

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

В. А. НЕМОНТОВ

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
В МЕХАТРОНИКЕ**

Учебное пособие



Владимир 2021

УДК 621.3
ББК 31.2+32.966
Н50

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой вычислительной техники и систем управления
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. Н. Ланцов

Кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры промышленной электроники
и интеллектуальных цифровых систем
Московского государственного технологического университета
«СТАНКИН»
В. В. Филатов

Немонтов, В. А.

Н50 Электротехнические материалы в мехатронике : учеб. пособие /
В. А. Немонтов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. –
Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 304 с. – ISBN 978-5-9984-1126-7.

Содержит основные сведения об электротехнических материалах, применяемых в мехатронике и робототехнике. Рассмотрены характеристики ключевых групп электротехнических материалов (проводников, диэлектриков, магнитных материалов), особенности проводниковых изделий и материалов для изоляции соединений; проанализированы основные параметры пластиков для 3D-печати корпусных и механических элементов электротехнического оборудования в мехатронике. Для лучшего усвоения материала приведены вопросы для самопроверки.

Предназначено для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки 15.03.06 – Мехатроника и робототехника. Может быть использовано студентами смежных направлений подготовки.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 22. Табл. 60. Библиогр.: 22 назв.

УДК 621.3
ББК 31.2+32.966

ISBN 978-5-9984-1126-7

© ВлГУ, 2021
© Немонтов В. А., 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	11
1.1. Классификация материалов по применению	11
1.2. Основы зонной теории твердого тела.....	13
1.3. Влияние агрегатного состояния на электрические свойства веществ	17
1.4. Особенности строения твердых тел.....	18
Глава 2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ	22
2.1. Свойства и классификация проводниковых материалов.....	22
2.1.1. Свойства проводниковых материалов.....	24
2.1.2. Физическая природа электропроводности металлов	25
2.1.3. Температурная зависимость удельного сопротивления металлов.....	27
2.1.4. Влияние примесей и дефектов структуры на удельное сопротивление металлов.....	30
2.1.5. Удельное сопротивление металлических сплавов	31
2.1.6. Сопротивление проводников на высоких частотах	33
2.1.7. Сопротивление тонких металлических пленок. Размерный эффект	34
2.2. Материалы высокой проводимости	37
2.2.1. Проводниковая медь и её сплавы.....	37
2.2.2. Проводниковый алюминий и его свойства	48
2.2.3. Проводниковые железо и сталь	53
2.2.4. Свинец и никель	55
2.2.5. Благородные металлы, применяемые в электротехнике ..	57

2.2.6. Тугоплавкие металлы	61
2.2.7. Сверхпроводящие металлы и сплавы	65
2.2.7.1. Физическая природа сверхпроводимости	65
2.2.7.2. Магнитные свойства сверхпроводников	70
2.2.7.3. Сверхпроводящие материалы.....	71
2.2.7.4. Применение сверхпроводников	73
2.2.8. Неметаллические проводники	76
2.2.8.1. Материалы на основе графита.....	76
2.2.8.2. Композиционные проводящие материалы.....	78
2.2.8.3. Проводящие материалы на основе окислов.....	80
2.2.9. Материалы для электрических контактов	81
2.2.9.1. Разрывные контакты.....	82
2.2.9.2. Скользящие контакты.....	87
2.2.9.3. Неподвижные контакты. Припой.....	89
2.3. Проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением	98
2.3.1. Общие требования	98
2.3.2. Проводниковые сплавы высокого сопротивления на основе меди и никеля	99
2.3.3. Жаростойкие проводниковые сплавы.....	101
2.3.4. Ртуть и её свойства	104
Глава 3. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	107
3.1. Свойства диэлектриков	107
3.2. Газообразные диэлектрики	112
3.2.1. Естественные газообразные диэлектрики.	112
3.2.2. Искусственные газообразные диэлектрики	115
3.3. Жидкие диэлектрики	116
3.3.1. Нефтяные масла	117
3.3.2. Растительные масла	119
3.3.3. Синтетические жидкие диэлектрики	121
3.4. Твердые диэлектрические материалы	123
3.4.1. Твердые неорганические диэлектрики	124

