечением не менее 4 мм².

Внимание! Работа без заземления запрещена.

2. Включить аппарат и произвести его настройку в соответствии с паспортом и методикой определения электрической прочности трансформаторного масла. Установленные настройки записать в отчет. Выключить аппарат.

Порядок выполнения работы:

1. Залить первую пробу масла в испытательную емкость до отметки 400 мл. Установить емкость на автоматический подъемный стол и закрыть дверцу аппарата.

Внимание! Установку и выемку испытательной емкости следует производить только после выключения сетевого выключателя аппарата.

2. Включить аппарат и нажать на кнопку «ПУСК». Дальнейший процесс испытания проходит автоматически в соответствии с предварительно установленными настройками в меню аппарата.

3. По окончании испытаний занести в табл. 1.2 значения пробивного напряжения $U_{пр}$. Нажать на кнопку «▼» и занести в табл. 1.2 значения коэффициента вариации V и средней квадратичной ошибки σ_U , выведенные на дисплей аппарата.

4. Выключить аппарат, достать испытательную емкость и перелить трансформаторное масло в сосуд для хранения. Протереть испытательную емкость сухой ветошью, электроды аппарата – ветошью, смоченной обезжиривателем.

5. По заданию преподавателя произвести испытания нескольких проб трансформаторного масла в соответствии с п.п. 1–3 (повторная настройка аппарата не требуется).

6. Определить электрическую прочность $E_{пр}$ проб трансформаторного масла по формуле электрической прочности. Результаты расчета занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Электрическая прочность жидких диэлектриков

Номер пробы	h , мм	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр4}$, кВ	$U_{пр5}$, кВ	$U_{пр6}$, кВ	$U_{пр.ср}$, кВ	V , %	σ_U , кВ	$E_{пр}$, кВ/мм
	2,5										
	2,5										
	2,5										

Задание 2. Изучить явления пробоя воздуха.

Подготовка к работе:

Изучить паспорт и инструкцию по эксплуатации аппарата АИМ–80. Произвести подготовку аппарата к работе. Проверить заземление аппарата, которое должно быть выполнено гибким медным проводом сечением не менее 4 мм^2 .

Внимание! Работа без заземления запрещена.

Порядок выполнения работы:

1. Снять зависимость напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$ и электрической прочности $E_{\text{пр}}$ воздуха от расстояния h между электродами в однородном электрическом поле.


1.1. Установить в испытательный сосуд два полусферических электрода.

1.2. С помощью шаблона установить между осями электродов расстояние 5 мм.

1.3. Установить испытательный сосуд в аппарат АИМ-80.

Внимание! Установку и выемку испытательного сосуда следует производить только после выключения аппарата.

1.4. Включить аппарат выключателем сети «~». Проверить готовность аппарата к работе: должны гореть зеленая и желтая индикаторные лампы!

1.5. Нажать на кнопку включения испытательного напряжения «». При этом испытательное напряжение, приложенное к электродам, начнет равномерно возрастать.

1.6. Зафиксировать показание киловольтметра в момент, предшествующий пробоя. Полученное значение пробивного напряжения занести в табл. 1.3.

1.7. После пробоя дождаться возврата прибора в состояние готовности к работе (см. п. 1.4). В соответствии с п.п. 1.5–1.6 повторить измерения еще 2 раза. Результаты измерений занести в табл. 1.3.

1.8. Выключить аппарат и достать испытательный сосуд из аппарата.

1.9. В соответствии с п.п. 1.2–1.7 произвести измерения для значений расстояния между электродами 10, 15 и 20 мм. Результаты измерений занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Зависимость напряжения пробоя и электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном электрическом поле

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

1.10. Рассчитать среднее арифметическое значение пробивного напряжения $U_{пр. ср}$. Результаты расчета занести в табл. 1.3.

1.11. Определить электрическую прочность $E_{пр}$ воздуха по формуле электрической прочности. Для расчета использовать среднее значение пробивного напряжения $U_{пр. ср}$. Результаты расчета занести в табл. 1.3.

2. Снять зависимость напряжения пробоя $U_{пр}$ и электрической прочности воздуха $E_{пр}$ от расстояния h между электродами в неоднородном электрическом поле.

2.1. Установить в испытательный сосуд электроды: 1) типа «острие» и 2) полусферический.

2.2. Произвести измерения аналогично п.п. 1.1–1.9. Результаты измерений занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Зависимость напряжения пробоя и электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в неоднородном электрическом поле

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

2.3. Рассчитать среднее арифметическое значение пробивного напряжения $U_{пр. ср}$. Результаты расчета занести в табл. 1.4.

2.4. Определить электрическую прочность $E_{пр}$ воздуха в неоднородном электрическом поле по формуле электрической прочности.

Для расчета использовать среднее значение пробивного напряжения $U_{\text{пр.ср}}$. Результаты расчета занести в табл. 1.4.

3. По данным табл. 1.3 и 1.4:

– построить графики зависимости $U_{\text{пр.ср}} = f(h)$ в однородном и неоднородном электрическом поле в одной системе координат;

– построить графики зависимости $E_{\text{пр}} = f(h)$ в однородном и неоднородном электрическом поле в одной системе координат.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам расчетов и построенным графическим зависимостям. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Табл. 1.1–1.4 с результатами измерений и расчетов.
4. Расчетная формула электрической прочности.
5. Графики зависимостей $U_{\text{пр.ср}} = f(h)$ и $E_{\text{пр}} = f(h)$ в однородном и неоднородном электрическом поле.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Какое явление называется электрическим пробоем?
2. Дайте определение понятиям «пробивное напряжение» и «электрическая прочность».
3. В чем сущность процесса старения?
4. В чем сущность электрического, теплового и электрохимического механизмов пробоя?
5. Дайте определение понятию «поверхностный пробой».
6. Приведите примеры природных и синтетических жидких электроизоляционных материалов.
7. Как рассчитывается электрическая прочность диэлектрика?
8. Перечислите назначение и основные характеристики трансформаторного масла.

9. Перечислите достоинства и недостатки трансформаторного масла.
10. От каких факторов зависит электрическая прочность трансформаторного масла?
11. Какими способами очищают трансформаторное масло?
12. В чем сущность лавинного пробоя газообразных диэлектриков?
13. В чем сущность лавинно-стримерного пробоя газообразных диэлектриков?
14. Объясните особенности пробоя газообразных диэлектриков в однородном электрическом поле.
15. Объясните особенности пробоя газообразных диэлектриков в неоднородном электрическом поле.
16. Есть ли различия в состоянии газа и жидкости после пробоя? Восстанавливают ли они свою электрическую прочность?

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: исследовать удельные объемное и поверхностное сопротивления различных диэлектриков и получить навыки в работе с мегаомметром.

Задачи работы:

1. Изучить мегаомметр и порядок работы с ним при измерении сопротивления.
2. Определить удельное объемное сопротивление заданных образцов диэлектриков.
3. Определить удельное поверхностное сопротивление заданных образцов диэлектриков.
4. Снять зависимость объемного тока одного из образцов от величины приложенного напряжения.

Краткие теоретические сведения

Диэлектрики – материалы, способные поляризоваться, то есть способные создавать электростатическое поле.

По механизму поляризации диэлектрики делят на *пассивные* (линейные), поляризующиеся только во внешнем электрическом поле, и *активные* (нелинейные), способные поляризоваться и в поле, и без него.

Проводимость диэлектриков хотя и очень мала по сравнению с проводимостью проводников, но не равна нулю. В технических диэлектриках всегда есть небольшое количество примесных свободных зарядов, которые перемещаются в электрическом поле. Кроме того, при приложении постоянного либо переменного напряжения к диэлектрику в нем обязательно реализуются какие-либо виды поляризации, механизм которых определяется как природой диэлектрика, так и внешними условиями.

Полный ток в диэлектрике, или ток утечки I_y , представляет собой сумму трех составляющих:

$$I_y = I_{ск} + I_{см} + I_{абс}, \quad (2.1)$$

где $I_{ск}$ – сквозной ток, А;
 $I_{см}$ – ток смещения, А;
 $I_{абс}$ – абсорбционный ток, А.

Сквозной ток $I_{ск}$ обусловлен движением свободных носителей заряда, привнесенных в диэлектрик токопроводящими примесями.

Ток смещения $I_{см}$ возникает благодаря мгновенным видам поляризации, состоящей в смещении связанных зарядов в веществе. Эти процессы по времени протекают до момента установления равновесного состояния, создавая ток смещения $I_{см}$ в диэлектриках.

Абсорбционные токи $I_{абс}$ – это токи различных видов замедленной поляризации.

При *переменном напряжении* токи протекают в течение всего времени действия электрического поля на диэлектрик.

При *постоянном напряжении* сквозной ток существует в течение всего времени действия электрического поля на диэлектрик, а поляризационные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения. Токи смещения мгновенных видов поляризации очень кратковременны и их не удастся зафиксировать приборами. Токи абсорбции, обусловленные замедленной поляризацией, протекают по времени до ~1 мин (рис. 2.1).

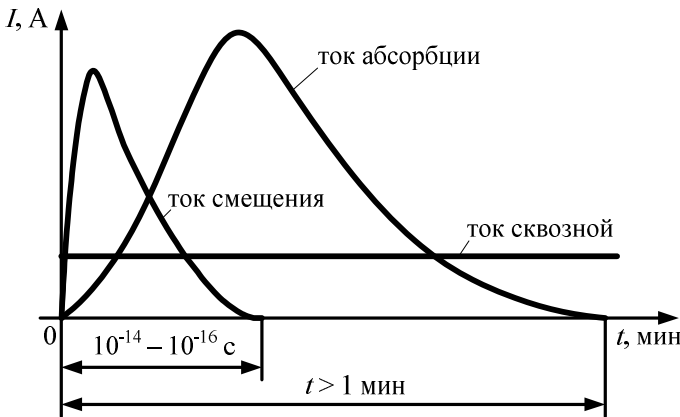


Рис. 2.1. Графики зависимости токов в диэлектрике от времени

Временем окончания поляризационных процессов принято считать 1 мин, поэтому истинная величина сопротивления изоляционного материала фиксируется через указанный промежуток времени после начала измерения.

Учитывая, что по времени токи смещения и абсорбционные токи при постоянном напряжении играют существенную роль только в моменты включения/выключения напряжения, график зависимости тока утечки от времени часто изображают как кривую, экспоненциально убывающую от максимального значения тока (рис. 2.2).

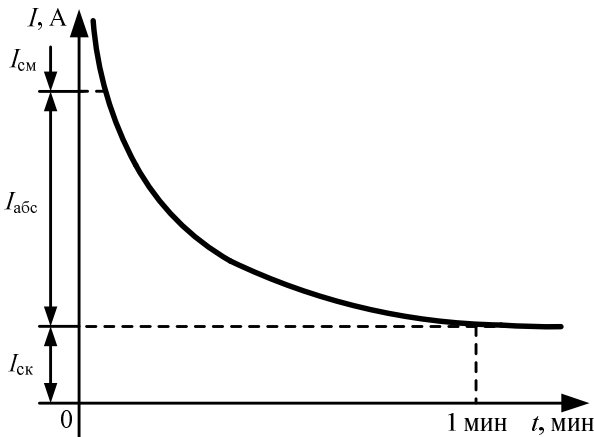


Рис. 2.2. График зависимости тока утечки через диэлектрик от времени

Ток утечки, протекающий через твердый диэлектрик под действием приложенного напряжения, состоит из объемного и поверхностного токов утечки. То есть сопротивление твердого диэлектрика складывается из объемного (внутренних областей) и поверхностного (внешних слоев) и может значительно различаться. Разделение тока (сопротивления) твердого диэлектрика на поверхностный и объемный связано с тем, что внешние факторы (загрязнения, влага и т. п.) значительно сильнее влияют на поверхностные слои, не проникая внутрь материала. В результате на поверхности диэлектрика возникает значительно большее количество токопроводящих примесей, электропроводность наружных слоев диэлектрика становится больше, чем проводимость внутренних областей. Поверхностное сопротивление, соответственно, становится меньше объемного.

При расчетах пользуются такими характеристиками, как удельное объемное сопротивление ρ_V и удельное поверхностное сопротивление ρ_S .

В системе измерений (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.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S равно сопротивлению квадрата, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит по поверхности квадрата от одной его стороны к противоположной.

При повышении температуры удельное сопротивление электроизоляционных материалов уменьшается. У твердых диэлектриков это явление объясняется, главным образом, увеличением числа носителей заряда при нагревании.

Удельное сопротивление диэлектриков в ряде случаев зависит также от величины приложенного напряжения, уменьшаясь при ее возрастании. Эта зависимость обнаруживается при неплотном прилегании электродов к поверхности изоляции. Она также наблюдается и у пористых материалов в результате перераспределения влаги в капиллярах под действием приложенного напряжения, а также в случае образования объемных зарядов в диэлектрике, создающих электродвижущую силу высоковольтной поляризации. Подразумеваются значения напряжений, далекие от пробивных.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения объемного и поверхностного сопротивлений представлена на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Лабораторная установка:
1 – измерительная электродная система; 2 – мегаомметр

Измерения производятся при постоянном напряжении. Для определения электрического сопротивления твердых диэлектриков используется измерительная система, состоящая из трех металлических электродов, к которым подключается мегаомметр (рис. 2.4).

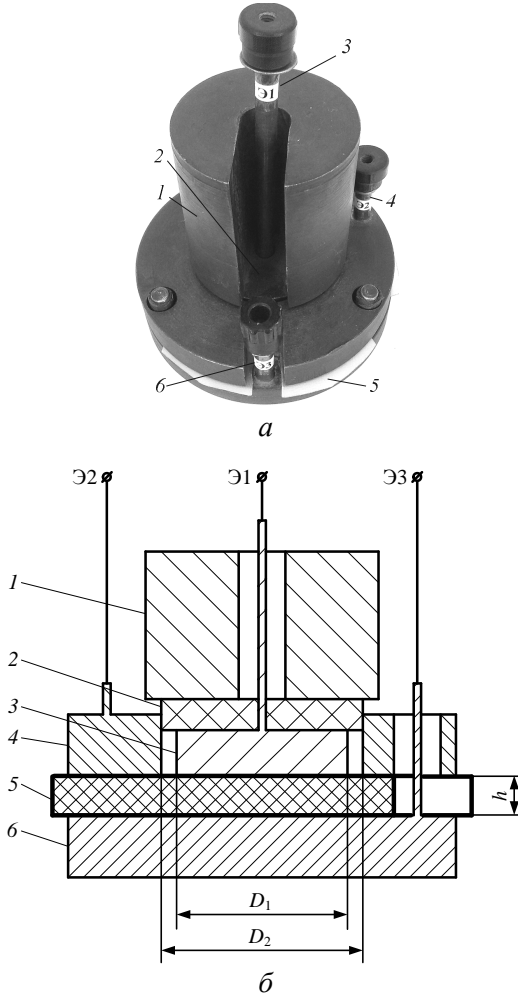


Рис. 2.4. Измерительная электродная система:
 а – общий вид; б – вид в разрезе; 1 – прижимной цилиндр;
 2 – изолирующая вставка; 3, 4, 6 – измерительные электроды
 Э1, Э2 и Э3 соответственно; 5 – исследуемый материал

Для измерения объемного R_V и поверхностного R_S сопротивлений к электродам Э1, Э2 и Э3 по схемам (рис. 2.5) подключаются измерительные клеммы r_x мегаомметра («—» и «Э») и клемма с охраняемым кольцом (ОК).

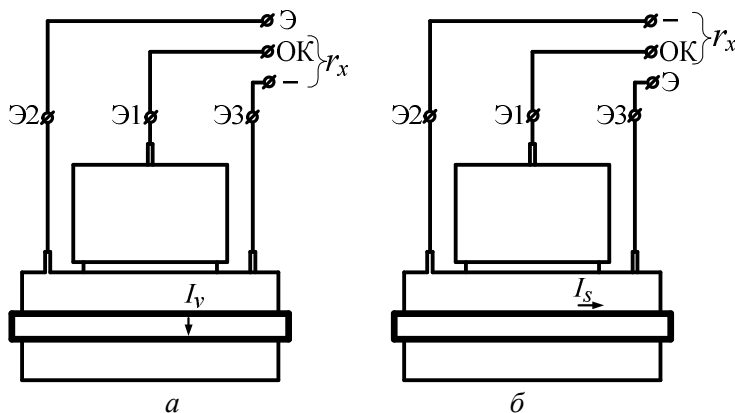


Рис. 2.5. Схема измерения объемного R_V (а) и поверхностного R_S (б) сопротивления исследуемого материала

При измерении объемного сопротивления исследуемого материала (рис. 2.5, а) постоянное напряжение U подается на электроды Э1 и Э3. Между ними через объем диэлектрика протекает ток. Электрод Э2 заземлен через клемму «Э». Поэтому ток, протекающий по поверхности исследуемого материала, отводится на землю и не измеряется измерительным прибором. Заземление Э2 обеспечивает выравнивание электрического поля у краев электродов. Для учета неоднородности поля принимается, что ток протекает через поперечное сечение диаметром D_0 , м:

$$D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2}, \quad (2.2)$$

где D_1 – диаметр электрода Э1, м;

D_2 – внутренний диаметр электрода Э2, м.

Удельное объемное электрическое сопротивление ρ_V (Ом·м) диэлектрика определяют по формуле

$$\rho_V = \frac{R_V S}{h}, \quad (2.3)$$

где R_V – объемное сопротивление, Ом;

S – площадь поперечного сечения, перпендикулярная направлению прохождения тока, м²;

h – толщина диэлектрика, м.

Площадь поперечного сечения S (м²) при протекании объемного тока составит

$$S = \frac{\pi D_0^2}{4} = \frac{\pi(D_1 + D_2)^2}{16}. \quad (2.4)$$

Следовательно, удельное объемное сопротивление ρ_V равно

$$\rho_V = R_V \frac{\pi(D_1 + D_2)^2}{16h}. \quad (2.5)$$

Объемный ток I_V (А) рассчитывается по формуле

$$I_V = \frac{U}{R_V}, \quad (2.6)$$

где U – приложенное к диэлектрику постоянное напряжение, В.

При измерении поверхностного сопротивления (рис. 2.5, б) напряжение подается на электроды Э1 и Э2. Электрод Э3 заземлен, поэтому объемный ток, протекающий через исследуемый материал, отводится на землю и не измеряется измерительным прибором.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление ρ_S (Ом) диэлектрика определяют по формуле

$$\rho_S = \frac{R_S d}{l}, \quad (2.7)$$

где R_S – поверхностное сопротивление, Ом;

d – ширина параллельно расположенных электродов, м;

l – расстояние между электродами, м.

Поверхностный ток протекает по пути длиной l , м:

$$l = \frac{D_2 - D_1}{2}. \quad (2.8)$$

Ширина, м, параллельно расположенных электродов составит

$$d = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4}. \quad (2.9)$$

Тогда удельное поверхностное электрическое сопротивление ρ_S можно рассчитать по формуле

$$\rho_S = R_S \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{2(D_2 - D_1)}. \quad (2.10)$$

Поверхностный ток I_S (А) рассчитывается по формуле

$$I_S = \frac{U}{R_S}. \quad (2.11)$$

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкторские материалы»).

2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе:

1. Изучить паспорт мегаомметра.
2. Вставить вилку мегаомметра в розетку «~220 В».
3. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF3**.
4. Произвести калибровку мегаомметра в соответствии с методикой, описанной в паспорте прибора.
5. Выключить автоматический выключатель **QF3**.
6. Получить у преподавателя пронумерованные образцы диэлектрических материалов и определить их наименование по табл. 2.1.

Таблица 2.1

Наименование образцов электроизоляционных материалов

№ позиционного обозначения	Наименование образца
1	Электротехнический картон
2	Полиэтилен
3	Гетинакс
4	Гетинакс металлизированный
5	Стеклотекстолит
6	Изофлекс
7	Оргстекло
8	Резина
9	Текстолит (пластик)

7. Записать наименование исследуемых диэлектриков в табл. 2.2 и 2.3.

Задание 1. Определить удельное объемное сопротивление ρ_v образцов диэлектрических материалов.

Порядок выполнения работы:

1. Измерить толщину исследуемых образцов с помощью штангенциркуля. Полученные данные записать в табл. 2.2.

2. Исследуемые образцы поочередно поместить в установку с электродами.

3. Подключить к электродам клеммы мегаомметра (рис. 2.5, а).

4. Переключателем мегаомметра установить измерительное напряжение 1000 В и включить **QF3**.

5. Произвести измерения объемного сопротивления R_V различных образцов диэлектрических материалов. *Показания мегаомметра снимать через 1 мин после включения прибора.* Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Удельное объемное сопротивление твердых диэлектриков

№ образца	Наименование исследуемого диэлектрика	h , м	U , В	R_V , МОм	ρ_V , Ом·м	I_V , А
1			1000			
2						
3						
4						
5						

6. Выключить **QF3**.

7. Рассчитать значение удельного объемного сопротивления ρ_V по формуле (2.5). Принять диаметры электродов $D_1 = 0,05$ м и $D_2 = 0,055$ м.

8. Рассчитать объемный ток I_V по формуле (2.6).

9. Результаты расчета занести в табл. 2.2.

Задание 2. Определить удельное поверхностное сопротивление ρ_s образцов диэлектрических материалов.

Порядок выполнения работы:

1. Поочередно поместить в установку с электродами те же исследуемые образцы, которые использовались при выполнении задания 1.

2. Подключить к электродам клеммы мегаомметра (см. рис. 2.5, б).

3. Переключателем мегаомметра установить измерительное напряжение 1000 В и включить **QF3**.

4. Произвести измерения поверхностного сопротивления R_S различных образцов диэлектрических материалов. *Показания мегомметра снимать через 1 мин после включения прибора.* Результаты измерений занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Удельное поверхностное сопротивление твердых диэлектриков

№ образца	Наименование исследуемого диэлектрика	U , В	R_S , МОм	ρ_s , Ом	I_s , А
1		1000			
2					
3					
4					
5					

5. Выключить **QF3**.
6. Рассчитать значение удельного поверхностного сопротивления ρ_S по формуле (2.10). Принять диаметры электродов $D_1 = 0,05$ м и $D_2 = 0,055$ м.
7. Рассчитать поверхностный ток I_S по формуле (2.11).
8. Результаты расчета занести в табл. 2.3.

Задание 3. Снять зависимость объемного сопротивления R_V от величины приложенного напряжения U для одного из образцов.

Порядок выполнения работы:

1. По заданию преподавателя выбрать один из исследуемых образцов и записать его наименование в табл. 2.4.
2. Собрать схему согласно рис. 2.5, а. Включить **QF3**.
3. Измерить объемное сопротивление R_V выбранного образца при различных измерительных напряжениях мегаомметра. Результаты измерений занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Зависимость объемного сопротивления от приложенного напряжения

Наименование исследуемого диэлектрика	Величина напряжения, В	R_V , МОм	I_V , А	ρ_V , Ом·м
	100			
	500			
	1000			
	2500			

4. Выключить **QF1** и **QF3**.
5. Рассчитать удельное объемное сопротивление ρ_V и объемный ток I_V по формулам (2.5) и (2.6) соответственно. Результаты расчета занести в табл. 2.4.
6. По данным табл. 2.4 построить графические зависимости $I_V = f(U)$ и $R_V = f(U)$.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам расчетов и построенным графическим зависимостям. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Схемы включения установки для измерения удельного объемного R_V и поверхностного R_S сопротивлений (см. рис. 2.5, а, б).
4. Таблицы 2.2–2.4 с результатами измерений и расчетов.
5. Расчетные формулы (2.5), (2.6), (2.10) и (2.11).
6. Графики зависимости $I_V = f(U)$ и $R_V = f(U)$ по данным табл. 2.4.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему диэлектрики проводят электрический ток?
2. Какие носители электрического тока в диэлектриках?
3. Начертите график зависимости тока утечки от времени и перечислите составляющие тока утечки.
4. От каких факторов зависит проводимость диэлектриков?
5. Почему у твердых диэлектриков различают объемное и поверхностное электрические сопротивления?
6. Через какой промежуток времени измеряют ток утечки?
7. В каких единицах измеряют удельное объемное и удельное поверхностное электрическое сопротивление?
8. Как и почему изменяются величины ρ_V и ρ_S при изменении влажности и температуры образца диэлектрика?

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить электротехнические характеристики проводников.

Задачи работы:

1. Снять зависимость сопротивления различных проводников от температуры.
2. Рассчитать удельные сопротивления проводников.
3. Построить графики зависимостей сопротивления различных проводников от температуры.
4. Получить навыки работы на лабораторном стенде НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс».

Краткие теоретические сведения

Проводники – материалы, имеющие свободные носители заряда.

Удельное сопротивление проводника: $\rho < 10^{-5}$, Ом·м.

Проводниками электрического тока могут быть (по агрегатному состоянию) *твердые тела*, *жидкости* и при определенных условиях *газы*.

Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются *металлы и их сплавы*. Носителями электрического тока в металлах как в твердом, так и в жидком (расплавленном) состоянии являются свободные электроны.

Природа проводимости в металлах. Свойства металлов, в том числе электрические, связаны с их особым строением. Большинство металлов в свободном виде имеют кристаллическую структуру, то есть атомы в пространстве занимают только определенные места (узлы). Однако согласно классической модели в узлах кристаллической решетки металлов находятся не атомы, а положительно заряженные «ионные остовы». Ионный остов – это атом, отдавший один-два валентных электрона в общее пользование. Образуется общий электронный газ, окружающий ионные остовы атомов. Коллективизированные электроны совершают хаотичное тепловое движение со средней скоростью порядка 10^5 м/с. Ионные остовы

в это время совершают колебания около равновесных положений в узлах решетки. В отсутствие внешнего поля на макроскопическом уровне металл остается электрически нейтральным. При наложении электрического поля электрон получает направление движения (к положительному электроду) и дополнительную энергию eU , что приводит к увеличению скорости движения электрона (на несколько миллиметров в секунду). В результате в металле течет электрический ток.

Основными электротехническими характеристиками проводников являются удельная проводимость γ и удельное сопротивление ρ .

Удельная проводимость металлов, согласно классической теории металлов, является коэффициентом пропорциональности между плотностью j тока и напряженностью E (См/м) электрического поля:

$$j = \gamma E; \quad (3.1)$$

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2mV_T}, \quad (3.2)$$

где e – заряд электрона, Кл;

n_0 – число свободных электронов в единице объема металла, м^{-3} ;

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

m – масса электрона, кг;

V_T – средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле, м/с.

С ростом температуры скорости электронов растут, однако длина свободного пробега значительно снижается, что ведет к снижению проводимости, согласно формуле (3.2). Причина уменьшения длины свободного пробега электрона в том, что с ростом температуры растут амплитуды колебаний ионных остовов. Направленно двигающиеся электроны сталкиваются с остовами и отклоняются от направления движения. Таким образом, *с ростом температуры удельная проводимость металлов падает, соответственно, удельное сопротивление растет.*

Удельное сопротивление ρ (Ом·м) – величина, обратная проводимости:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}; \quad (3.3)$$

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (3.4)$$

где S – площадь поперечного сечения проводника, м²;
 l – длина проводника, м.

Значения удельного сопротивления некоторых металлов при температуре $t = 20$ °С приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Удельное сопротивление некоторых металлов

Наименование металла	Удельное сопротивление $\rho_0 \cdot 10^{-6}$, Ом·м
Алюминий	0,028
Вольфрам	0,055
Железо	0,098
Золото	0,023
Константан	0,44–0,52
Латунь	0,025–0,060
Манганин	0,42–0,48
Медь	0,0175
Молибден	0,057
Никелин	0,39–0,45
Никель	0,100
Олово	0,115
Ртуть	0,958
Свинец	0,221
Серебро	0,016
Тантал	0,155
Нихром	1,05–1,40
Фехраль	1,1–1,3
Хром	0,027
Цинк	0,059

Температурный коэффициент удельного сопротивления TK_ρ , или α_ρ , K^{-1} – это характеристика, показывающая изменение удельного сопротивления при изменении температуры на 1 градус:

$$TK_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (3.5)$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления – величина, равная относительному изменению удельного сопротивления материала при изменении температуры на единицу.

На практике на ограниченном отрезке температур допустима линейная аппроксимация удельного сопротивления металла от T_k до $T_{\text{плав}}$ (рис. 3.1).

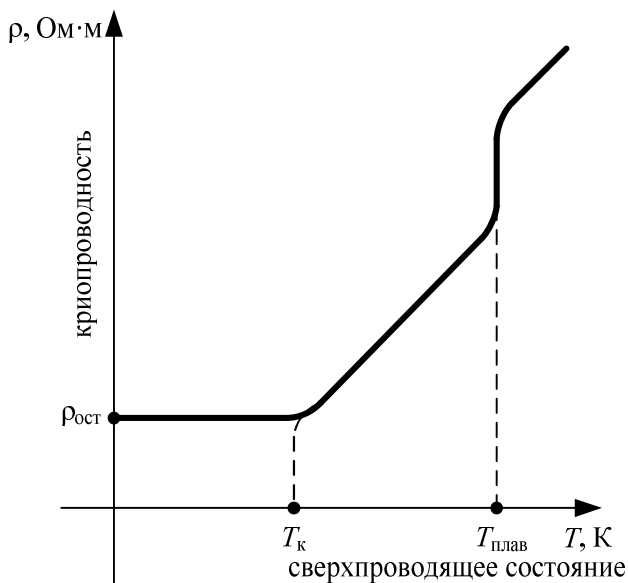


Рис. 3.1. График зависимости удельного сопротивления металла от температуры

В таком случае в узком диапазоне температур от T_1 до T_2 можно предельно точно определить удельное сопротивление (Ом·м) для любой температуры, используя следующую формулу:

$$\rho_2 = \rho_1(1 + \bar{\alpha}_p(T_2 - T_1)), \quad (3.6)$$

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

$\bar{\alpha}_p$ – средний температурный коэффициент удельного сопротивления данного материала в диапазоне температур от T_1 до T_2 , K^{-1} .

Удельная проводимость металлов – величина, обратная удельному сопротивлению. С ростом температуры она снижается, что связано с уменьшением средней длины свободного пробега электрона λ .

Значения температурных коэффициентов сопротивления некоторых металлов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Температурные коэффициенты сопротивления металлов

Наименование металла	Температурный коэффициент $\alpha_p \cdot 10^{-3}, K^{-1}$
Алюминий	4,20
Алюминиевый провод	3,80
Вольфрам	5,00
Железо	6,00
Константан (сплав Ni + Cu + Mn)	0,05
Латунь	0,10–0,40
Манганин (сплав Cu + Mn + Ni-приборный)	0,01
Медь	4,00
Никелин (сплав Cu + Ni)	0,10
Нихром (сплав Ni + Cr + Fe + Mn)	0,10
Олово	3,90
Платина	1,00
Ртуть	3,70
Свинец	4,10
Серебро	

Наименование металла	Температурный коэффициент $\alpha_p \cdot 10^{-3}, K^{-1}$
Фехраль (сплав Cr (12 %–15 %) + Al (3,5 %–5,5 %)+ + Si (1 %) + Mn (0,7 %) + Fe)	0,10
Цинк	4,20
Чугун	1,00

Из данных табл. 3.2 видно, что существуют металлы, для которых коэффициент α_p имеет крайне малую величину, то есть металлы, удельное сопротивление которых мало зависит от температуры.

Условно проводники классифицируют следующим образом:

1. Проводники с высокой удельной проводимостью: $\rho < 10^{-7}$, Ом·м (медь, золото, алюминий, серебро).

2. Проводники с высоким удельным сопротивлением (как правило, это сплавы – константан, фехраль, нихром и др.), их удельное сопротивление ρ лежит в области от 10^{-5} до 10^{-7} , Ом·м.

3. Контактные материалы.

4. Крио- и сверхпроводники (см. рис. 3.1).

К наиболее распространенным проводникам высокой проводимости относят *медь* и *алюминий*. К наиболее распространенным проводникам высокого электрического сопротивления относят сплавы на основе меди – *константан*, *манганин*, на основе железа – *нихром*, *фехраль* и др. Они используются для изготовления образцовых резисторов, электронагревательных приборов, деталей электроизмерительных приборов. Большинство сплавов этой группы имеют малый температурный коэффициент удельного сопротивления.

Манганин – наиболее типичный и широко применяемый сплав высокого сопротивления, примерный его состав: Cu – 85 %, Mn – 12 %, Ni – 3 %.

Константан – сплав, содержащий около 60 % меди и 40 % никеля. Он обладает малой величиной температурного коэффициента сопротивления, часто принимаемой равной нулю. Однако в паре с медью он создает большую термоЭДС. Константановая проволока выпускается с эмалевой, эмалево-шелковой и эмалево-хлопчатобумажной изоляцией.

Нихром, фехраль являются жаростойкими материалами, применяемыми в электронагревательных приборах и печах, где необходима длительная работа при температурах от 800 °С до 1200 °С. Для данных сплавов характерна стойкость к окислению при высоких температурах.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения зависимости сопротивления проводников от температуры представлена на рис. 3.2.

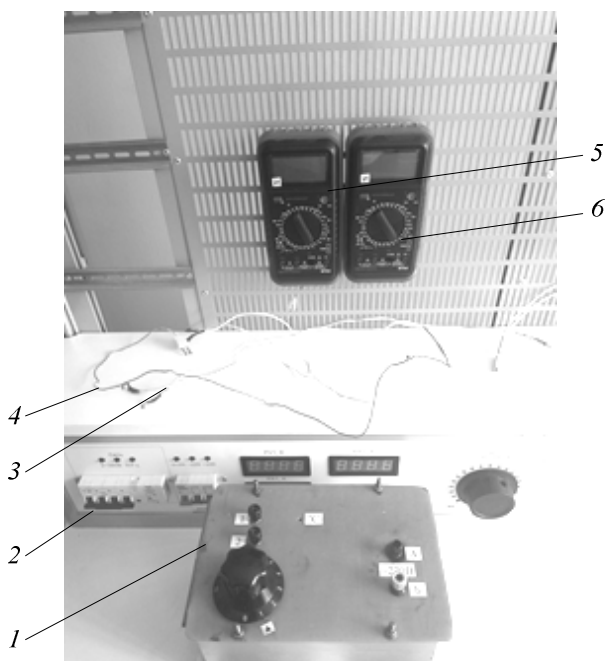


Рис. 3.2. Лабораторная установка (общий вид):

1 – испытательная емкость; 2 – базовый стенд НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс»; 3 – измерительные провода; 4 – датчик температуры (термопара);
5, 6 – многофункциональные цифровые мультиметры Mastech MY64 – соответственно М1 и М2

Установка представляет собой базовый стенд НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс» 2, на который установлена испытательная

емкость 1. Мультиметр 5 (M1) и датчик температуры (термопара) 4 используются для измерения температуры проводниковых материалов, загруженных в испытательную емкость 1. Мультиметр 6 (M2) с помощью измерительных проводов 3 подключается к испытательной емкости 1 для измерения сопротивления образцов проводников. Измерительная панель испытательной емкости представлена на рис. 3.3.

В отверстие 1 опускается датчик температуры, подключенный к мультиметру M1. К зажимам 2 («1» и «2») через пакетный переключатель 3 внутри емкости подсоединены образцы проводниковых материалов. Для измерения их сопротивления к зажимам 2 с помощью измерительных проводов подключается мультиметр M2. К зажимам 4 («А» и «Б») внутри емкости подсоединен нагреватель. С помощью измерительных проводов зажимы 4 подключаются к стенду НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс» для питания установки от сети переменного напряжения 220 В.

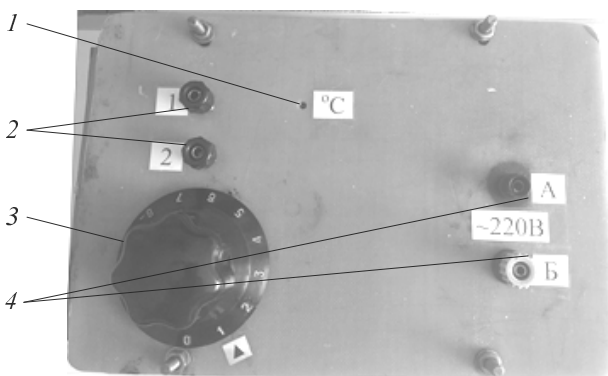


Рис. 3.3. Измерительная панель испытательной емкости:

- 1 – отверстие для датчика температуры;
- 2 – зажимы для подключения мультиметра M2; 3 – пакетный переключатель;
- 4 – зажимы для подключения к источнику питания

Лабораторная установка работает следующим образом. При подаче напряжения питания на нагреватель через зажимы «А» и «Б» идет нагрев трансформаторного масла, которым заполнена испытательная емкость. В результате образцы проводниковых материалов, которые погружены в трансформаторное масло, также нагреваются.

ся. При отключении напряжения питания трансформаторное масло, которое обладает хорошей теплопроводностью, повышает скорость охлаждения нагревателя и проводниковых материалов.

При отключенном напряжении питания измеряются сопротивления образцов проводниковых материалов при начальной (комнатной) температуре. Измерения проводятся поочередно с помощью пакетного переключателя. Далее в режиме нагрева производится измерение сопротивления проводников при значениях температуры, указанных преподавателем.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкторские материалы»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе:

1. Изучить инструкцию по эксплуатации мультиметра Mastech MY64.

2. На мультиметре M1 выбрать режим измерения температуры. Подключить к мультиметру измерительную термопару.

Внимание! Для корректной работы в верхнее гнездо разъема мультиметра «ТЕМР» должен быть вставлен контакт «К» термопары.

3. Опустить спай термопары в испытательную емкость примерно до середины ее глубины.

4. На мультиметре M2 выбрать режим измерения сопротивления. Подключить к мультиметру измерительные провода и присоединить их к зажимам «1» и «2» испытательной емкости.

5. Подключить измерительные провода: одним концом к зажимам «А», «Б» нагревателя, вторым – к розетке «~220 В» стенда НТЦ-08.47.1.

Задание 1. Измерить сопротивление проводниковых материалов при различной температуре.

Порядок выполнения работы:

1. Включить автоматический выключатель **QF1** и запустить мультиметры M1 и M2.

2. Занести в табл. 3.3 значение начальной температуры T_H в испытательной емкости (показание мультиметра M1).

3. Перевести пакетный переключатель в *позицию 4*. Измерить при значении начальной температуры T_H начальное сопротивление R_H первого образца проводникового материала. Результаты занести в табл. 3.3.

4. Аналогично п. 1.3 произвести измерения для других образцов проводниковых материалов, поочередно переводя переключатель в *позиции 5, 6 и 7* соответственно. Результаты занести в табл. 3.3.

5. Включить однополюсный автоматический выключатель *QF3*. Нагреть исследуемые образцы до температуры, указанной преподавателем. С помощью мультиметра M2 измерить сопротивление четырех проводниковых материалов в контрольных точках температуры. Для снижения влияния инерционности процесса нагрева на точность измерений при снятии показаний мультиметра рекомендуется отключать нагреватель от сети (однополюсный автоматический выключатель *QF3*).

Результаты измерений занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Зависимость сопротивления проводниковых материалов от температуры

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление $R, \text{Ом}$			
	Переключатель в позиции			
	4	5	6	7
T_H				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				

6. Выключить *QF1* и *QF3*.

7. По результатам измерений построить графические зависимости $R = f(T)$ для четырех проводниковых материалов.

Задание 2. Определить наименование проводниковых материалов под каждым номером и рассчитать температурный коэффициент их удельного сопротивления.

Порядок выполнения работы:

1. Проводниковые материалы изготовлены из проволоки известной длины l круглого сечения известного диаметра d (табл. 3.4, см. номер указанного преподавателем лабораторного стенда).

Таблица 3.4

Данные для расчета проводниковых материалов

№ позиции	Длина провода l , м	Диаметр провода d , м
<i>Лабораторный стенд № 4</i>		
4	205	$0,112 \cdot 10^{-3}$
5	2,5	$0,21 \cdot 10^{-3}$
6	14	$0,12 \cdot 10^{-3}$
7	100	$0,4 \cdot 10^{-3}$
<i>Лабораторный стенд № 8</i>		
4	370	$0,14 \cdot 10^{-3}$
5	12	$0,21 \cdot 10^{-3}$
6	14	$0,12 \cdot 10^{-3}$
7	2257	$0,5 \cdot 10^{-3}$

2. Выписать данные из табл. 3.4 в зависимости от номера лабораторного стенда в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Определение температурного коэффициента удельного сопротивления проводниковых материалов

№ поз.	l , м	d , м	S , м ²	R_H , Ом·м	Наименование материала	ρ_0 , Ом·м	ρ_K , Ом·м	α_p , К ⁻¹	T_X , °С	ρ_X , Ом·м
4										
5										
6										
7										

3. Определить площадь поперечного сечения образцов, m^2 :

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (3.7)$$

4. Определить удельное сопротивление ρ_H (Ом·м) проводниковых материалов при начальной температуре T_H :

$$\rho_H = \frac{R_H S}{l}, \quad (3.8)$$

где R_H – сопротивление проводникового материала при начальной температуре T_H (см. табл. 3.3, первая строка), Ом.