3.4.1.1. Слюда	124
3.4.1.2. Стекла	124
3.4.1.3. Ситаллы.....	128
3.4.1.4. Керамика	129
3.4.1.5. Активные диэлектрики.....	132
3.4.1.6. Жидкие кристаллы	137
3.4.1.7. Оксидная изоляция	138
3.4.2. Твердые органические диэлектрики	139
3.4.2.1. Высокочастотные линейные полимеры	141
3.4.2.2. Низкочастотные линейные полимеры (полярные термопласты).....	143
3.4.2.3. Смолы.....	145
3.4.3. Пластмассы	149
3.4.4. Плёночные электроизоляционные материалы.....	152
3.4.5. Слоисто-волокнистые электроизоляционные пластмассы	155
3.4.6. Электроизоляционные резины	162
3.4.7. Лаки, эмали, компаунды.....	166
Глава 4. ПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗДЕЛИЯ.....	173
4.1. Обмоточные провода	174
4.2. Монтажные провода	182
4.3. Установочные провода	194
4.4. Алюмомедный провод.....	201
4.5. Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией	203
4.6. Кабели с бумажной изоляцией	206
4.7. Цветовая маркировка проводов.....	211
4.8. Плоские (ленточные) кабели и провода	215
Глава 5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СОЕДИНЕНИЙ.....	238
5.1. Электроизоляционная лента	238
5.2. Изоляционные трубки	241
5.3. Гофрированная труба для электропроводки	245

Глава 6. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В МЕХАТРОНИКЕ	249
6.1. Технические характеристики и параметры стандартных материалов	251
6.2. Технические характеристики и параметры профессиональных материалов	265
6.3. Технические характеристики и параметры специальных материалов	276
Глава 7. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	283
7.1. Магнитные свойства веществ	283
7.2. Магнитно-мягкие материалы.....	287
7.3. Магнитно-твёрдые материалы.....	290
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	299
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	301
ПРИЛОЖЕНИЕ	303

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время мехатроника наряду с информатикой, биоинженерией и нанотехнологиями оказывает существенное влияние на развитие производственной и бытовой техносфер в направлении всё более широкого внедрения систем мехатронной автоматизации и роботизации в различные физико-технические процессы во всех сферах деятельности общества.

Цель мехатроники – создание интеллектуальных физико-технических изделий, систем и процессов, обладающих качественно новыми функциями, свойствами и возможностями. Частным случаем таких физико-технических изделий являются роботы и робототехнические системы различного назначения и размерностей.

Современная мехатроника и робототехника охватывает все размерные масштабы технических систем от «макро» до «микро» (размеры от 1 мк до 1 мм) с последующим переходом от микросистем к наносистемам (порядка ста нанометров – 10^{-7} м): переход «макро – микро – нано – мехатроника и робототехника».

Мехатроника – область науки и техники, основанная на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей, вычислительных устройств (ЭВМ и микропроцессоры). Мехатронная система – единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта.

Робототехника – область науки и техники, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, построенных на базе мехатронных модулей (информационно-сенсорных, исполнительных и управляющих). Роботы и робототехнические системы предназначены для выполнения рабочих операций от микро- до макро размерностей, в том числе с заменой человека на тяжелых, утомительных и опасных работах.

Требования к материалам в мехатронике и робототехнике:

- сохранение формы и целостности конструкции (прочность и устойчивость к внешним силовым воздействиям);
- обеспечение несущей способности (способность конструкции выдерживать нагрузку, обеспечивая нормальное функционирование изделия – узлы трения);
- устойчивость к внешним воздействиям окружающей среды (температура, влажность, химически агрессивная среда);
- осуществление различных функций (перемещение, усилия на деталь или породу) при сверлении, бурении, точность при сварке и обработке;
- оптимальное соотношение веса и прочности (особенно для летающих роботов и космоса);
- эстетичный вид;
- экологичность;
- приемлемая стоимость.