5. Используя рассчитанное значение удельного сопротивления ρ_H , по табл. 3.1 определить наименование проводниковых материалов и записать их в табл. 3.5.

6. Уточнить из данных табл. 3.1 значения удельного сопротивления проводниковых материалов ρ_0 и занести их в табл. 3.5.

7. Определить удельное сопротивление ρ_K (Ом·м) проводниковых материалов при конечной температуре T_K :

$$\rho_K = \frac{R_K S}{l}, \quad (3.9)$$

где R_K – сопротивление проводникового материала при конечной температуре (см. табл. 3.3, последняя строчка), Ом.

8. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления α_p , K^{-1} :

$$\alpha_p = \frac{1}{\rho} \frac{\rho_K - \rho_H}{T_K - T_H}. \quad (3.10)$$

9. Сравнить расчетное значение температурного коэффициента удельного сопротивления α_p со справочным значением (см. табл. 3.2).

10. По заданию преподавателя определить удельное сопротивление ρ_X (Ом·м) исследуемых проводниковых материалов при температуре T_X (задается преподавателем) внутри интервала температур ($T_K - T_H$) по следующей формуле:

$$\rho_x = \rho_0(1 + \alpha_p(T_x - T_H)). \quad (3.11)$$

Результаты расчета занести в табл. 3.5.

Выводы

Сделать и записать выводы по проделанной работе с объяснением полученных зависимостей. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Табл. 3.3 и 3.5 с результатами измерений и расчетов.
4. Графики зависимости $R = f(T)$ для четырех проводниковых материалов по данным табл. 3.3.
5. Расчетные формулы (3.7)–(3.11).
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятию «проводник».
2. Какова природа проводимости в металлах?
3. Какие частицы являются носителями электрического тока в металлах?
4. Начертите график зависимости удельного сопротивления от температуры для проводника.
5. Почему в области низких температур кривая $R = f(T)$ (общий вид) раздваивается?
6. Какой знак имеет температурный коэффициент удельного сопротивления металлов и почему?
7. Укажите классы, на которые условно делят проводники.
8. Одинаково ли изменяется сопротивление с ростом температуры для проводников с высоким удельным сопротивлением и высокой удельной проводимостью в области температур 20 °С–100 °С?
9. Приведите примеры проводников с высокой удельной проводимостью.
10. Приведите примеры проводников с высоким удельным сопротивлением.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить электротехнические характеристики полупроводниковых материалов и компонентов.

Задачи работы:

1. Получить навыки работы на лабораторном стенде НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс».
2. Измерить сопротивления полупроводниковых компонентов при различных значениях температуры.
3. Построить графики зависимостей сопротивления различных полупроводниковых компонентов от температуры.

Краткие теоретические сведения

Полупроводники – материалы с управляемой проводимостью.

Удельное сопротивление полупроводников: $10^{-5} \leq \rho \leq 10^8$, Ом·м.

Собственные (идеальные) полупроводники в технике практически не применяют. На их основе получают полупроводниковые компоненты (элементы).

Полупроводниковые компоненты – это простейшие устройства, состоящие из нескольких полупроводников с разными свойствами.

Механизм собственной электропроводности полупроводников. Химическая связь (*ковалентная*) между соседними атомами в полупроводнике осуществляется за счет взаимодействия их валентных электронов, которые образуют общие для соседних атомов электронные пары. В идеальном полупроводнике все валентные электроны участвуют в образовании химической связи и свободных электронов нет.

При низких температурах у идеальных полупроводников свободные носители заряда (электроны) отсутствуют, и они абсолютно не проводят электрический ток.

Чтобы в полупроводнике появились свободные носители заряда, надо разорвать ковалентную связь, то есть сообщить электрону

дополнительную энергию активации ΔW_a , равную энергии разрыва ковалентной связи.

Полупроводник, в котором электропроводность возникает за счет разрыва собственных ковалентных связей, называют *собственным*.

Электрон, освободившийся из ковалентной пары, оставляет после себя одно вакантное место. Этому вакантному электронному месту приписывается положительный заряд, и оно рассматривается как фиктивная, положительно заряженная частица (*дырка*). То есть *электроны и дырки* – носители электрического тока в полупроводниках.

Беспримесный полупроводник (собственный), то есть совершенно чистый полупроводник без дефектов кристаллической решетки, имеет одинаковую концентрацию электронов и дырок: $n = p$.

Собственная электропроводность полупроводника складывается из электронной γ_n и дырочной γ_p проводимостей, См:

$$\gamma = \gamma_n + \gamma_p. \quad (4.1)$$

Собственная проводимость – это проводимость полупроводников, обусловленная разрывом собственных ковалентных связей.

Примесная проводимость – это проводимость полупроводников, обусловленная наличием в них примесей. Именно примесные полупроводники широко применяются в электротехнике.

Легирование – целенаправленное введение примесей в материал с целью придания нужных свойств.

От типа примеси зависит, чего больше – электронов или дырок – в легированном полупроводнике. Чтобы получить преобладание электронов, полупроводник необходимо легировать примесью с большей валентностью, чем его собственная (*донорная примесь*). Чтобы получить полупроводник с преобладанием дырок, его нужно легировать примесью с меньшей валентностью, чем его собственная (*акцепторная примесь*).

Если в полупроводнике наблюдается электронная проводимость, его называют полупроводником *n*-типа. Если преобладают дырки – проводимость дырочная (*p*-тип).

Собственная проводимость идеального полупроводника не относится ни к *n*-типу, ни к *p*-типу. Собственная проводимость полупроводников существует только в теоретических построениях, так как совершенно чистых веществ не существует.

Основными электротехническими характеристиками полупроводниковых материалов так же, как и для металлов, являются удельное сопротивление ρ и удельная проводимость γ .

Удельные электронная γ_n и дырочная γ_p (См) проводимости полупроводника рассчитываются по формулам:

$$\gamma_n = \mu_n n_0 q; \quad (4.2)$$

$$\gamma_p = \mu_p n_0 q, \quad (4.3)$$

где μ_n и μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно, $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$;
 n_0 – концентрация электронов (дырок), м^{-3} ;
 q – заряд электрона, Кл.

Подвижность носителей заряда, $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$:

$$\mu = \frac{V}{E}, \quad (4.4)$$

где V – средняя скорость их дрейфа в электрическом поле, $\text{м}/\text{с}$;
 E – напряженность электрического поля, $\text{В}/\text{м}$.

Температура влияет на собственную электропроводность полупроводников. Подвижность носителей заряда μ , определяемая их эффективной массой, скоростью и частотой столкновений с узлами и дефектами кристаллической решетки, слабо зависит от температуры. На характер зависимости электропроводности полупроводника от температуры основное влияние оказывает концентрация носителей заряда.

Если за счет внешней энергии повысить температуру полупроводника, то некоторые слабо связанные электроны атомов примесей могут перейти в зону проводимости. Им для перехода в зону проводимости нужна энергия много меньшая, чем энергия активации электронов самого полупроводника.

С ростом температуры концентрация носителей заряда в полупроводнике возрастает, следовательно, *проводимость растет, а сопротивление падает* (рис. 4.1).

Температурный коэффициент удельного сопротивления собственного полупроводника, как и для металла, показывает относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один градус.

Следовательно, температурный коэффициент удельного сопротивления собственных полупроводников отрицательный.

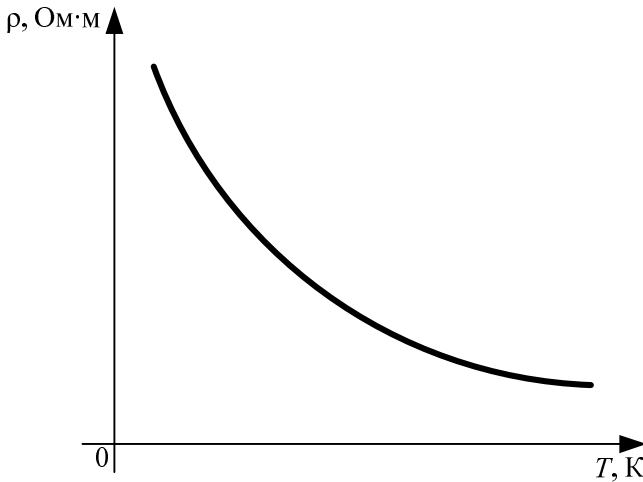


Рис. 4.1. График зависимости удельного сопротивления полупроводников от температуры

На основе полупроводников изготавливается большое количество различных простейших полупроводниковых приборов — компонентов.

С точки зрения использования в электротехнике важнейшими используемыми эффектами в полупроводниках являются эффекты выпрямления (соответствующие компоненты — *диоды*), усиления (*транзисторы*), фотоэлектрический эффект (*фоторезисторы*), термоэлектрический (*терморезисторы*) и др. Зависимость удельной проводимости некоторых полупроводников от напряжения используется для создания *варисторов*, которые широко используются для искрогашения на контактах реле и защиты от перенапряжений элементов электрических цепей.

Большая зависимость удельной электрической проводимости полупроводников от температуры используется для создания температурно-зависимых резисторов-терморезисторов, в том числе датчиков температуры.

Терморезистор – простейший полупроводниковый компонент с температурнозависимым электрическим сопротивлением. Изобретенный в 1930 году ученым Самюэлем Рубеном, компонент находит самое широкое применение в современной технике.

Изготавливают терморезисторы из особых, специфичных полупроводниковых материалов, температурный коэффициент сопротивления (ТКС) которых достаточно высок (рис. 4.2).

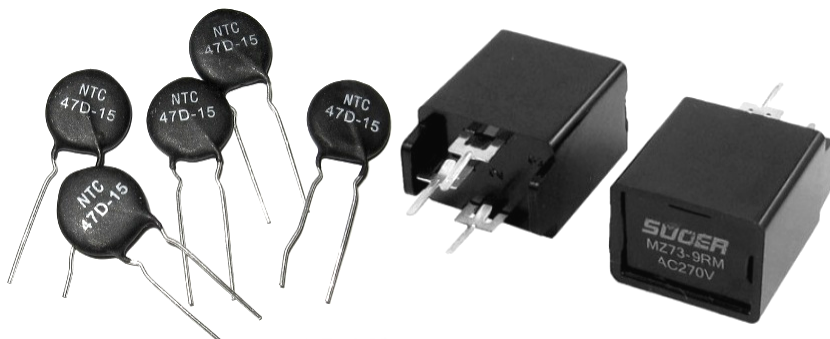


Рис. 4.2. Терморезисторы (общий вид)

По характеру зависимости сопротивления элемента от температуры терморезисторы разделяют на две большие группы: позисторы и термисторы.

Позисторы обладают положительным ТКС; их применяют для защиты электродвигателей от перегрузки, для задержки времени включения импульсных блоков питания, в измерительных приборах, в устройствах памяти, в качестве саморегулирующихся нагревательных элементов и др.

Термистор – температурнозависимый резистор, имеющий высокую чувствительность и обладающий отрицательным ТКС. Применяется для контроля изменения температуры в бытовой технике (морозильники, фены, холодильники и т. д.); автомобильной электронике (измерение охлаждения антифриза, масла, контроль выхлопных газов и др.); кондиционерах (распределение тепла, контроль температуры в помещении); отопительных котлах, теплых полах, печах; электронике и др.

С возрастанием температуры корпуса позистора растет и его сопротивление, и с ростом температуры термистора – его сопротивление, соответственно, уменьшается. По этой причине позисторы еще называют *PTC-термисторами*, термисторы – *NTC-термисторами*.

Материалами для терморезисторов служат смеси поликристаллических оксидов переходных металлов, таких как кобальт, марганец, медь и никель, соединений $A^{III}B^V$ -типа, а также смеси легированных, стеклообразных полупроводников, таких как кремний и германий.

Графическая характеристика температурной зависимости сопротивления термистора и позистора показана на рис. 4.3.

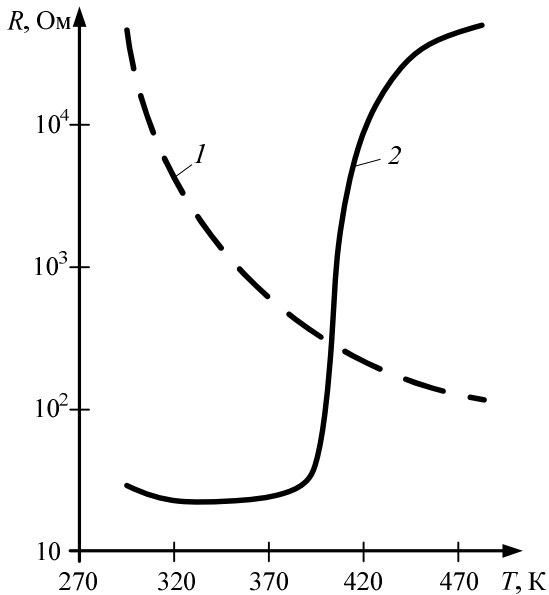


Рис. 4.3. Графики зависимости сопротивления термистора (линия 1) и позистора (линия 2) от температуры

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения зависимости сопротивления полупроводников от температуры представлена на рис. 4.4.

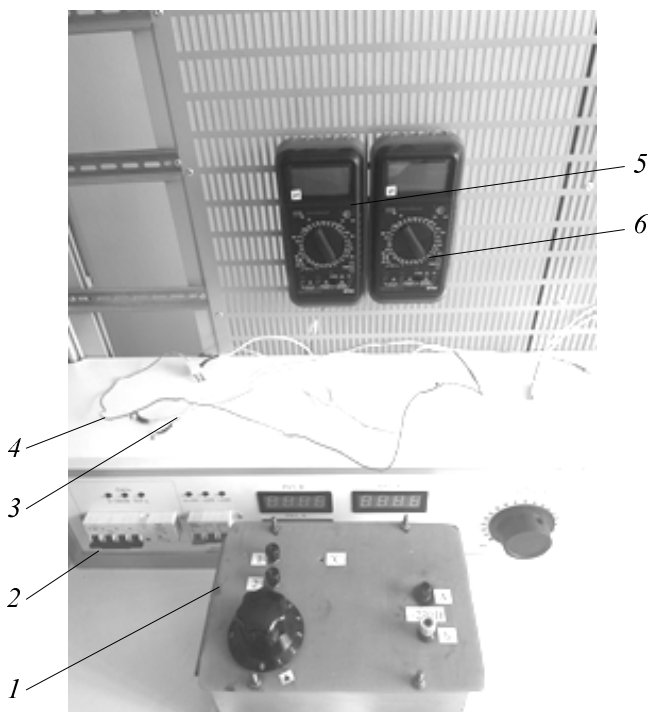


Рис. 4.4. Лабораторная установка (общий вид):

1 – испытательная емкость; 2 – базовый стенд НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс»; 3 – измерительные провода; 4 – датчик температуры (термопара); 5, 6 – многофункциональные цифровые мультиметры Mastech MY64 – M1 и M2 соответственно

Лабораторная установка представляет собой базовый стенд НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс» 2, на который установлена испытательная емкость 1. Мультиметр 5 (M1) и датчик 4 температуры (термопара) используются для измерения температуры полупроводниковых материалов, загруженных в испытательную емкость 1. Мультиметр 6 (M2) с помощью измерительных проводов 3 подключается к испытательной емкости 1 для измерения сопротивления образцов полупроводников.

Измерительная панель испытательной емкости представлена на рис. 4.5.

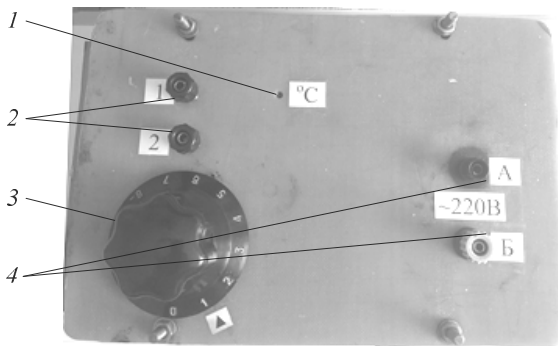


Рис. 4.5. Измерительная панель испытательной емкости:
 1 – отверстие для датчика температуры; 2 – зажимы для подключения мультиметра М2; 3 – пакетный переключатель; 4 – зажимы для подключения к источнику питания

В отверстие 1 опускается датчик температуры, подключенный к мультиметру М1. К зажимам 2 («1» и «2») через пакетный переключатель 3 внутри емкости подсоединены образцы полупроводниковых компонентов. Для измерения их сопротивления к зажимам 2 с помощью измерительных проводов подключается мультиметр М2. К зажимам 4 («А» и «Б») внутри емкости подсоединен нагреватель. С помощью измерительных проводов зажимы 4 подключаются к стенду НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс» для питания установки от сети переменного напряжения 220 В.

Лабораторная установка работает следующим образом. При подаче напряжения питания на нагреватель через зажимы «А» и «Б» происходит нагрев трансформаторного масла, которым заполнена испытательная емкость. В результате образцы полупроводниковых компонентов, которые погружены в трансформаторное масло, также нагреваются.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе:

1. Изучить инструкцию по эксплуатации мультиметра Mastech MY64.

2. На мультиметре M1 выбрать режим измерения температуры. Подключить к мультиметру термопару.

Внимание! Для корректной работы в верхнее гнездо разъема мультиметра «TEMP» должен быть вставлен контакт «K» термопары.

3. Опустить активную часть термопары в испытательную емкость примерно на глубину 8–10 см.

4. На мультиметре M2 выбрать режим измерения сопротивления. Подключить к мультиметру измерительные провода и присоединить их к зажимам «1» и «2» испытательной емкости.

5. Подключить измерительные провода: одним концом к зажимам «А», «Б» нагревателя, вторым – к розетке «~220 В» стенда НТЦ-08.47.1.

Задание 1. Измерить сопротивление полупроводниковых компонентов при различной температуре.

Порядок выполнения работы:

1. Включить автоматический выключатель **QF1** и запустить мультиметры M1 и M2.

2. Значение начальной температуры T_H в испытательной емкости (показание мультиметра M1) занести в таблицу.

3. Перевести пакетный переключатель в **позицию 1**. Измерить при начальной температуре T_H сопротивление первого полупроводникового образца. Результаты занести в таблицу.

4. Аналогично п. 3 произвести измерения для других образцов, поочередно переводя переключатель **в позиции 2, 3, 4, 5, 6** соответственно. Результаты занести в таблицу.

5. Включить однополюсный автоматический выключатель **QF3**. Нагреть исследуемые образцы до температуры, указанной преподавателем. С помощью мультиметра M2 измерить сопротивление шести полупроводниковых компонентов в контрольных точках температуры. Для снижения влияния инерционности процесса нагрева на точность измерений при снятии показаний мультиметра рекомендуется отключать нагреватель от сети (однополюсный автоматический выключатель **QF3**).

Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

Зависимость сопротивления полупроводниковых компонентов от температуры

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление $R, \text{Ом}$					
	Переключатель в позиции					
	1	2	3	4	5	6
$T_H =$						
25						
30						
35						
40						
45						
50						
55						
60						
65						
70						
75						
80						
85						
90						

6. Выключить **QF1** и **QF3**.

7. По результатам измерений построить графические зависимости $R = f(T)$ для шести образцов полупроводниковых компонентов.

8. Сравнить построенные графические зависимости $R = f(T)$ с температурными зависимостями термистора и позистора (см. рис. 4.3) и определить наименование полупроводниковых компонентов.