Современный научно-технический прогресс неразрывно связан с разработкой и использованием новых материалов. Совершенствование применяемых материалов – необходимое условие успешного развития любой отрасли техники. В полной мере это относится к таким техническим отраслям, как мехатроника и робототехника, для которых именно качество материалов становится ключом к разработке сложных инженерных решений и созданию новейшей аппаратуры. Применяемые в этих областях металлические и неметаллические материалы обладают особыми физическими свойствами: электрическими, магнитными, свойствами теплового расширения и т. д. Знание свойств материалов и объективных закономерностей зависимости этих свойств от физической природы, структуры, состава, технологических и эксплуатационных факторов позволяет специалисту не только грамотно выбирать материал при проектировании мехатронных устройств, но и грамотно эксплуатировать их.

История целенаправленного применения специализированных материалов для электромеханики началась в 1802 г. при создании академиком В.В.Петровым в качестве источника электрической энергии большой гальванической батареи. В 1832 г. русский ученый П.Л. Шиллинг в опытах по созданию электромагнитного телеграфа использовал в качестве изоляции пленку, пропитанную воском, каучук и шелковую пряжу. В 1872 г. изобретатель А.Н. Лодыгин создал первую угольную

лампу накаливания, а инженер П.Н. Яблочков в 1876 г. изобрел электрическую «свечу». В этих изобретениях были использованы проводники, электрическая изоляция и магнитные материалы, которые были объединены в большую группу электротехнических материалов.

Наука об электротехнических материалах приобретала все большее значение по мере развития радиотехники, в частности с изобретением радио великим русским ученым А.С. Поповым.

Электротехническое материаловедение базируется на основах классического материаловедения, для которого исключительным вкладом явилось открытие Д.И. Менделеевым (1834 – 1907) периодической системы элементов, ставшей теоретическим фундаментом для развития физики и химии материалов.

Значительное место среди электротехнических материалов занимают металлы и сплавы. Большой вклад в развитие отечественного металловедения внесли русские и советские ученые – Д.К. Чернов, В.С. Курнаков, С.С. Штейнберг, Н.А. Минкевич, Г.В. Курдюмов, А.М. Бочвар, А.А. Бочвар, В.Д. Садовский, И.И. Сидорин, Ю.М. Лахтин.

С разработкой пластмасс, синтетических смол и других полимерных материалов группа электротехнических материалов значительно расширилась. Создание этих материалов связано с развитием химии высокомолекулярных соединений, основы которой были заложены выдающимся русским ученым А.М. Бутлеровым. В разработку таких неорганических материалов, как стекла и керамика, внесли вклад советские ученые В.А. Каргин, К.А. Андрианов, Н.П. Богородицкий. Благодаря фундаментальным исследованиям в области ферромагнетизма Н.С. Акулова, С.В. Вонсовского, существенно увеличился спектр магнитных материалов различного назначения. Работы академика А.Ф. Иоффе позволили разработать новый класс полупроводниковых материалов.

Существенный скачок в разработке материалов был связан с увеличивающимися потребностями радиоэлектроники в послевоенные 40 – 50-е годы XX века. Собираемая из множества деталей электронная аппаратура была громоздкой и тяжелой. Плотность монтажа среднего телевизора составляла 0,05 деталей на 1 см², а надежность электронной аппаратуры была невысока. Техническая задача сокращения размеров и массы аппаратуры, увеличения ее надежности и долговечности логически привела к интенсивному развитию микро-

электроники, которая основана на минимизации энергетических процессов в электронных схемах, что потребовало разработки новой элементной базы и технологий.