Выводы

Сделать и записать выводы по проделанной работе с объяснением полученных зависимостей. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Таблица с результатами измерений.
4. Графики зависимости $R = f(T)$ для полупроводниковых компонентов по данным таблицы.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение классу материалов «полупроводники».
2. Какие частицы являются носителями тока в полупроводнике?
3. Дайте определение полупроводниковым компонентам.
4. Назовите основные свойства полупроводниковых материалов.
5. Объясните механизм собственной электропроводности полупроводников.
6. Охарактеризуйте собственный полупроводник.
7. Дайте определение легированию полупроводника.
8. Охарактеризуйте примесный полупроводник.
9. Какие носители тока имеются в легированных полупроводниках n - p -типов? Какие преобладают?
10. Дайте определение понятию «дырка».
11. Какие примеси называют донорными, какие – акцепторными?
12. Как на основе 4-валентного полупроводника получить полупроводник p -типа и как – n -типа? Какой должна быть валентность примеси?
13. Как влияет на электропроводность полупроводников температура?
14. Где в электротехнике применяются простейшие полупроводниковые компоненты и какие именно?

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ

Цель работы: изучить электротехнические характеристики полупроводниковых компонентов.

Задачи работы:

1. Получить навыки работы на лабораторном стенде НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс».
2. Снять зависимость электротехнических характеристик различных полупроводниковых компонентов от освещенности.
3. Построить графики зависимостей электротехнических характеристик различных полупроводниковых компонентов от освещенности.

Краткие теоретические сведения

Полупроводники – материалы с управляемой проводимостью.

Удельное сопротивление полупроводников: $10^{-5} \leq \rho \leq 10^8$, Ом·м.

Собственные полупроводники не используются в технике. Используют полупроводниковые компоненты – простейшие устройства, состоящие из нескольких полупроводников, имеющих разные свойства.

В квантовомеханической зонной теории для объяснения различий материалов по проводимости все материалы разделяют соответственно распределению их электронов по энергиям. Это так называемая зонная теория проводимости. Считается, что все связанные электроны в материале могут иметь только значения энергии из зоны валентности, а свободные электроны – из зоны проводимости. От того, есть ли между этими зонами зазор (запрещенная зона) зависит в целом, будет ли материал проводником, полупроводником или диэлектриком (рис. 5.1).

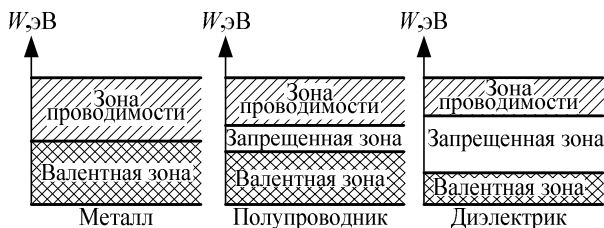


Рис. 5.1. Материалы согласно зонной теории

Предположим, что на полупроводник перпендикулярно его поверхности падает поток монохроматического света с частотой ν . Этот световой поток представляет собой поток фотонов, каждый из которых обладает энергией:

$$\varepsilon = h\nu. \quad (5.1)$$

Попадая в полупроводник, фотоны взаимодействуют с валентными электронами полупроводника (рис. 5.2, а) и стремятся передать им свою энергию. Если энергия падающих фотонов превышает ширину запрещенной зоны ΔW или равна ей, то

$$h\nu \geq \Delta W. \quad (5.2)$$

Тогда благодаря приобретенной энергии валентные электроны способны перейти в зону проводимости (рис. 5.2, б). При этом в зоне проводимости появляются *дополнительные свободные электроны*, в валентной зоне – *дырки*.

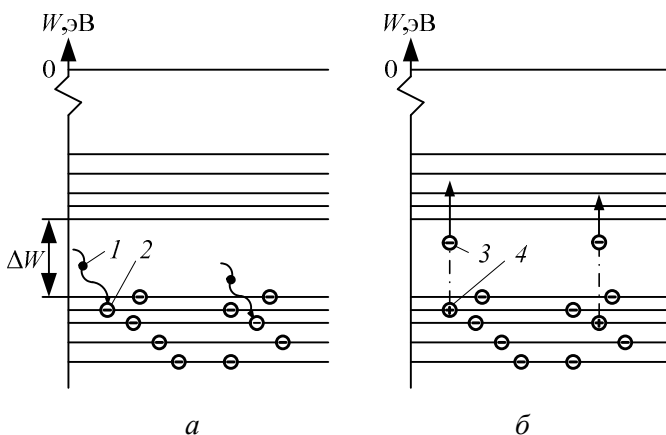


Рис. 5.2. Переход электронов из зоны валентности в зону проводимости через запрещенную зону энергии:

1 – фотоны; 2 – валентные электроны; 3 – свободные электроны; 4 – дырки

Внутренний фотоэффект – переход электронов из валентной зоны в зону проводимости под действием света.

Электроны, перешедшие в зону проводимости под действием квантов света, называют фотоэлектронами.

Таким образом, облучение полупроводника светом достаточно высокой частоты приводит к увеличению концентрации свободных носителей зарядов и, следовательно, к увеличению собственной проводимости полупроводника.

Фоторезисторы – увеличение проводимости полупроводника под действием света.

Фоторезисторы – полупроводниковые приборы, проводимость которых меняется под действием света. Они используются, например, в турникетах метро, широко применяются в автоматике, фотометрии, оптической спектроскопии и т. д.

Простейший фотодиод представляет собой обычный полупроводниковый диод, в котором обеспечивается возможность воздействия света на *p-n*-переход.

Фотоприемник – устройство на основе *p-n*-перехода; в основе работы лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения зависимости электротехнических характеристик полупроводников от температуры представлена на рис. 5.3.

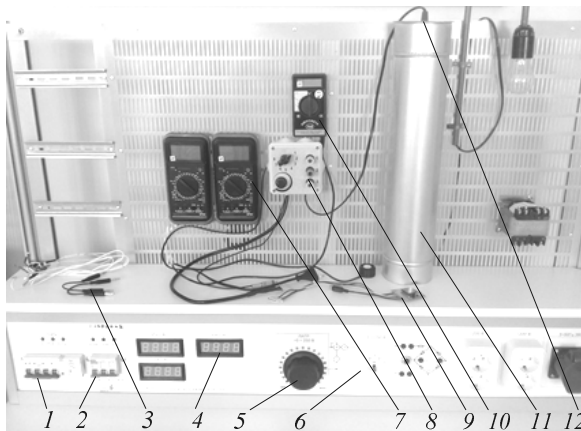


Рис. 5.3. Лабораторный стенд для изучения зависимости электротехнических характеристик полупроводниковых компонентов от освещенности (общий вид)

Подача питания на лабораторный стенд осуществляется с помощью четырехполюсного автоматического выключателя 1 (*QF1*). С помощью однополюсного автоматического выключателя 2 (*QF2*) осуществляется подача питания на розетку 6 («~0÷250 В») через автотрансформатор 5 («ЛАТР ~0÷250 В»). Соединение элементов установки осуществляется с помощью измерительных проводов 3. С помощью мультиметра Mastech MY64 (M1) 7 производится измерение электрических параметров полупроводниковых компонентов. Блок управления 8 (БУ) предназначен для выбора режима работы лабораторной установки. Основная часть установки представляет собой металлическую трубу 11. В верхней части трубы установлен источник света 12, который подключается к сети переменного напряжения 220 В через розетку 6. В нижней части трубы располагается плата с исследуемыми полупроводниковыми компонентами 9. Применение такой конструкции позволяет минимизировать влияние на результаты измерений естественной освещенности. Изменение мощности P источника света, который подключается к розетке 6, осуществляется с помощью автотрансформатора 5 и контролируется ваттметром 4. Значение освещенности E в плоскости расположения исследуемых компонентов измеряется с помощью люксметра 10.

Плата с исследуемыми полупроводниковыми компонентами подключается к блоку управления, внешний вид платы и блока представлен на рис. 5.4.

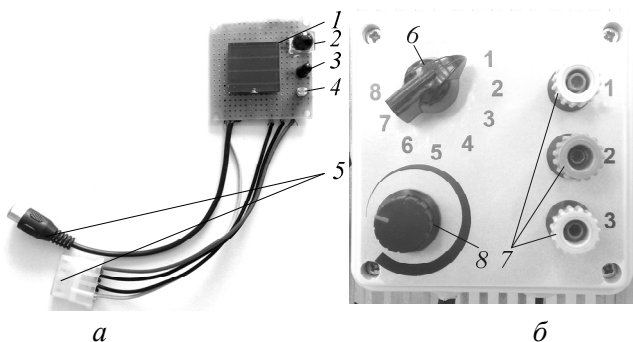


Рис. 5.4. Плата с исследуемыми полупроводниковыми компонентами (а) и блок управления (б):

- 1 – фоторезистор; 2 – солнечный элемент; 3 – фотодиод; 4 – фототранзистор;
5 – разъемы для подключения к блоку управления; 6 – зажимы для подключения мультиметра М1; 7 – переключатель; 8 – потенциометр

Внутри блока управления зажимы 7 («1», «2» и «3») через переключатель 6 подсоединены к полупроводниковым компонентам, потенциометру 8 и нагрузочному резистору. Для измерения электротехнических характеристик полупроводниковых компонентов к зажимам 7 с помощью измерительных проводов подключается мультиметр М1.

Лабораторный стенд работает следующим образом. При включении стенда НТЦ-08.47.1 производится измерение электротехнических характеристик полупроводниковых компонентов при отключенном источнике света ($P = 0$). Далее с помощью ручки ЛАТРа по стендовому ваттметру устанавливаются значения мощности источника света, указанные преподавателем. В каждой контрольной точке измеряются электротехнические характеристики полупроводниковых компонентов.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе:

1. Изучить инструкцию по эксплуатации мультиметра Mastech MY64.
2. Подключить плату с исследуемыми полупроводниковыми компонентами к блоку управления и поместить ее в нижнюю часть испытательной емкости.
3. Подключить источник света к розетке « $\sim 0 \div 250$ В» на стенде НТЦ-08.47.1.
4. Для значений мощности источника света, указанных преподавателем, определить значения освещенности по экспериментальной кривой $E = f(P)$ (рис. 5.5). Результаты записать в таблицу.

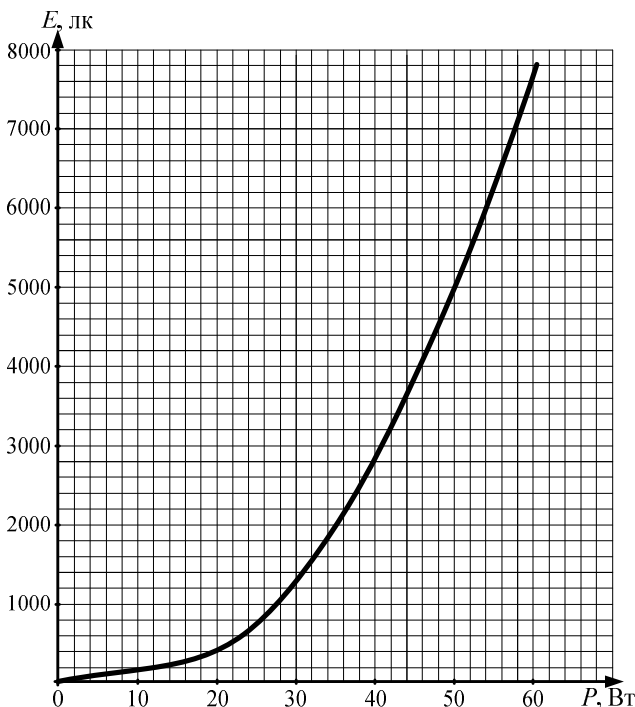


Рис. 5.5. Калибровочный график зависимости $E = f(P)$

Задание 1. Измерить сопротивление фоторезистора при различной освещенности.

Порядок выполнения работы:

1. Подключить разъемы мультиметра с помощью измерительных проводов к зажимам блока управления по схеме: «COM» → «2»; «Ω» → «1».

2. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF2** и запустить мультиметр. Установить переключатель мультиметра в режим измерения сопротивления.

3. Перевести переключатель блока управления **в позицию 1**. Измерить сопротивление фоторезистора при отключенном источнике света ($P = 0$). Результаты занести в таблицу.

4. С помощью ручки ЛАТРа на стендовом ваттметре поочередно установить значения мощности источника света, указанные в таблице, и измерить сопротивление фоторезистора. Результаты занести в таблицу.

5. Выключить **QF1** и **QF2**.

6. Построить график зависимости $R = f(E)$ для фоторезистора.

Задание 2. Измерить выходное напряжение солнечной панели при различной освещенности.

Порядок выполнения работы:

1. Подключить разъемы мультиметра с помощью измерительных проводов к зажимам блока управления по схеме: «СОМ» → «2»; «V» → «1».

2. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF2** и запустить мультиметр. Установить переключатель мультиметра в режим измерения постоянного напряжения.

3. Перевести переключатель блока управления **в позицию 2**. Измерить выходное напряжение солнечной панели при отключенном источнике света ($P = 0$). Результаты занести в таблицу.

4. С помощью ручки ЛАТРа по стендовому ваттметру поочередно установить значения мощности источника света, указанные в таблице, и измерить выходное напряжение солнечной панели. Результаты занести в таблицу.

5. Выключить **QF1** и **QF2**.

6. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = f(E)$ для солнечной панели.

Задание 3. измерить сопротивление фотодиода в прямом и обратном направлениях при различной освещенности.

Порядок выполнения работы:

1. Подключить разъемы мультиметра с помощью измерительных проводов к зажимам блока управления по схеме: «СОМ» → «2»; «Ω» → «1».

2. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF2** и запустить мультиметр. Установить переключатель мультиметра в режим измерения сопротивления.

3. Перевести переключатель блока управления **в позицию 3**. Измерить сопротивление фотодиода в прямом направлении при отключенном источнике света ($P = 0$). Результаты занести в таблицу (колонка «пр.»).

4. С помощью ручки ЛАТРа по стендовому ваттметру поочередно установить значения мощности источника света, указанные в таблице, и измерить сопротивление фотодиода в прямом направлении. Результаты занести в таблицу (колонка «пр.»).

5. Выключить **QF1** и **QF2**. Подключить разъемы мультиметра к зажимам блока управления по схеме: «СОМ» → «1»; «Ω» → «2».

6. Включить **QF1** и **QF2**. Измерить сопротивление фотодиода в обратном направлении в тех же контрольных точках мощности (в соответствии с п.п. 3.3–3.4). Результаты занести в таблицу (колонка «обр.»).

Внимание! Значения сопротивления, выходящие за пределы измерения мультиметра, а также неопределенные показания мультиметра в переходном режиме фотодиода уточняйте у преподавателя.

7. Выключить **QF1** и **QF2**.

8. Построить графики зависимости $R_{пр} = f(E)$ и $R_{обр} = f(E)$ для фотодиода в прямом и обратном направлениях соответственно.

Задание 4. Измерить выходное напряжение фототранзистора при различной освещенности.

Порядок выполнения работы:

1. Подключить разъемы мультиметра с помощью измерительных проводов к зажимам блока управления по схеме: «СОМ» → «2»; «V» → «1».

2. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF2** и запустить мультиметр. Установить переключатель мультиметра в режим измерения постоянного напряжения.

3. Перевести переключатель блока управления **в позицию 4**. Измерить выходное напряжение фототранзистора при отключенном источнике света ($P = 0$). Результаты занести в таблицу.

4. С помощью ручки ЛАТРа по стендовому ваттметру поочередно установить значения мощности источника света, указанные в таблице, и измерить выходное напряжение фототранзистора. Результаты занести в таблицу.

5. Выключить **QF1** и **QF2**.

6. Построить график зависимости $U_{вых} = f(E)$ для фототранзистора.

Зависимость электротехнических параметров полупроводниковых компонентов от освещенности

Мощность источника света P , Вт	Освещенность E , лк	Фоторезистор R , Ом	Солнечная панель $U_{\text{вых}}$, В	Фотодиод R , Ом		Фототранзистор $U_{\text{вых}}$, В
				пр.	обр.	
0						
5						
10						
15						
20						
25						
30						
35						
40						
45						
50						
55						
60						

Выводы

Сделать и записать выводы по проделанной работе с объяснением полученных зависимостей. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Таблица с результатами измерений.
4. Графики зависимости $R = f(E)$ – для фоторезистора, $R_{\text{пр}} = f(E)$ и $R_{\text{обр}} = f(E)$ – для фотодиода, $U_{\text{вых}} = f(E)$ – для фототранзистора и солнечной панели (по данным таблицы).
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основное свойство материалов класса «полупроводники».
2. Что является носителями электрического тока в полупроводниках?
3. Какие частицы являются носителями тока в примесных полупроводниках?
4. Дайте определение собственным и примесным полупроводникам.
5. Какие полупроводники применяют в технике?
6. Дайте определение легированию.
7. Что называют «дыркой» в теории полупроводников?
8. Какой полупроводник называют полупроводником p -типа, какой – n -типа?
9. Дайте определение полупроводниковому компоненту.
10. Как в зонной теории представлены распределения электронов по энергиям для различных материалов?
11. Дайте определение внутреннему фотоэффекту.
12. Каков характер зависимости собственной проводимости полупроводника от освещенности?

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ ФЕРРИТОВ

Цель работы: изучить магнитные свойства материалов.

Задачи работы:

1. Изучить основные магнитные характеристики материалов.
2. Снять параметры петли гистерезиса исследуемых образцов ферромагнитных материалов.
3. Построить кривые намагничивания $B = f(H)$ и графики зависимости $\mu_r = f(H)$ для исследуемых образцов магнитных материалов.

Краткие теоретические сведения

Магнитные свойства материалов обусловлены элементарными внутриатомными токами: вращением электронов вокруг собственной оси (электронный спин) и орбитальным вращением электронов вокруг ядра.

Для описания магнитных свойств материалов используют следующие характеристики:

- магнитный поток Φ ;
- магнитная индукция B ;
- магнитная проницаемость μ ;
- напряженность магнитного поля H .

Важнейшей характеристикой магнитных свойств материала является абсолютная магнитная проницаемость μ , Гн/м:

$$\mu = \frac{B}{H}, \quad (6.1)$$

где B – магнитная индукция, Тл;

H – напряженность магнитного поля, А/м.

На практике удобнее пользоваться относительной магнитной проницаемостью μ_r :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad (6.2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Эта величина позволяет сравнить между собой разные материалы: *диамагнетики* (относительная магнитная проницаемость $\mu_r < \sim 1$), *парамагнетики* ($\mu_r > \sim 1$) и *ферромагнетики* ($\mu_r \gg 1$). На практике в электротехнических устройствах используют только ферромагнитные материалы.

Все ферромагнетики характеризуются:

- 1) кристаллическим строением;
- 2) большим значением магнитной проницаемости, нелинейной зависимостью ее от напряженности поля;
- 3) способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах даже в слабых полях;
- 4) явлением гистерезиса – отставанием индукции магнитного поля в образце от напряженности магнитного поля в вакууме в циклах намагничивания-размагничивания;
- 5) наличием точки Кюри, то есть температуры, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства (переходит в парамагнитное состояние).

В ферромагнетиках даже в отсутствие внешнего магнитного поля имеются микроскопические области, называемые магнитными доменами, в которых магнитные моменты электронов выстроены параллельно друг другу. Магнитные моменты отдельных доменов ориентированы неупорядоченно, вследствие чего суммарная намагниченность их по всему материалу равна нулю. При наложении внешнего поля происходит поворот магнитных моментов доменов и выстраивание их в направлении поля, в результате чего ферромагнетик намагничивается.

Магнитные свойства ферромагнетиков характеризуются зависимостями магнитной индукции B от напряженности поля H и потерь на перемагничивание P от индукции и частоты.

Кривые намагничивания – это зависимости вида $B = f(H)$. Кривую намагничивания $B = f(H)$ и зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля $\mu_r = f(H)$ можно рассмотреть на примере электротехнической стали (рис. 6.1).

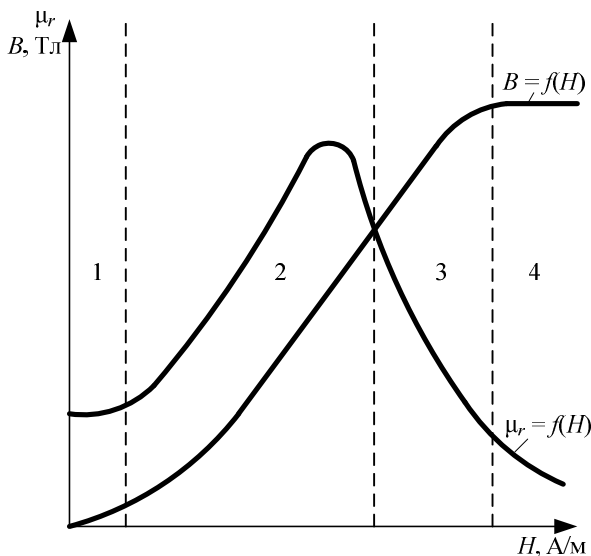


Рис. 6.1. Кривая намагничивания $B = f(H)$ и график зависимости $\mu_r = f(H)$ электротехнической стали

В области очень слабых магнитных полей (участок 1) магнитная индукция растет линейно с ростом напряженности, магнитная проницаемость остается постоянной. В области средних полей (участок 2) магнитная проницаемость резко возрастает и проходит через максимум. Магнитная индукция на этом участке кривой резко увеличивается, затем наступает замедление роста. В области средних полей (участок 3) происходит лишь слабое увеличение магнитной индукции, в области сильных полей (участок 4) она почти прекращается. Здесь наступает насыщение, то есть завершается поворот всех векторов доменов. Магнитная проницаемость на этих участках уменьшается.

Начальная кривая намагничивания (рис. 6.1) получена при условии, что вещество предварительно было размагничено.

При циклическом изменении напряженности магнитного поля от $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$ кривая изменения индукции примет форму замкнутой кривой – *петли гистерезиса* (рис. 6.2). Петлю гистерезиса, полученную при условии достижения материалом намагниченности насыщения, называют предельной.

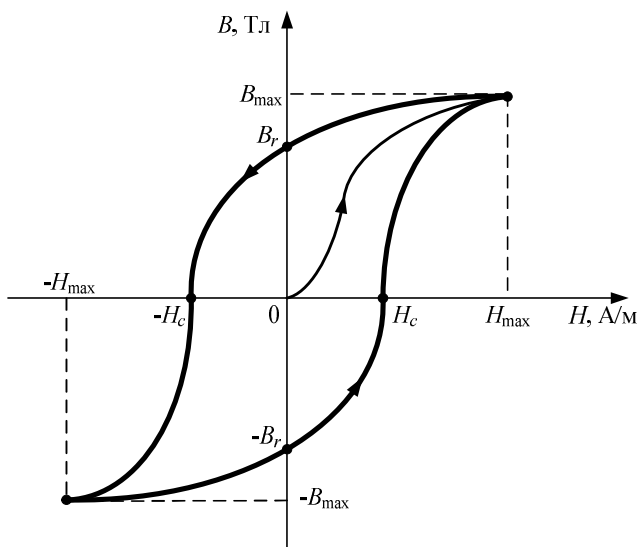


Рис. 6.2. Петля гистерезиса ферромагнитного материала

Основными характеристиками петли гистерезиса являются:

- остаточная индукция B_r ;
- коэрцитивная сила H_c ;
- индукция насыщения B_{\max} ;
- напряженность насыщающего магнитного поля H_{\max} ;
- площадь петли, характеризующая потери на гистерезис w_r за один цикл перемагничивания.

Остаточная индукция B_r – это индукция, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего магнитного поля H .

Коэрцитивная сила H_c – размагничивающее поле, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для того, чтобы индукция B в нем стала равной нулю.

Циклическое перемагничивание материала происходит с определенной потерей энергии, выделяющейся внутри материала в виде тепла. Потери энергии на один цикл перемагничивания пропорциональны площади петли гистерезиса и равны сумме потерь на перемагничивание и на вихревые токи. При перемагничивании сердечника происходит переориентация доменов, что требует

определенных затрат энергии. Энергия также расходуется на создание электродвижущей силы и связанных с ней вихревых токов в сердечнике.

Общепринято выделение двух основных групп магнитных материалов – магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы обладают характерными свойствами: малая коэрцитивная сила, следовательно, узкая петля гистерезиса; способность намагничиваться до насыщения даже в слабых полях (высокая магнитная проницаемость); малые потери на перемагничивание.

Магнитотвердые материалы (материалы для постоянных магнитов) характеризуются большой коэрцитивной силой, следовательно, широкой петлей гистерезиса с большой площадью, следовательно, большой удельной энергией. Так как эта энергия пропорциональна площади петли, то энергия тем больше, чем больше остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c материала.

Разница в коэрцитивной силе магнитотвердых и магнитомягких материалов достигает больших значений. Для лучших промышленных магнитомягких материалов коэрцитивная сила может достигать $H_c \sim 0,4$ А/м, для магнитотвердых – $H_c \sim 800\,000$ А/м, то есть различие составляет $2 \cdot 10^6$ раз.

Большую часть применяемых в технике магнитотвердых материалов составляют литые сплавы, которые получают с помощью термомагнитной обработки (охлаждение сплава от 1250°C до 500°C в магнитном поле). Этот метод позволяет получить кристаллическую магнитную текстуру. Широко применяют также магнитотвердые ферриты: бариевый ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$), стронциевый ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$), феррит кобальта $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

К магнитомягким материалам относятся, например, технически чистое железо, электротехническая сталь, а также магнитомягкие ферриты.

Ферриты – магнитные материалы состава $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (MeO – окислы различных металлов), получаемые по керамической технологии, то есть спеканием порошков при температуре значительно ниже температур их плавления.

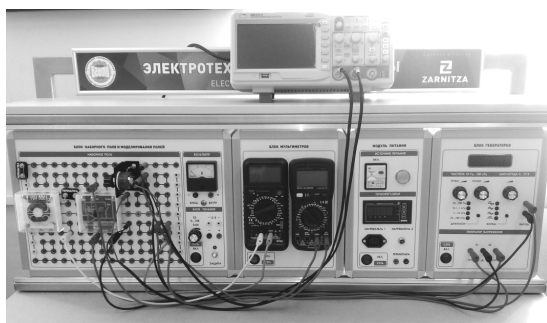
К наиболее используемым магнитомягким ферритам относятся никель-цинковые ($\text{NiO} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) и марганец-цинковые ($\text{MnO} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$).

Описание лабораторной установки

Для изучения параметров петли гистерезиса исследуемых образцов ферромагнитных материалов используют лабораторный стенд «Электротехнические материалы» (рис. 6.3, *а*) и стенд с собранной для изучения материала электрической схемой (рис. 6.3, *б*).



а



б

Рис. 6.3. Лабораторный стенд «Электротехнические материалы» (*а*) и стенд с собранной электрической схемой для изучения образцов ферромагнитных материалов (*б*) (общий вид)

Петлю гистерезиса наблюдают на экране осциллографа АКИП-4115/1А.

На пластины горизонтальной развертки осциллографа (вход X) подается сигнал, меняющийся со временем пропорционально напряженности магнитного поля H , на пластины вертикальной развертки (вход Y) – сигнал, пропорциональный индукции магнитного поля B . Луч на экране осциллографа будет описывать петлю гистерезиса $B = f(H)$.

Исследуемый образец из ферромагнитного материала в форме тороида является сердечником двух обмоток (рис. 6.4): первичной (намагничивающей) с числом витков N_1 и вторичной с числом витков N_2 , предназначенной для измерения величины B .

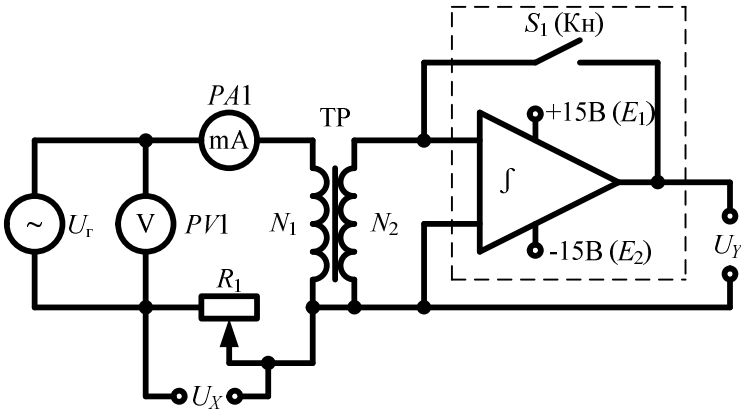


Рис. 6.4. Электрическая схема установки для снятия параметров петли гистерезиса ферромагнитных материалов:

U_r – генератор сигналов специальной формы; R_1 – миниблок «Реостат» с сопротивлением R_1 ; $PA1$ – мультиметр (режим $A \sim 20$ мА, входы COM, mA); $PV1$ – мультиметр (режим $V \sim 20$ В, входы COM, V); TP – миниблок «Ферромагнетик» (тороид с первичной N_1 и вторичной N_2 обмотками); S_1 (Кн) – ключ (входит в состав интегратора тока); \int – миниблок «Интегратор тока»; U_x – напряжение, подаваемое на вход X осциллографа ($U_x = UR \sim I \sim H$); U_y – напряжение, подаваемое на вход Y осциллографа ($U_y = U_{\text{инт}} \sim Q \sim B$)

Первичная N_1 и вторичная N_2 обмотки намотаны на кольцевой сердечник, который изготовлен из исследуемого ферромагнитного материала. Первичную обмотку, по которой протекает переменный ток, используют для намагничивания магнетика и по ее параметрам определяют напряженность H при градуировке шкалы X осциллографа. Для измерения мгновенных значений H переменного магнитного поля на вход X осциллографа подают сигнал с реостата R_1 .

Вторичная обмотка предназначена для измерения мгновенных значений индукции магнитного поля в сердечнике B . С этой целью на вход Y осциллографа подают напряжение с интегратора.

Режим генератора сигналов специальной формы – синусоидальный сигнал (светится индикатор формы «~»).

Напряженность магнитного поля H в образце при протекании в первичной обмотке тока I можно рассчитать по формуле, А/м:

$$H = \frac{IN_1}{l}, \quad (6.3)$$

где N_1 – число витков первичной обмотки;

l – длина средней осевой линии тороида, м.

На вход X осциллографа подают падение напряжения на сопротивлении R_1 (см. рис. 6.4), пропорциональное току I в первичной обмотке тороида. Следовательно, напряженность магнитного поля в образце пропорциональна отклонению луча x по оси X :

$$H = n x, \quad (6.4)$$

где n – коэффициент пропорциональности.

Величину n можно найти, измеряя x для известного значения H . Для этого используют максимальное смещение луча x_{\max} (в мм) в вершине петли гистерезиса, которое соответствует амплитуде напряженности $H_{\max} = n \cdot x_{\max}$ и амплитудному значению тока в первичной обмотке, А:

$$I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I, \quad (6.5)$$

где I – действующее значение тока, измеряемое мультиметром, А.

Подставив амплитудные значения в формулы (6.3) и (6.4), получим

$$n = \frac{\sqrt{2} \cdot IN_1}{lx_{\max}}. \quad (6.6)$$

Измерение индукции магнитного поля в ферромагнетике B проводится следующим образом. При изменении магнитного поля, созданного первичной обмоткой, во вторичной возникает ЭДС индукции ϵ_i (величина ее пропорциональна скорости изменения магнитного потока) и индукционный ток I_i , А:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R_2} = \frac{N_2}{R_2} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}, \quad (6.7)$$

где N_2 – число витков вторичной обмотки;

Φ – магнитный поток через один виток тороида, Вб;

S – площадь поперечного сечения сердечника, м²;

B – индукция магнитного поля в тороиде, Тл.

R_2 – сопротивление цепи вторичной обмотки, Ом.

В результате протекания индукционного тока в цепи вторичной обмотки (см. рис. 6.4) на интеграторе накапливается заряд Q , Кл:

$$Q = \int_0^t I_1 dt = \frac{N_2 S}{R_2} \int_0^t dB = \frac{N_2 S}{R_2} B(t). \quad (6.8)$$

Напряжение U_Y , выдаваемое с интегратора на вход Y осциллографа, будет пропорционально индукции магнитного поля:

$$U_Y = \frac{Q}{\gamma} = \frac{N_2 S}{\gamma R_2} B(t), \quad (6.9)$$

где γ – градуировочная постоянная интегратора.

Это напряжение приводит к отклонению γ (мм) луча по вертикали:

$$U_Y = \frac{K_Y}{l_{\text{дел}}}, \quad (6.10)$$

где K_Y – цена деления оси Y , зависящая от положения ручки «Усиление» потенциометра усилителя Y осциллографа;

$l_{\text{дел}}$ – длина большого деления оси Y осциллографа, мм.

Линейные соотношения (6.9) и (6.10) приводят к пропорциональности $B(t) \sim y$, которую можно представить в следующем виде:

$$B = m y, \quad (6.11)$$

где m – коэффициент, зависящий от параметров установки.

$$m = \frac{\gamma R_2}{N_2 S l_{\text{дел}}} K_Y. \quad (6.12)$$

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкционные материалы»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе:

В работе исследуются три образца магнитомягких марганец-цинковых феррита $MnO \cdot ZnO \cdot Fe_2O_3$, различающихся по соотношению компонент состава (маркировки образцов – 600 нм, 1000 нм и 2000 нм). Исследуемые образцы в форме тороида являются сердечниками двух обмоток трансформатора.

1. Изучить инструкцию по эксплуатации мультиметров Mastech MY64 и MY65.

2. Изучить руководство по эксплуатации осциллографа АКПП-4115/1А.

3. На мультиметре М1 выбрать режим измерения переменного тока ($A \sim 200 \text{ mA}$), на мультиметре М2 выбрать режим измерения переменного напряжения ($V \sim 20 \text{ V}$).

4. Установить в модуль «Блок наборного поля и моделирования полей» образец № 1 (600 нм).

Выполнить задания 1–3 для образца № 1 (600 нм), данные занести в соответствующие строки табл. 6.1, 6.2, 6.3 и 6.4.

Задание 1. Произвести калибровку лабораторной установки.

Порядок выполнения работы:

1. Подать питание на схему:
– включить автоматический выключатель модуля «Модуль питания»;

– перевести клавишные выключатели «Сеть» модулей «Блок генераторов» и «Блок мультиметров» в положение «ВКЛ».

2. Включить осциллограф АКПП-4115/1А. Перевести осциллограф в режим «X-Y» и вывести электронный луч в центр экрана.

3. Замкнуть ключ S_1 (красная кнопка) интегратора тока, установленного в модуль «Блок наборного поля и моделирования полей».

4. На модуле «Блок генераторов»:
 – с помощью тактовых кнопок выбрать *диапазон «0,1–1,0 кГц»*;
 – с помощью тактовых кнопок выбрать *форму сигнала «~»*;
 – регуляторами «Грубо» и «Точно» установить *значение частоты 500 Гц*.

5. Определить постоянные осциллографа. Для этого:
 – определить цену деления K_Y оси Y осциллографа (указана на экране цифрового осциллографа как $CH2$ синим цветом);
 – определить длину большого деления оси Y осциллографа $l_{дел}$ (посчитать количество малых делений в одной клетке).

Результаты занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Параметры лабораторной установки

Образец	N_1	N_2	$l, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$R_2, \text{ Ом}$	$\gamma, \text{ Кл/В}$	$K_Y, \text{ В}$	$l_{дел}, \text{ дел.}$
600 нм	80	80	0,038	$35 \cdot 10^{-6}$	170	85,3· 10 ⁻⁸		
1000 нм	80	80	0,110	$96 \cdot 10^{-6}$	150			
2000 нм	80	80	0,110	$96 \cdot 10^{-6}$	150			

6. Регулятором «Амплитуда» на модуле «Блок генераторов», опираясь на показания мультиметра РА1, плавно увеличить ток в обмотке тороида до значения 12 мА. Поворачивая ручку осциллографа «Усиление», установить наибольшие размеры петли, которые вписываются в экран осциллографа.

7. Измерить в делениях значение x_{\max} , которое соответствует *координате вершины петли гистерезиса* по оси X экрана. Значения x_{\max} занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты калибровки лабораторной установки

Образец	$I, \text{ мА}$	$x_{\max}, \text{ дел.}$	$n, \text{ А/м·дел.}$	$t, \text{ Тл/дел.}$
600 нм	12			
1000 нм	12			
2000 нм	12			

8. С учетом параметров установки коэффициенты n и t можно рассчитать по формулам (6.6) и (6.12) соответственно, А/м·дел.:

$$n_{600 \text{ нм}} = 2980 \frac{I}{x_{\max}}; n_{1000 \text{ нм}} = 1030 \frac{I}{x_{\max}}; n_{2000 \text{ нм}} = 1030 \frac{I}{x_{\max}}, \quad (6.13)$$

$$m_{600 \text{ нм}} = 0,052 \frac{K_Y}{l_{\text{дел}}}; m_{1000 \text{ нм}} = 0,017 \frac{K_Y}{l_{\text{дел}}}; m_{2000 \text{ нм}} = 0,017 \frac{K_Y}{l_{\text{дел}}}. \quad (6.14)$$

Рассчитать коэффициенты n и m , соответственно, по формулам (6.13) и (6.14). Результаты расчета занести в табл. 6.2.

Задание 2. Измерение параметров петли магнитного гистерезиса.

Порядок выполнения работы:

1. Измерить в делениях координаты точек x и y петли гистерезиса, которые соответствуют величинам коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r , напряженности насыщения H_{\max} и индукции насыщения B_{\max} . Результаты измерений занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты определения координат характерных точек петли гистерезиса

Образец	H_c		B_r		H_{\max}		B_{\max}	
	х, дел.	А/м	у, дел.	Тл	х, дел.	А/м	у, дел.	Тл
600 нм								
1000 нм								
2000 нм								

2. Рассчитать параметры петли гистерезиса H_c , H_{\max} , B_r , B_{\max} исследуемого образца ферромагнетика, используя формулы (6.4) и (6.11) соответственно.

3. Перенести в отчет осциллограмму петли гистерезиса.

Результаты расчетов занести в табл. 6.3.

Задание 3. Получение основной кривой намагничивания.

Порядок выполнения работы:

1. Размагнитить исследуемый образец. Для этого довести ток до нуля, постепенно уменьшая ток I в первичной обмотке с помощью регулятора уровня выходного напряжения «Амплитуда» генератора

сигналов специальной формы. При этом площадь петли гистерезиса сократится до размеров точки. Убедиться, что она установлена в центре экрана.

2. Установить ток в первичной обмотке I равным 2,5 мА (табл. 6.4) и получить на экране осциллографа частный цикл петли гистерезиса.

3. Измерить координаты вершины петли x_{\max} и y_{\max} в делениях.

4. Выполнить аналогичные измерения для значений токов, указанных в табл. 6.4. Результаты измерений занести в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Результаты измерений для получения основной кривой намагничивания

Образец	I , мА	x_{\max} , дел.	y_{\max} , дел.	H_{\max} , А/м	B_{\max} , Тл	μ_r
600 нм	2,5					
	5,0					
	7,5					
	10,0					
	12,5					
1000 нм	2,5					
	5,0					
	7,5					
	10,0					
	12,5					
2000 нм	2,5					
	5,0					
	7,5					
	10,0					
	12,5					

5. Рассчитать параметры петли гистерезиса H_{\max} , B_{\max} исследуемого образца ферромагнетика, используя, соответственно, формулы (6.4) и (6.11).

6. Вычислить относительную магнитную проницаемость μ_r :

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} . \quad (6.15)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Результаты расчетов занести в табл. 6.4.

Выполнить задания 1–3 для образцов № 2 (1000 нм) и № 3 (2000 нм).

Результаты измерений и расчетов занести в табл. 6.1–6.4.

По данным табл. 6.4 построить основную кривую намагничивания $B = f(H)$ и график зависимости $\mu_r = f(H)$ для трех образцов.

Выводы

Сделать и записать выводы по проделанной работе с объяснением полученных зависимостей. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Электрическая схема лабораторной установки (рис. 6.4).
4. Расчетные формулы (6.4), (6.11), (6.13)–(6.15).
5. Табл. 6.1–6.4 с результатами измерений расчетов.
6. Графики зависимости $B = f(H)$ и $\mu_r = f(H)$ для трех образцов исследуемых ферромагнитных материалов.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение магнитному материалу «ферромагнетик».
2. Перечислите основные свойства ферромагнетиков.
3. Дайте определение магнитной проницаемости.
4. Объясните явление магнитного гистерезиса.
5. Нарисуйте петлю гистерезиса, назовите 4 основные точки петли.
6. Дайте определение магнитному домену.
7. Дайте определение ферриту.
8. Приведите формулу феррита.
9. Перечислите общие свойства ферритов.
10. В чем отличие магнитомягких материалов от магнитотвердых?
11. По каким параметрам материал относится к магнитомягким?
12. Где применяются магнитомягкие материалы?