Достижения последних лет в области разработки новых электротехнических материалов весьма значительны. Для их изготовления применяют разнообразные методы химического синтеза, искусственного выращивания монокристаллов, нанесения тонких пленок (высокопроводящих, резистивных и магнитных) на подложку, способы глубокой очистки от примесей, ионно-плазменную обработку, воздействие на материалы электромагнитным полем, ионизирующими излучениями и т. д.

На основе современных электротехнических материалов изготавливаются принципиально новые электротехнические и электромеханические устройства: многочисленные полупроводниковые приборы, твердые схемы, нелинейные конденсаторы и резисторы с параметрами, регулируемые бесконтактными способами, выпрямители, усилители, стабилизаторы тока и напряжения, преобразователи энергии, устройства для хранения и считывания информации; квантовые генераторы, усилители-лазеры, жидкие кристаллы, ферритные устройства для управления электромагнитной энергией СВЧ, датчики ЭДС Холла, термоэлектрические генераторы с высоким КПД, аппаратура голографии и многие другие аппараты и приборы новой техники.

В учебном пособии рассмотрены основные группы электротехнических материалов: проводники, диэлектрики и магнитные материалы, а также проводниковые изделия и материалы для 3D-печати. По каждой группе материалов рассмотрены: физическая сущность явлений, происходящих в материалах при взаимодействии с электромагнитным полем, основные электрофизические характеристики материалов и влияние на них различных факторов, особенности технологии получения материалов и их применение в электротехнических и электромеханических устройствах, элементах мехатроники и робототехники.

Материаловедение – наука о структуре и свойствах материалов, их взаимосвязи и возможности изменения для рационального использования в технике

Материал – вещество/совокупность веществ, из которого состоит или может быть изготовлено техническое изделие, имеющее функциональное значение

Свойство – количественная/качественная характеристика материала, определяющая его общность или различие с другими материалами. Качество материала определяется его свойствами.

Глава 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Классификация материалов по применению

Материалы, применяемые в мехатронике, принято классифицировать на электротехнические, конструкционные и материалы специального назначения. Электротехническими называют материалы, обладающие особыми свойствами по отношению к электромагнитному полю. К ним относятся: проводники, диэлектрики, полупроводники и магнитные материалы.

Проводники – это материалы с сильно выраженной электропроводностью. По применению их делят на материалы высокой проводимости (для проводов различного назначения, токопроводящих деталей, электрических контактов) и материалы высокого сопротивления (для резисторов и нагревательных элементов).

Диэлектрики – это материалы, способные поляризоваться и сохранять электростатическое поле. По применению различают пассивные диэлектрики (электроизоляционные) и активные диэлектрики (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и др.), свойствами которых можно управлять внешним энергетическим воздействием.

Полупроводники – это материалы с сильной зависимостью электропроводности от концентрации и вида примесей, дефектов структуры и внешних энергетических воздействий (температуры, электромагнитных полей, освещенности и т.д.).

Магнитные материалы. По отношению к магнитному полю большинство электротехнических материалов – немагнитные либо слабомагнитные вещества. Существует особая группа материалов, проявляющих сильные магнитные свойства.

Магнитные материалы способны сильно намагничиваться во внешнем магнитном поле. По особенностям процесса намагничивания, связанным с их строением, они делятся на ферромагнетики и

ферромагнетики (ферриты). Различают *магнитомягкие* и *магнитотвердые* материалы. Магнитомягкие материалы легко перемагничиваются. Их применяют в электромагнитах и переменных магнитных полях в качестве сердечников трансформаторов, магнитопроводов электрических машин, реле и т.д. Магнитотвердые материалы трудно размагничиваются, обладают большим запасом магнитной энергии; их используют для изготовления постоянных магнитов и устройств для записи и хранения информации.