Лабораторная работа № 7 ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучить зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от различных факторов.

Задачи работы:

1. Изучить методы определения электрической прочности твердых диэлектриков на переменном токе (частота 50 Гц).
2. Исследовать зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от состава, строения и толщины плоских диэлектрических образцов, числа слоев материала, формы электродов, температуры.

Краткие теоретические сведения

Пробой – одно из важнейших электротехнических явлений, наблюдаемых в диэлектрике. Процессы, происходящие в диэлектрике при его эксплуатации в электрическом поле и приводящие к пробое, называются **старением** диэлектрика. Основной характеристикой, используемой для сравнения свойств изоляционных материалов по их отношению к явлению пробоя, является электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ (кВ/мм). **Электрической прочностью** называют минимальную напряженность однородного электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика.

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \quad (7.1)$$

где $U_{\text{пр}}$ – напряжение пробоя диэлектрика, кВ;

h – толщина слоя диэлектрика, мм.

Напряжение пробоя $U_{\text{пр}}$ – это минимальное напряжение, приложенное к диэлектрику и приводящее к образованию в нем проводящего канала. За напряжение пробоя принимают такое

напряжение, при котором дифференциальная проводимость материала становится бесконечно большой:

$$\frac{dI}{dU} = \infty, \quad (7.2)$$

где I – сила тока, А.

Механизм пробоя твердого диэлектрика заключается в разрыве химических связей в веществе под действием внешнего электрического поля, что приводит к разрушению диэлектрика с потерей им электроизоляционных свойств.

Значение напряжения пробоя $U_{пр}$ зависит от различных параметров: толщины слоя диэлектрика h ; формы электрического поля, обусловленной конфигурацией электродов и самого диэлектрика; температурой диэлектрика. Поэтому оно характеризует не столько свойства самого материала, сколько способность конкретного изделия противостоять сильному электрическому полю.

В большинстве случаев напряжение пробоя с увеличением толщины изоляции возрастает медленнее, чем по линейному закону. При этом в тонких слоях диэлектрика значительное влияние оказывают неоднородности структуры, уменьшая электрическую прочность. У неоднородных тонких материалов (бумага, лакоткань и т. п.) электрическая прочность уменьшается с увеличением площади электродов, что объясняется увеличением вероятности нахождения дефектов структуры таких диэлектриков.

Для оценки надежности работы электротехнического устройства используют параметр K – коэффициент запаса электрической прочности:

$$K = \frac{U_{пр}}{U_{раб}}, \quad (7.3)$$

где $U_{раб}$ – рабочее напряжение электрической изоляции устройства, кВ.

Электрическая прочность некоторых диэлектриков и электроизоляционных материалов приведена в табл. 7.1.

Электрическая прочность твердых диэлектриков

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

Различают несколько видов пробоя: электрический, тепловой и электрохимический. Отдельно выделяют пробой в неоднородных средах для твердых диэлектриков – это такие материалы, как слоистые диэлектрики (слода, бумага, тщательно пропитанная жидким диэлектриком, стекла), диэлектрики с открытой пористостью (непропитанная бумага, дерево, пористая керамика), содержащие газовые включения (плотная керамика) и т. д. У большинства таких диэлектриков напряжение пробоя имеет низкое значение и практически не отличается в однородном и неоднородном электрическом поле. За счет неоднородной структуры диэлектриков в них наблюдается большая мощность диэлектрических потерь на ионизацию.

Чисто электрический или собственный пробой представляет собой непосредственное разрушение структуры диэлектрика силами электрического поля. Этот вид пробоя развивается практически мгновенно ($\sim 10^{-8}$ – 10^{-7} с) и не обусловлен тепловой энергией. Собственный пробой – это электронный процесс, когда из немногих начальных электронов в твердом теле создается электронная лавина. В неоднородных электрических полях пробивное напряжение однородного диэлектрика меньше, чем в однородных.

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее критического значения, когда наблюдается заметное снижение электрической прочности (рис. 7.1).

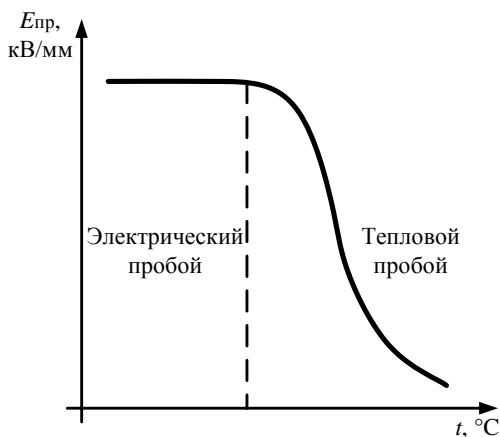


Рис. 7.1. Зависимость электрической прочности от температуры диэлектрика при электрическом и тепловом пробое

В случае наступления теплового пробоя, который связан с нагревом изоляции в электрическом поле, процесс идет следующим образом: после подачи напряжения на диэлектрик в нем начинает выделяться теплота потерь и он нагревается до некоторой критической температуры. С ростом температуры растет число носителей, растет проводимость, потери возрастают, происходит дополнительное повышение температуры. В результате в диэлектрике происходят существенные физико-химические изменения (расплавление, обугливание и т. п. в зависимости от природы материала) и его собственная электрическая прочность снижается настолько, что происходит пробой. Пробой происходит при напряжении более низком, нежели без разогрева, то есть если бы пробой был чисто электрическим.

Тепловой пробой может иметь локальный характер, при котором средняя температура всего объема изолятора существенно не изменяется. Таким образом, тепловой пробой существенно зависит от интенсивности рассеяния выделяющегося в диэлектрике тепла в окружающую среду, поэтому электрическая прочность при тепловом пробое является не только характеристикой материала, но и определяется формой и другими параметрами самого изделия. Развитие пробоя при тепловом пробое требует значительного времени на разогрев диэлектрика (рис. 7.2).

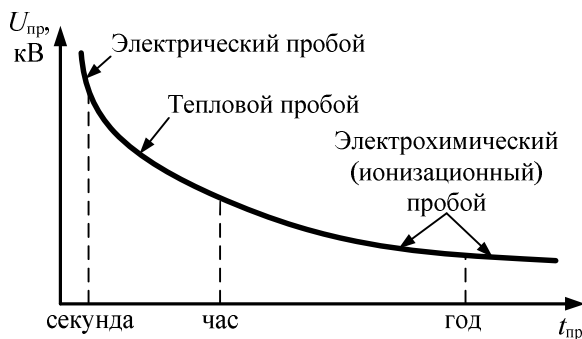


Рис. 7.2. Зависимость времени развития пробоя $t_{пр}$ от напряжения электрического поля для разных видов пробоя $U_{пр}$

Электромеханический пробой подготавливается механическим разрушением материала (образованием макроскопических трещин) силами электрического поля (давлением электродов).

Электрохимический пробой связан с химическим изменением материала в электрическом поле, например, металлизацией материала в результате электролиза. Этот вид пробоя возникает при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Электрохимический пробой может иметь место при высоких частотах, если в закрытых порах материала (например, в керамике) происходит ионизация газа, сопровождающаяся тепловым эффектом и восстановлением оксидов металлов переменной валентности. Развитие электрохимического пробоя требует наибольшего времени из всех рассмотренных видов пробоя (см. рис. 7.2), поскольку он связан с изменением электропроводности диэлектрика в процессе его эксплуатации под воздействием внешних факторов.

С ростом частоты электрического поля и ростом окружающей температуры пробивное напряжение уменьшается. Зависимость, представленную на рис. 7.2, часто называют кривой жизни диэлектрика, так как по ней можно определить время жизни диэлектрика при заданной напряженности электрического поля.

Описание лабораторной установки

Лабораторный стенд НТЦ-22.03.21.С «Изучение электрической прочности твердых диэлектриков» состоит из двух блоков, измерительного устройства и высоковольтного устройства, соединенных между собой кабелями.

На передней панели измерительного устройства (рис. 7.3) расположены кнопка включения высокого напряжения 4, регулятор напряжения грубый 2 и регулятор точной подстройки напряжения 3, а так же цифровой индикатор выходного напряжения 1.

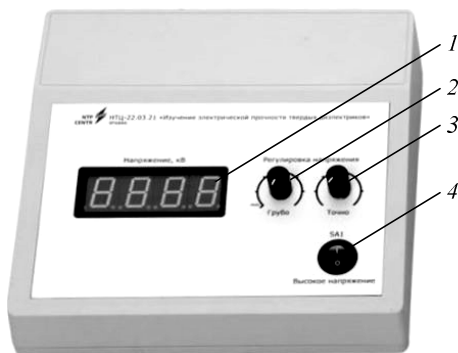


Рис. 7.3. Измерительное устройство лабораторного стенда НТЦ-22.03.21.С

На задней панели измерительного блока расположены кнопка включения питания и соединительные шнуры к высоковольтному устройству.

На рис. 7.4 представлено высоковольтное устройство стенда.

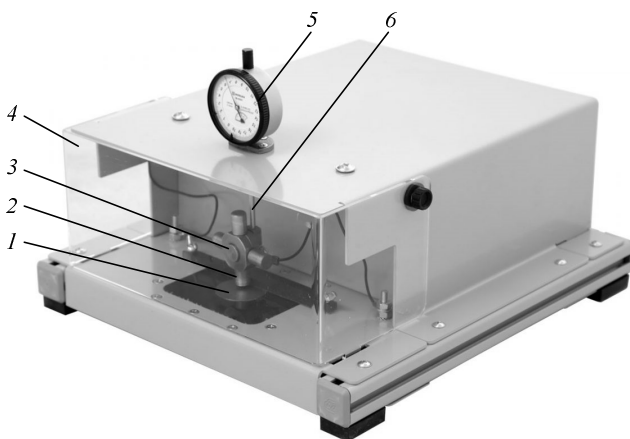


Рис. 7.4. Высоковольтное устройство лабораторного стенда НТЦ-22.03.21.С

Образец размещается на неподвижном плоском электроде 1 высоковольтного блока, на который подается положительный испытательный потенциал. Сверху фиксируется одним из подвижных (сменных) электродов 2, расположенных на механизме револьверного типа 3. На механизме закреплены испытательные электроды четырех типоразмеров, которые меняются посредством вращения. Эти электроды стержня электрически соединены с корпусом (общим проводом) высоковольтного блока. Механизм смены электродов жестко закреплен на штоке 6 микрометра часового типа 5, что позволяет измерить толщину образца при его креплении в установке.

Внутри рабочей области расположено устройство крепления испытуемого образца, которое состоит из прижимной планки и прижимных винтов. Рабочая область высоковольтного блока закрывается прозрачной защитной крышкой 4, снабженной концевыми выключателями, что препятствует проведению измерений с открытой крышкой.

Образец подключается к преобразователю напряжения, через высоковольтный делитель напряжения, при помощи верхнего и нижнего электродов через защитное сопротивление, служащее для ограничения тока при пробое образца. Плавно поднимая напряжение на образце, добиваются пробоя диэлектрика и в момент протекания тока пробоя фиксируют напряжение пробоя. Температуру диэлектрика можно регулировать нагревом нижнего электрода.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию:

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «Электротехнические и конструкторские материалы»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе:

1. Соединить измерительный и высоковольтный блоки.
2. Перевести регуляторы напряжения 2 и 3 (рис. 7.3) в крайнее левое положение, соответствующее минимальному напряжению.
3. На подвижном стержне 6 измерительной головки высоковольтного блока (рис. 7.4) выбрать нужный электрод 2 путем вращения механизма 3.

4. Отпустить выбранный электрод до касания нижнего неподвижного электрода *1*.

5. Произвести установку на отметку «0» головки измерительного блока путем вращения индикационного кольца.

6. Включить шнур питания в сеть 50 Гц, 220 В, перевести сетевой выключатель измерительного блока в положение «Включено». При этом должен светиться индикатор выходного напряжения *1* (рис. 7.3) и показывать нулевые значения всех трех цифровых разрядов.

7. Проверить работу блокировки высоковольтного блока защитным щитком, для чего поднять вверх защитный щиток. При этом индикаторы выходного напряжения высоковольтного блока должны погаснуть.

8. По заданию преподавателя подготовить образцы для испытания. При этом расстояние между точкой пробоя и краем образца или соседними точками пробоя должно быть не менее 40 мм. Для исследования зависимости напряжения пробоя от толщины образца подготовить образцы одного материала разной толщины.

Задание 1. Экспериментальное изучение электрической прочности твердых диэлектриков.

Порядок выполнения работы:

1. Поднять защитный щиток высоковольтного блока и прижимную планку устройства крепления образца.

2. Поместить исследуемый образец между неподвижным *1* и подвижным *2* электродом высоковольтного устройства (рис. 7.4) и зафиксировать его прижимной планкой устройства крепления образца.

3. Закрыть защитный щиток высоковольтного устройства.

4. По показаниям микрометра *5* (рис. 7.3) измерить толщину исследуемого образца и занести полученные данные в табл. 7.2.

5. Включить питание стенда с помощью сетевого выключателя измерительного блока.

6. Нажать кнопку «Высокое напряжение» *4* измерительного блока (рис. 7.3).

7. Плавно регулируя напряжение ручками *2* и *3* на измерительном блоке (рис. 7.3), добиться пробоя диэлектрика. Зафиксировать показания цифрового индикатора выходного напряжения *1* в момент, предшествующий пробую, и записать полученное значение напряжения пробоя в табл. 7.2.

Измерение электрической прочности твердых диэлектриков

Наименование материала	№ опыта	h , мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	$U_{пр.ср}$, кВ	$E_{пр.ср}$, кВ/мм
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	6					

8. Выключить установку.

9. Поднять защитный щиток высоковольтного блока. Установить другой образец из этого же материала в высоковольтное устройство или сместить исследуемый не менее чем на 40 мм от точки пробоя.

10. Повторить эксперимент в соответствии с пунктами 2–7. При повторном проведении эксперимента для данного материала ручкой «Грубо» 2 установить напряжение на 10 % меньше измеренного в первом опыте и ручкой «Точно» 3 повысить напряжение до момента пробоя.

11. Выполнить измерения напряжения пробоя не менее 6 раз. Результаты измерений занести в табл. 7.2.

12. Выключить установку.

13. Рассчитать электрическую прочность материала по формуле (7.1), полученные данные занести в табл. 7.2.

14. Рассчитать среднее значение напряжения пробоя материала, полученные данные занести в табл. 7.2.

15. Рассчитать среднее значение электрической прочности материала, подставив в формулу (7.1) среднее значение пробивного напряжения:

$$E_{пр.ср} = \frac{U_{пр.ср}}{h} .$$

16. Сравнить полученные данные с табл. 7.1 и сделать вывод.

Задание 2. Изучение зависимости электрической прочности твердых диэлектриков от их толщины.

Порядок выполнения работы:

1. Поднять защитный щиток высоковольтного блока и прижимную планку устройства крепления образца.

2. Поместить исследуемый образец *наименьшей* толщины между неподвижным 1 и подвижным 2 электродом высоковольтного устройства (рис. 7.4) и зафиксировать его прижимной планкой устройства крепления образца.

3. Закрыть защитный щиток высоковольтного устройства.

4. По показаниям микрометра 5 (рис 7.3) измерить толщину исследуемого образца и занести полученные данные в табл. 7.3.

5. Включить питание стенда с помощью сетевого выключателя измерительного блока.

6. Нажать кнопку «Высокое напряжение» 4 измерительного блока (рис. 7.3).

7. Плавно регулируя напряжение ручками 2 и 3 на измерительном блоке (рис. 7.3), добиться пробоя диэлектрика. Зафиксировать показания цифрового индикатора выходного напряжения 1 в момент, предшествующий пробую, и записать полученное значение напряжения пробоя в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от его толщины

Наименование материала	№ образца	h , мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	$E_{пр.ср}$, кВ/мм
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				

8. Выключить установку.

9. Поднять защитный щиток высоковольтного блока. Установить другой образец из этого же материала *большой* толщины в высоковольтное устройство.

10. Повторить эксперимент в соответствии с пунктами 2–7.

11. Выполнить измерения напряжения пробоя для 6 образцов разной толщины. Результаты измерений занести в табл. 7.3.

12. Выключить установку.

13. Рассчитать электрическую прочность материала по формуле (7.1), полученные данные занести в табл. 7.3.

14. Рассчитать среднее значение электрической прочности материала как среднее арифметическое шести измерений, полученные данные занести в табл. 7.3.

15. Сравнить полученные данные с табл. 7.1 и сделать вывод.

16. По данным табл. 7.3 построить графики зависимости $U_{пр} = f(h)$ и $E_{пр} = f(h)$.

Задание 3. Изучение зависимости электрической прочности твердых диэлектриков от количества изолирующих слоев.

Порядок выполнения работы:

1. Поднять защитный щиток высоковольтного блока и прижимную планку устройства крепления образца.

2. Поместить *однослойный* исследуемый образец между неподвижным 1 и подвижным электродом высоковольтного устройства (рис. 7.4) и зафиксировать его прижимной планкой устройства крепления образца.

3. Закрыть защитный щиток высоковольтного устройства.

4. По показаниям микрометра 5 (рис 7.3) измерить толщину исследуемого образца и занести полученные данные в табл. 7.4.

5. Включить питание стенда с помощью сетевого выключателя измерительного блока.

6. Нажать кнопку «Высокое напряжение» 4 измерительного блока (рис. 7.3).

7. Плавно регулируя напряжение ручками 2 и 3 на измерительном блоке (рис. 7.3), добиться пробоя диэлектрика. Зафиксировать показания цифрового индикатора выходного напряжения 1 в момент, предшествующий пробую, и записать полученное значение напряжения пробоя в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от количества изолирующих слоев

Наименование материала	Количество слоев n	h , мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	$E_{пр,ср}$, кВ/мм
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				

8. Выключить установку.

9. Поднять защитный щиток высоковольтного блока. Установить образец толщиной в *два слоя* в высоковольтное устройство.

10. Повторить эксперимент в соответствии с пунктами 2–7.

11. Выполнить измерения напряжения пробоя для 6 образцов с разным количеством изолирующих слоев. Результаты измерений занести в табл. 7.4.

12. Выключить установку.

13. Рассчитать электрическую прочность материала по формуле (7.1), полученные данные занести в табл. 7.4.

14. Рассчитать среднее значение электрической прочности материала, как среднее арифметическое шести измерений, полученные данные занести в табл. 7.4.

15. По данным табл. 7.4 построить графики зависимости $U_{пр} = f(h)$, $E_{пр} = f(h)$, $U_{пр} = f(n)$ и $E_{пр} = f(n)$.

16. Проанализировать зависимости $U_{пр} = f(h)$ и $U_{пр} = f(n)$ и сделать вывод. Проанализировать зависимости $E_{пр} = f(h)$ и $E_{пр} = f(n)$ и сделайте заключение о возможности замены более толстого диэлектрика многослойным материалом.

Задание 4. Изучение зависимости электрической прочности твердых диэлектриков от формы электродов.

Порядок выполнения работы:

1. Поднять защитный щиток высоковольтного блока и прижимную планку устройства крепления образца.

2. Поместить исследуемый образец между неподвижным I и подвижным электродом высоковольтного устройства (рис. 7.4) и зафиксировать его прижимной планкой устройства крепления образца.

3. Закрыть защитный щиток высоковольтного устройства.

4. По показаниям микрометра 5 (рис. 7.3) измерить толщину исследуемого образца и занести полученные данные в табл. 7.5.

5. Включить питание стенда с помощью сетевого выключателя измерительного блока.

6. Нажать кнопку «Высокое напряжение» 4 измерительного блока (рис. 7.3).

7. Плавно регулируя напряжение ручками 2 и 3 на измерительном блоке (рис. 7.3), добиться пробоя диэлектрика. Зафиксировать показания цифрового индикатора выходного напряжения I в момент, предшествующий пробую, и записать полученное значение напряжения пробоя в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от формы электрода

Наименование материала	Форма электрода	h , мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм
	1			
	2			
	3			
	4			

8. Выключить установку.

9. Поднять защитный щиток высоковольтного блока. С помощью механизма поворота 3 (рис. 7.4) поменять испытательный электрод на электрод другой формы.

10. Изменить положение образца так, чтобы от испытательного электрода до места предыдущего пробоя было не менее 40 мм.

11. Повторить эксперимент в соответствии с пунктами 2–7.

12. Выполнить измерения для 4 электродов разной формы. Результаты измерений занести в табл. 7.5.

13. Выключить установку.

14. Рассчитать электрическую прочность материала по формуле (7.1), полученные данные занести в табл. 7.5.

15. Сделать вывод как изменение формы электрода влияет на результаты испытаний.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам расчетов и построенным графическим зависимостям. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Табл. 7.2–7.5 с результатами измерений и расчетов.
4. Расчетная формула (7.1)
5. Графики зависимости $U_{пр} = f(h)$ и $E_{пр} = f(h)$ по данным табл. 7.3.
6. Графики зависимости $U_{пр} = f(h)$, $E_{пр} = f(h)$, $U_{пр} = f(n)$ и $E_{пр} = f(n)$ по данным табл. 7.4.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем состоит явление электрического пробоя?
2. Что называется электрической прочностью?
3. Каковы причины пробоя диэлектриков?
4. Как пробивное напряжение диэлектрика связано с электрической прочностью?
5. Как неоднородность материала влияет на электрическую прочность?
6. Перечислите виды пробоя твердых диэлектриков и объясните их физическую сущность.
7. Какой диэлектрик имеет большую электрическую прочность – плотный или пористый? Почему?
8. От чего зависит главным образом электрическая прочность при электрической форме пробоя?
9. С чем связано снижение пробивного напряжения изоляции с течением времени?
10. При каких условиях возможен электротепловой (тепловой) пробой?
11. Какие факторы обуславливают снижение электрической прочности при тепловой форме пробоя?

12. Чем обусловлен электрохимический пробой?
13. Что представляет собой электротермический пробой?
14. Какие электроды используются для получения однородного поля?
15. Опишите характерные черты электрического и теплового пробоев.
16. Как зависит электрическая прочность от толщины диэлектрика, состоящего из тонких листов неоднородного материала?
17. Опишите методику измерения пробивного напряжения.
18. Укажите причины старения диэлектрика в электрическом поле.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение : учебник / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – 4-е изд., стер. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 646 с.
2. Сапунов, С. В. Материаловедение : учебное пособие / С. В. Сапунов. – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 202 с.
3. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы : учебное пособие / А. С. Серебряков. – М. : Маршрут, 2005. – 280 с.
4. Журавлева, Л. В. Электроматериаловедение : учебник / Л. В. Журавлева. – 7-е изд., испр. – М. : Академия, 2012. – 352 с.
5. Готтштайн, Г. Физико-химические основы материаловедения = Physical Foundations of Materials Science / Г. Готтштайн ; под ред. В. П. Зломанова. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 400 с.
6. Электротехнические и конструкционные материалы : учебное пособие / В. Н. Бородулин [и др.] ; под общ. ред. В. А. Филикова. – М. : Мастерство : Высшая школа, 2001. – 280 с.
7. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебное пособие / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1980. – 493 с.
8. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – Санкт-Петербург : Химиздат, 2007. – 784 с.
9. Петрова, Л. Г. Электротехнические материалы : учебное пособие / Л. Г. Петрова, М. А. Потапов, О. В. Чудина. – М. : 2008. – 198 с.
10. Агеева, Н. Д. Электротехническое материаловедение : учебное пособие / Н. Д. Агеева, Н. Г. Винаковская, В. Н. Лифанов. – Владивосток : ДВГТУ, 2006. – 115 с.
11. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. Т. 1 / под ред.: Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 367 с.
12. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. Т. 2 / под ред.: Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
13. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. Т. 3 / под ред.: Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.

Информационные ресурсы

14. Электротехнические и конструкционные материалы [Электронный ресурс]: электронный учебно-методический комплекс /

Минсельхозпрод РБ, УО «БГАТУ», АЭФ, Кафедра ППС; сост. : Т. М. Ткаченко [и др.]. – Электронные данные (145 674 731 байт). – Минск : БГАТУ, 2017.

15. Электротехнические материалы. Электронное учебное пособие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electrofaq.com/ETMbook/Mbook.HTM>. – Дата доступа: 17.03.2021.

16. Электротехническое материаловедение. Электронный базовый учебник [Электронный ресурс] / В. Н. Бородулин [и др.] // Московский энергетический институт. – Режим доступа : <http://ftemk.mpei.ac.ru/ctlw/LocalContent.aspx?id=etm1>. – Дата доступа : 04.02.2021.

17. Учебно-контролирующий комплекс по электротехническим материалам [Электронный ресурс] // Московский энергетический институт. – Режим доступа : <http://ftemk.mpei.ac.ru/ukk/ukk.htm>. – Дата доступа : 11.03.2021.

18. Дамбис, М. К. Электротехническое материаловедение. Экспресс-учебник [Электронный ресурс] / М. К. Дамбис // Московский энергетический институт. – Режим доступа : http://ftemk.mpei.ac.ru/ctlw/LocalContent.aspx?id=etm_expr. – Дата доступа : 11.02.2021.

19. Справочник [Электронный ресурс] // Мир современных материалов. – Режим доступа : <http://worldofmaterials.ru/spravochnik>. – Дата доступа : 27.03.2021.

20. Ковалевская, Ж. Г. Материаловедение и технология конструкционных материалов [Электронный ресурс] / Ж. Г. Ковалевская // Корпоративный портал. – Режим доступа : https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOVALEVSKAYA/training_work/Tab1. – Дата доступа : 02.04.2021.

21. Буслаева, Е. М. Материаловедение. Шпаргалка [Электронный ресурс] / Е. М. Буслаева // Электронная библиотека «Лит-Мир». – Режим доступа : <https://www.litmir.me/br/?b=117916>. – Дата доступа : 02.03.2021.

22. Материаловедение [Электронный ресурс] // МССМ от ВВ. – Режим доступа : <http://mccm--vv.narod.ru/material/mater.htm>. – Дата доступа : 15.03.2021.

Технические нормативные правовые акты

23. Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация : ГОСТ 8865–93 (МЭК 85–84). – Взамен ГОСТ 8865-87 ; введ. 01.01.95. – М. : Издательство стандартов, 2003. – 8 с.

Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования : ГОСТ 10434–82. – Взамен ГОСТ 10434–76; введ. 17.12.92. – М. : Стандартиформ, 2011. – 20 с.

24. Материалы электроизоляционные композиционные гибкие. Определения и общие требования : ГОСТ 28602.1–91 (МЭК 626–1–79). – Введ. 01.01.93. – М. : Комитет стандартизации и метрологии СССР : Издательство стандартов, 1992. – 8 с.

25. Кремний полупроводниковый и кварц. Метод определения примесей : ГОСТ 26239.5–84. – Введ. 01.01.86. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 20 с.

26. Магниты постоянные для электротехнических изделий. Общие технические требования : ГОСТ 24936–89. – Взамен ГОСТ 24936–81; введ. 01.01.91. – М. : Издательство стандартов, 1989. – 26 с.

27. Медь. Марки : ГОСТ 859–2014. – Взамен ГОСТ 859–2001; введ. 01.04.17. – Минск : Госстандарт, 2016. – 8 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Таблица П1.1

Механические свойства литого и деформированного магния при 20 °С

Состояние материала	σ_b , МПа	<i>HB</i>	<i>E</i> , ГПа	<i>G</i> , ГПа
Литой магний				
Отдельно литые образцы	15	300	45	16
Деформированный магний				
Прессованные прутки	200	400	45	16
Листы холоднокатаные	260	500	45	–
Листы отожженные	190	400	45	–
Поковки	173	–	–	–

Таблица П1.2

Механические свойства литейных алюминиевых сплавов

Сплав	Режим термической обработки	Механические свойства при 20 °С			
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	<i>HB</i>	δ_b , %
АЛ2	T2	1,7	1,1	55	2
АЛ8	T4	3,5	1,7	80	10
АЛ27	–	3,6	1,8	90	18
АЛ27-1	–	3,8	1,9	–	20
АЛ23	–	2,5	1,4	75	10
АЛ23-1	–	2,6	–	80	12
АЛ13	T2	–	1,1	65	3
АЛ22	T4	2,6	1,8	90	4
АЛ7	–	2,4	1,6	65	7
	T5	2,6	2,0	85	3
АЛ19	T4	3,2	1,8	80	9
	T5	3,6	2,5	100	5
АЛ11	T2	2,2	1,5	80	2
АЛ24	T5	2,9	1,8	75	3
АЛ10В	T6	2,8	2,2	100	0,5
АЛ25	T1	2,0	1,6	–	–
АЛ26	T2	2,1	1,7	–	0,4
АЛ30	T1	–	–	–	0,5

Таблица П.3

Механические свойства болтов, винтов и шпилек

Механические свойства	Режим	Класс прочности										
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	8.8		10.9	12.9
									$d \leq 16$ мм	$d > 16$ мм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²	Ном.	300	400		500		600		800	800	1000	1200
	Мин.	330	400	420	500	520	600		800	830	1040	1220
Предел текучести σ_t , Н/мм ²	Ном.	180	240	320	300	400	360	480	–	–	–	–
	Мин.	190	240	340	300	420	360	480	–	–	–	–
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	Ном.	–	–	–	–	–	–	–	640	640	900	1080
	Мин.	–	–	–	–	–	–	–	640	660	940	1100

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Значение σ_T или $\sigma_{0,2}$ при высокой температуре, Н/мм ²	+100 °С	–	–	–	270	–	–	–	590		875	1020
	+200 °С	–	–	–	230	–	–	–	540		790	925
	+250 °С	–	–	–	215	–	–	–	510		745	875
	+300 °С	–	–	–	195	–	–	–	480		705	825
Относитель- ное удлинение после разрыва δ , %**	Мин.	25	22	–	20	–	–	–	12		9	8
Твердость по Виккерсу (<i>HV</i>)**	Мин– Макс	95– 220	120– 220	130– 220	155– 220	160– 220	190– 250	190– 250	250–320	255–335	320– 380	385– 435
	***	250	250	250	250	250	–	–	–	–	–	–
Твердость по Бринеллю (<i>HB</i>)**	Мин– Макс	90– 209	114– 209	124– 209	147– 209	152– 209	181– 238	181– 238	238–304	242–318	304– 361	366– 414
	***	238	238	238	238	238	–	–	–	–	–	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Твердость по Роквеллу (HR)**	Мин–Макс	52–95	67–95	71–95	79–95	82–95	89–99,5	89–99,5	–	–	–	–
	***	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	–	–	–	–	–	–
	Мин–Макс	–	–	–	–	–	–	–	22–32	23–34	32–39	39–44
Ударная вязкость КС, Дж (Дж/см ²)**	–	–	–	–	25 (50)	–	20 (40)	–	30 (60)	30 (60)	20 (40)	15 (30)

**d* – номинальный диаметр резьбы.

** Характеристики при температуре +20 °С.

*** Максимальное значение у головки болта, винта.

Таблица П.4

Механические свойства металлов и сплавов

Металлы и сплавы	Состояние	Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности на растяжение σ_B , МПа	Относительное удлинение после разрыва δ , %
Малоуглеродистая сталь (0,2 % С)	горячекатаная	300	450	35
Среднеуглеродистая сталь (0,4 % С, 0,5 % Мn)	упрочненная и отпущенная	450	700	21
Высокопрочная сталь (0,4 % С, 1,0 % Мn, 1,5 % Si, 2,0 % Cr, 0,5 % Мо)	упрочненная и отпущенная	1750	2300	11
Серый чугун	после литья	–	175–300	0,4
Алюминий технически чистый	отожженный	35	90	45
Алюминий технически чистый	деформационно-упрочненный	150	170	15
Алюминиевый сплав (4,5 % Cu, 1,5 % Mg, 0,6 % Mn)	упрочненный старением	360	500	13
Латунь листовая (70 % Cu, 30 % Zn)	полностью отожженная	80	300	66
Латунь листовая (70 % Cu, 30 % Zn)	деформационно-упрочненная	500	530	8
Вольфрам, проволока	тянутая до диаметра 0,63 мм	2200	2300	2,5
Свинец	после литья	0,006	12	30

Таблица III.5

Основные прочностные показатели древесины сравнительно по породам (при влажности 12 %)

Порода древесины	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа при					Твердость, Н/м ²			Модуль упругости при изги- бе, ГПа
		статическом изгибе	сжатии вдоль воло- кон	растяжении вдоль волокон	скальвании вдоль волокон		торц.	рад.	танг.	
					рад.	танг.				
Акация белая	800	148	73,1	171	13,2	14,7	94,2	66,2	75,9	16,3
Береза	640	109,5	54,0	136,5	9,02	10,9	46,3	35,9	32,1	14,2
Бук	680	104	52,9	124	12,1	14,0	65,1	53,2	49,5	12,4
Вяз	650	92,4	45,6	84,5	8,85	9,91	54,7	41,2	41,1	10,1
Граб	795	127,7	60,9	128,5	14,7	18,5	88,4	75,9	78,1	3,2
Груша	710	106	57,7	–	8,58	13,3	77,0	57,7	58,9	11,9
Дуб	780	87,3	55,9	–	10,7	12,7	57,3	48,2	52,8	–
Ель	445	78,6	45,0	101	6,83	6,72	39,2	17,5	17,8	9,60
Ива	455	70,7	38,2	99,1	7,26	10,3	27,4	20,9	20,7	8,98
Клен	690	115	58,5	–	12,0	13,7	73,8	54,1	57,4	11,9
Липа	495	86,4	45,8	117	8,42	8,00	25,0	16,7	17,4	8,94
Лиственница	665	108,8	61,5	124	9,78	9,11	42,0	31,5	33,4	14,3
Ольха	525	78,9	44,5	97,3	7,97	9,80	39,2	26,5	28,2	9,33
Орех грецкий	590	108	55,4	–	10,7	11,4	62,0	–	–	11,7

Основные прочностные показатели древесины сравнительно по породам (при влажности 12 %)

Порода древесины	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа при					Твердость, Н/м ²			Модуль упругости при изгибе, ГПа
		статическом изгибе	сжатии вдоль волокон	растяжении вдоль волокон	скалывании вдоль волокон		торц.	рад.	танг.	
					рад.	танг.				
Акация белая	800	148	73,1	171	13,2	14,7	94,2	66,2	75,9	16,3
Осина	495	76,5	43,1	121	6,15	8,42	25,8	18,7	19,6	11,2
Пихта сибирская	375	67,9	40,0	66,3	5,87	5,71	27,4	15,1	14,2	9,02
Сосна обычно- венная	505	84,5	46,3	102	7,44	7,23	28,4	22,5	23,2	12,2
Тополь	455	68,0	40,0	87,8	5,96	7,15	26,7	18,5	–	10,3
Ясень обычно- венный	680	118	56,2	140	13,4	13,0	78,3	57,1	65,1	11,9

Сокращения: рад. – радиальный, танг. – тангенциальный, торц. – торцовый.

Таблица П.6

Пластичность металлов

Металл	Относительное удлинение δ , %	Металл	Относительное удлинение δ , %
Золото	65	Титан	50
Серебро	65	Олово	40
Свинец	65	Алюминий	30–40
Медь	50–60	Цинк	30
Железо	40–50	Магний	10–22

Таблица П.7

Твердость металлов

Металл	<i>НВ</i>	Металл	<i>НВ</i>
Титан	160	Алюминий	16–25
Железо	70–80	Серебро	25
Магний	30–40	Золото	18
Медь	40	Олово	5
Цинк	33	Свинец	4

Таблица П.8

Механические свойства основных металлов

Наименование металла и обозначение модификации	Механические свойства металлов						
	σ_b , МПа	$\sigma_{пл}$, МПа	σ_T , МПа	δ , %	Ψ , %	E , МПа	<i>НВ</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
Алюминий (Al)	80–110	30	30–70	40	85	72 000	20–35
Бериллий (a-Be)	140	60	–	–	–	300 000	140

Продолжение таблицы П.8

1	2	3	4	5	6	7	8
Вольфрам (P-W)	1200– 1400	–	750	–	–	420 000	350
Железо (a-Fe)	250– 330	120	125	25–55	70–85	210 000	50
Кадмий (a-Cd)	62	3	10	20	50	530 000	20
Кобальт (a-Co)	240	–	–	5	–	207 500	125
Кремний (Si)	–	–	–	–	–	114 500	240
Магний (Mg)	170– 200	12	20–60	15	20	43 600	25
Марганец: a-Mn P-Mn	Хруп- кий	Хруп- кий	Хруп- кий	Хруп- кий	Хруп- кий	201 600 201 600	210 210
Медь (Cu)	220	15	60–80	60	75	132 000	35
Молибден (Mo)	700	–	–	30	–	330 000	125
Никель (a-Ni)	400– 500	80	120	40	70	205 000	60– 80
Ниобий (Nb)	340	–	–	–	30	–	250
Олово (белоеXP- Sn)	20–40	1,5	–	40	75	55 000	5
Свинец (Pb)	18	2,5	5–10	50	100	17 000	4–6
Титан (a-Ti)	600	–	440	28	–	105 000	230
Хром (a-Cr)	Хруп- кий	Хруп- кий	Хруп- кий	Хруп- кий	Хруп- кий	252 000	220

Окончание таблицы П1.8

1	2	3	4	5	6	7	8
Цирконий (a-Zr)	950	950	–	–	–	70 000	82
Цинк (Zn)	110–150	–	90–100	5–20	–	94 000	30–42

Обозначения: σ_b – предел прочности при растяжении; $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности; σ_t – предел текучести; δ – относительное удлинение; Ψ – относительное сужение; E – модуль упругости; HB – твердость по Бринеллю.

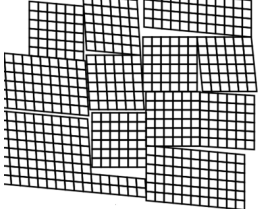
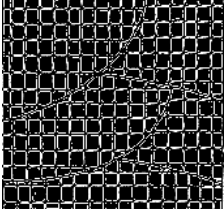
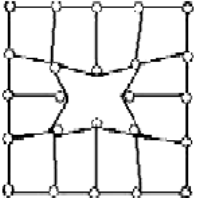
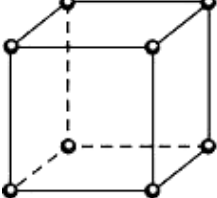
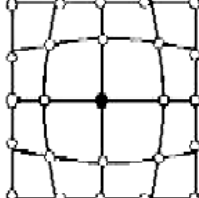
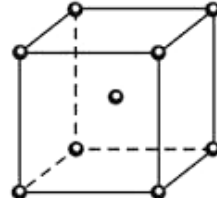
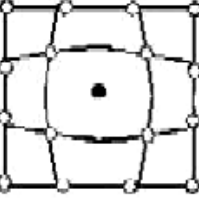
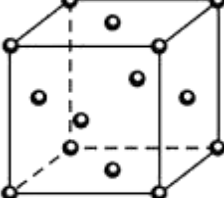
ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ДЕФЕКТОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ

Индивидуальные задания

Таблица П2.1

Карточка дефектов № 1

Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	

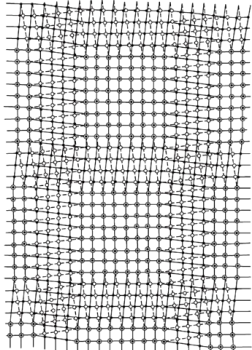
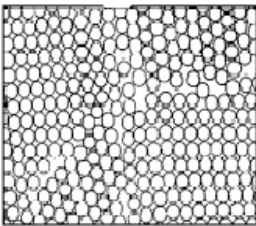
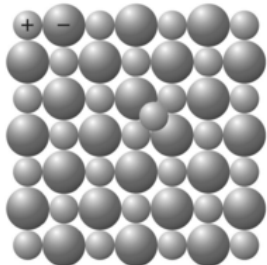
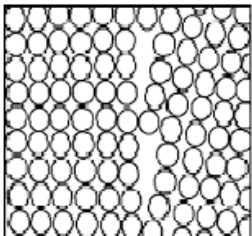
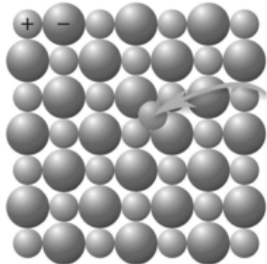
Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
5			

Таблица П2.2

Карточка дефектов № 2

Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
1		6	
2		7	

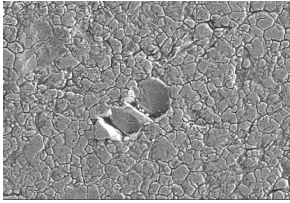
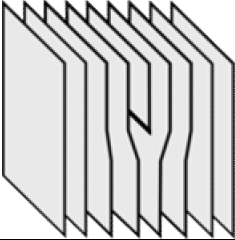
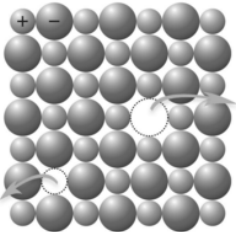
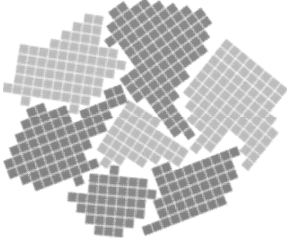
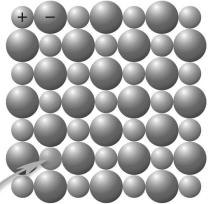
Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
3		8	
4		9	
5			

Таблица П2.3

Карточка дефектов № 3

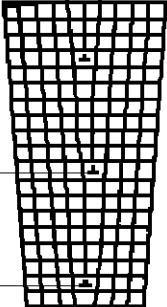
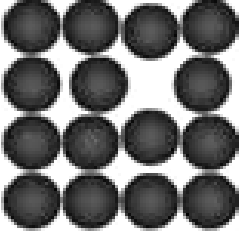
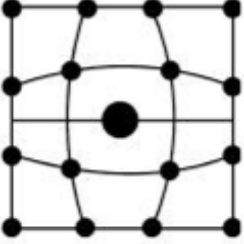
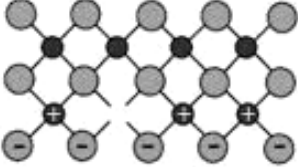
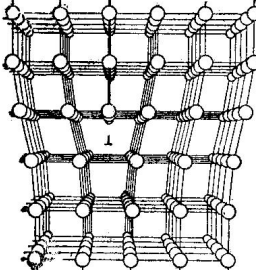
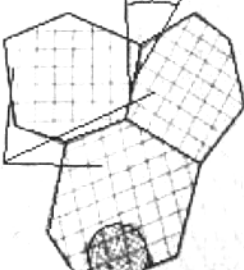
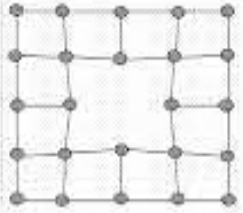
Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
1		6	

Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
2		7	
3		8	
4		9	
5			

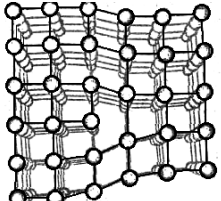
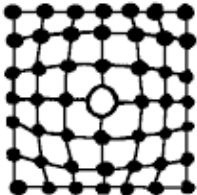
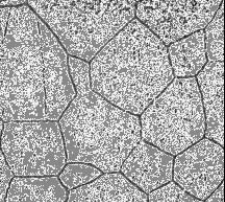
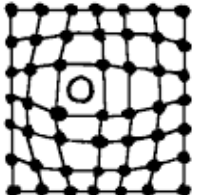
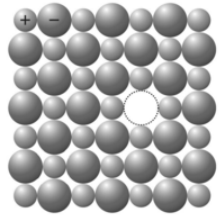
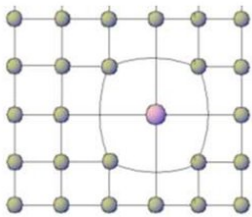
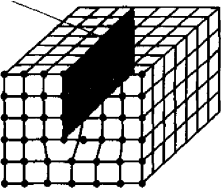
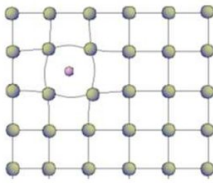
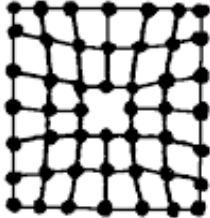
Таблица П2.4

Карточка дефектов № 4

Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
1		6	

Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
2		7	
3		8	
4		9	
5			

Карточка дефектов № 5

Номер задания	Изображение дефекта	Номер задания	Изображение дефекта
1		6	
2		7	
3		8	
4		9	
5			

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЙ СПЛАВОВ

Индивидуальные задания

Вариант № 1

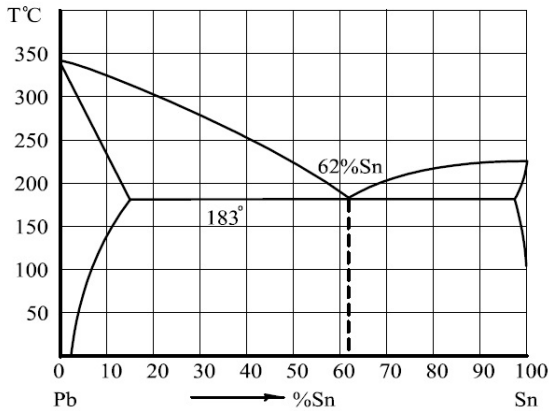


Рис. ПЗ.1. Диаграмма состояния системы «свинец–олово»

Вариант № 2

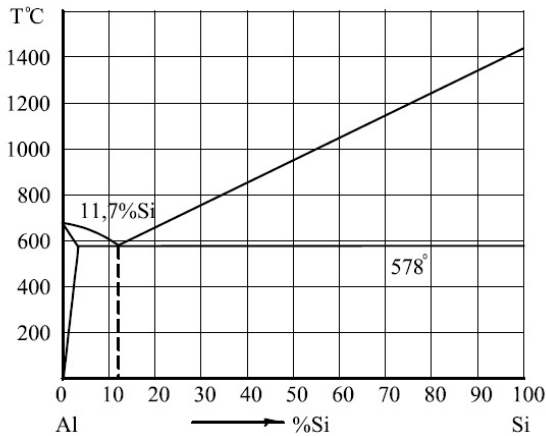


Рис. ПЗ.2. Диаграмма состояния системы «алюминий–кремний»

Вариант № 3

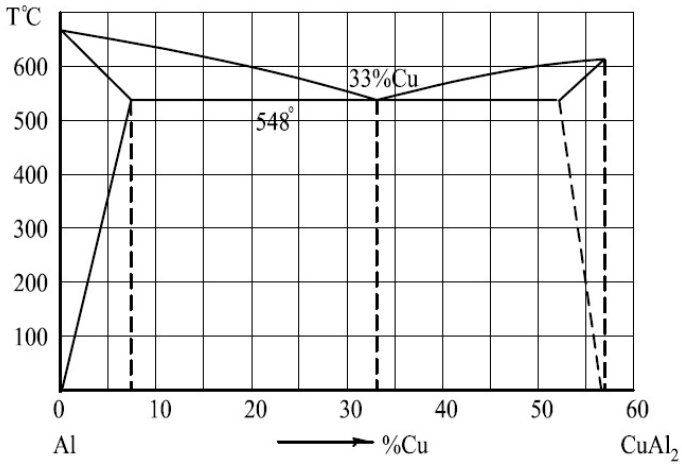


Рис. ПЗ.3. Диаграмма состояния системы «алюминий–медь»

Вариант № 4

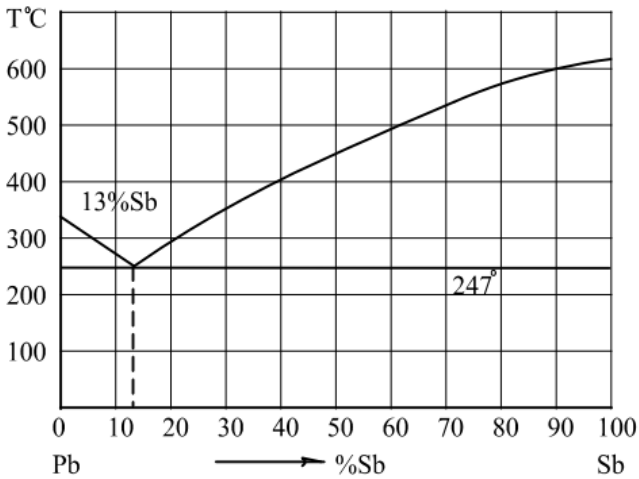


Рис. ПЗ.4. Диаграмма состояния системы «свинец–сурьма»

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

МАРКИРОВКА СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

Таблица П4.1

Маркировка сталей по применению (первая буква)

Первая буква в марке стали	Расшифровка
У	Инструментальная
Р	Быстрорежущая
С	Строительная
А	Автоматная
Ш	Шарикоподшипниковая
Е	С магнитными свойствами
Э	Электротехническая, АРМКО
ПП	Пониженная прокаливаемость
Л	Литейная конструкционная
К	Качественная углеродистая

Таблица П4.2

Буквенные обозначения добавок в маркировках сталей

Обозначение	Химический элемент	Наименование	Обозначение	Химический элемент	Наименование
Х	Cr	Хром	А	N	Азот
С	Si	Кремний	Н	Ni	Никель
Т	Ti	Титан	К	Co	Кобальт
Д	Cu	Медь	М	Mo	Молибден
В	W	Вольфрам	Б	Nb	Ниобий
Г	Mn	Марганец	Е	Se	Селен
Ф	W	Ванадий	Ц	Zr	Цирконий
Р	B	Бор	Ю	Al	Алюминий

Примечание: буква Ч указывает на наличие редкоземельных металлов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

РАСШИФРОВКА МАРКИРОВОК СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ

Таблица П5.1

Индивидуальные задания по расшифровке марок сталей и чугунов

Вариант №	Марка стали и чугуна	
	Задание 1	Задание 2
1	ВСт2кп	45
2	У11	15пс
3	15пс	У8А
4	У8А	Ст3кп
5	60Г	БСт0
6	Ст3Гсп	У10Г
7	20пс	ВСт4кп
8	50	10кп
9	КЧ 65-3	КЧ 33-8
10	ВЧ38-17	ВЧ45-5
11	ВЧ35-22	ВЧ120-4
12	СЧ40	СЧ 30
13	СЧ 20	СЧ 15
14	БСт3кп	КЧ45-7
15	ВСт4сп	СЧ15
16	25	ВСт2сп
17	05кп	80
18	65Г	У8А
19	У11	ВЧ 40
20	Ст5Гпс	КЧ33-8
21	У7	ВЧ70-3
22	08	Ст2пс
23	15ХСНД	15Г2АФД
24	ШХ15	ШХ15СГ
25	12ГН2МФАЮ	А12
26	АС30ХМ	4Х5МФС
27	3Х3М3Ф	Р9М4К8
28	Р6М5	Е 36
29	D40	08Х21Н6М2Т

Вариант №	Марка стали и чугуна	
	Задание 1	Задание 2
30	50ХГА	18ХГТ
31	09Х17Н3С	12Х18Н12М3Т
32	6ХС	ХВГ
33	3Х2В8Ф	8Х4В4Ф
34	P10M4Φ3K10	07X13AГ20
35	09Х17Н3С	14Х17Н2
36	15Х23Н18Л	09Х15Н8Ю
37	9ХФ	6Х2С
38	4Х5МС	4Х5В2ФС

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

РАСЧЕТ ЧИСЛА ЗАГОТОВОК

Индивидуальные задания

Вариант № 1

Рассчитать сколько штук заготовок сортового проката N можно погрузить на грузовик грузоподъемностью 3 тонны. Заготовки выполнены из стали с профилем в форме трубы прямоугольного сечения (рис. Пб.1).

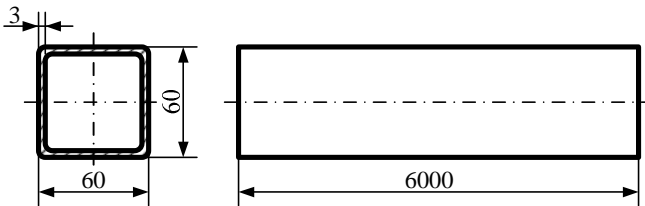


Рис. Пб.1. Труба прямоугольного профиля горячекатаная

Вариант № 2

Рассчитать количество заготовок сортового проката N с профилем типа «швеллер» (рис. Пб.2), которые можно погрузить на грузовик грузоподъемностью 3 тонны. Длина одной заготовки 5 м. Заготовки выполнены из алюминия.

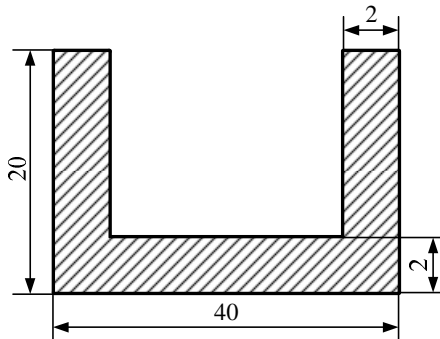


Рис. Пб.2. Профиль швеллера

Вариант № 3

Рассчитать количество заготовок сортового проката N с профилем типа «двутавр» (рис. Пб.3), которые можно погрузить на грузовик грузоподъемностью 3 тонны. Размеры заготовки: $s = t = 10$ мм, $h = 70$ мм, $b = 50$ мм, длина одной заготовки 5 метров. Заготовки выполнены из стали.

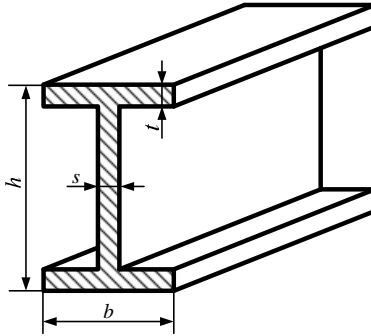


Рис. Пб.3. Двутавр

Вариант № 4

Рассчитать количество заготовок сортового проката N (круглой трубы), которые можно погрузить на грузовик грузоподъемностью 3 тонны. Заготовки выполнены из латуни с профилем в форме трубы круглого сечения (рис. Пб.4). Длина одной заготовки 5 метров.

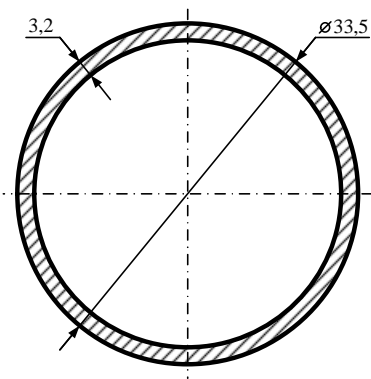


Рис. Пб.4. Труба круглого профиля

Таблица Пб.1

Плотность основных металлов и сплавов

Металл	Плотность, кг/м ³	Металл	Плотность, кг/м ³
Алюминий	2712	Молибден	10 188
Алюминий жидкий	2560–2640	Монель	8360–8840
Алюминиевая фольга	2700–2750	Никель	8800
Бериллий	1840	Олово	7280
Ванадий	5494	Платина	21 400
Вольфрам	19 600	Плутоний	19 816
Железо	7850	Ртуть	13 593
Золото	19 320	Серебро	10 490
Кобальт	8746	Свинец	11 340
Магний	1738	Титан	4500
Медь	8930	Цинк	7135
Чугун	6800–7400	Латунь	8500–8700

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ПЛАСТМАСС

Таблица П7.1

Основные признаки распознавания типовых видов пластмасс

Вид пластмассы	Цвет	Блеск	Прозрачность	Жесткость	Характер поверхности	Строение излома	Характер звука при ударе	Методы переработки
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пластмассы на основе термопластичных полимеризационных смол								
Полиэтилен (ПЭ)	Бесцветный, белый или др. цвет неяркого тона	Матовый	Полупрозрачный, прозрачен в пленках	Полужесткий	Парафинообразная на ощупь	Не ломается	Глухой	Литье под давлением, экструзия, в т. ч. раздуванием
Полипропилен (ПП)	Белый или др. ярких цветов	Блестящий	Непрозрачный, полупрозрачный, прозрачен в пленках	Жесткий	Гладкая	Стекловидное, однородное	Глухой	Литье под давлением, экструзия, в т. ч. раздуванием

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Аморфный полистирол (АПС)	Белый или др. ярких цветов	Блестящий	Прозрачный (стеклоподобный)	Жесткий	Очень гладкая	Стекловидное, однородное	Звонкий металлический	Литье под давлением, штампование
Ударопрочный полистирол (УПС)	Белый или др. ярких цветов	Слабоблестящий	Непрозрачный	Жесткий	Гладкая	Стекловидное, однородное	Звонкий металлический	Литье под давлением, штампование, вакуумное формование
Полиметилметакрилат (ПММА)	Бесцветный, белый или др. цветов	Блестящий	Прозрачный (стеклоподобный), полупрозрачный	Жесткий	Очень гладкая	Стекловидное, однородное	Глухой	Штампование, вакуумное формование
Поливинилхлорид, пластикат (ПВХ)	Черный, белый или др. ярких цветов	Блестящий	Непрозрачный, полупрозрачный, прозрачен в пленках	Эластичный	Гладкая	Не ломается	Глухой	Каландрование

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пластмассы на основе термопластичных поликонденсационных смол								
Поликарбонат (ПК)	Бесцветный или окрашенный	Блестящий	Прозрачный, непрозрачный	Жесткий	Гладкая	Стекловидное, однородное	Глухой	Литье под давлением, экструзия, штампование, вакуумное формование
Пластмассы на основе модифицированных природных полимеров								
Целлулоид	Белый или др. ярких цветов, в т. ч. перламутровый	Блестящий	Прозрачный, полупрозрачный, непрозрачный	Жесткий	Гладкая	Стекловидное, однородное	Глухой	Штампование, выдувание
Ацетилцеллюлоза (пленка)	Бесцветный	Блестящий	Прозрачный	Эластичный	Гладкая	Однородное	Глухой	Каландрование

Основные признаки распознавания типовых видов пластмасс
по характеру горения

Вид пластмассы	Изменения при нагревании	Характер горения	Вид пламени	Запах продуктов горения
Пластмассы на основе термопластичных полимеризационных смол				
Полиэтилен (ПЭ)	Размягчается, оплавляется, вытягивается в нити	Горит слабым пламенем без копоти с оплавлением и подтеканием полимера	Синеватое	Горящей парафиновой свечи
Полипропилен (ПП)	Размягчается, оплавляется, вытягивается в нити	Горит слабым пламенем без копоти с оплавлением и подтеканием полимера	Синеватое	Жженой резины или горящего сургуча
Аморфный полистирол (АПС)	Размягчается, вытягивается в нити	Загорается быстро, пламя яркое и коптящее	Желтое	Сладковатый, неприятный, запах стирола
Ударопрочный полистирол (УПС)	Размягчается, вытягивается в нити	Загорается быстро, пламя яркое и сильно коптящее	Желтое	Сладковатый, неприятный, запах стирола

Вид пластмассы	Изменения при нагревании	Характер горения	Вид пламени	Запах продуктов горения
Полиметилметакрилат (ПММА)	Размягчается	При удалении из пламени горит медленно, пламя светящееся, слегка коптящее, горит с потрескиванием и искрами	Голубоватое у основания	Острый, фруктовой эссенции
Поливинилхлорид, пластикат (ПВХ)	Размягчается	Загорается не сразу, при удалении из пламени горит медленно, пламя коптящее, устойчивое	Зеленоватое у основания	Резкий, соляной кислоты
Пластмассы на основе термопластичных поликонденсационных смол				
Поликарбонат (ПК)	Размягчается, вытягивается в нити	Загорается с трудом, вне пламени гаснет, край вспенивается	Яркое коптящее	Фенола
Пластмассы на основе модифицированных природных полимеров				
Целлюлоид	Размягчается	Легко воспламеняется с образованием белого дыма, горит быстро	Интенсивное, яркое	Камфоры, оксидов азота
Ацетилцеллюлоза (пленка)	Размягчается	Горит плохо, с искрами, при удалении из пламени гаснет	Желтое, по краям зеленоватое	Уксусной кислоты

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Ткаченко Тамара Михайловна,
Барайшук Сергей Михайлович,
Нефёдов Святослав Святославович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.
ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

Ответственный за выпуск *С. М. Барайшук*
Корректор *Д. О. Михеева*
Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*
Дизайн обложки *А. А. Покало*

Подписано в печать 04.11.2022. Формат 60×84^{1/16}.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 13,72. Уч.-изд. л. 10,73. Тираж 99 экз. Заказ 384.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–1, 220023, Минск.