Основной характеристикой электротехнических материалов является *удельная электропроводность* – γ , Сименс/м, как коэффициент пропорциональности между плотностью тока j (А/м²) и напряженностью электрического поля E (В/м) в законе Ома:

$$j = \gamma \cdot E.$$

Удельная электропроводность зависит только от свойств материала. Этой характеристикой обычно пользуются в теории. На практике, для оценки электропроводности материалов и систем более широко используется обратная величина – удельное электрическое сопротивление – ρ , Ом·м:

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

Для основных групп электротехнических материалов значение ρ составляет:

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

Что касается магнитных материалов, то по величине удельной проводимости (удельному сопротивлению) они могут быть проводниками, полупроводниками или диэлектриками.

Среди материалов, применяемых в мехатронных устройствах, особое место занимают сплавы с высокими упругими свойствами, которые применяются для упругих элементов (токопроводящие пружины, подвески, растяжки, мембраны и т.д.), и сплавы с особыми свойствами теплового расширения. Различают сплавы с минимальным коэффициентом линейного расширения, предназначенные для деталей приборов с повышенными требованиями постоянства линейных раз-

меров при изменении температуры, и сплавы с заданным коэффициентом линейного расширения – для создания вакуумплотных спаев с другими материалами (стеклом, керамикой и т.д.).

1.2. Основы зонной теории твердого тела

Все тела, в зависимости от их электрических свойств, подразделяются на диэлектрики, полупроводники и проводники. Различие между ними наиболее наглядно можно показать с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердых тел.

Атом каждого вещества характеризуется наличием определенных энергетических уровней (состояний). Часть этих уровней заполнена при нормальном (невозбужденном) состоянии атома, на других уровнях электроны могут находиться только тогда, когда атом подвергнется внешнему воздействию, т. е. когда он возбужден. Стремясь к устойчивому состоянию, атом излучает избыток энергии в момент перехода электрона с возбужденных уровней на уровни, при которых его энергия минимальна.

Энергетические диаграммы диэлектриков, полупроводников и проводников (металлов) изображены на рис. 1.1.

С точки зрения зонной теории разделение материалов на диэлектрики и полупроводники условно, поскольку не обосновывается никакими качественными физическими особенностями, и разница между ними заключается лишь в ширине запрещенной зоны.

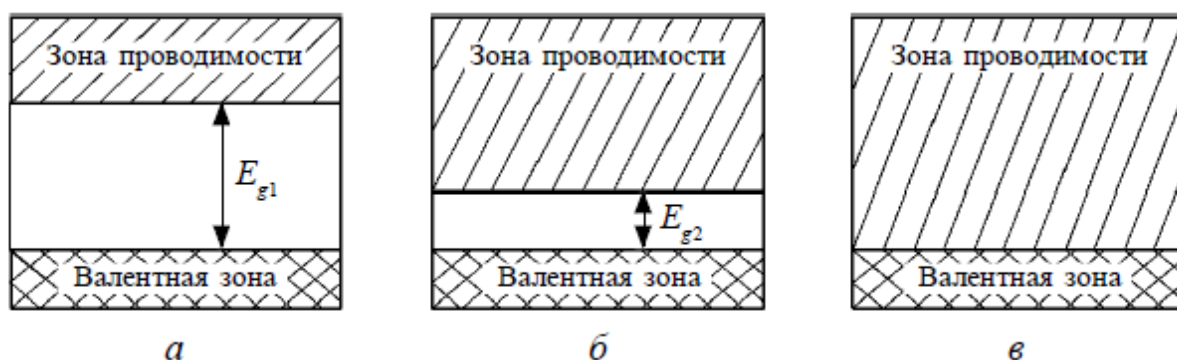


Рис. 1.1. Энергетические диаграммы диэлектрического, полупроводникового и проводящего материалов:
а – диэлектрик; *б* – полупроводник; *в* – проводник

Количество энергетических уровней, составляющих энергетическую зону, определяется числом атомов в твердом теле. Если в 1 см^3 кристалла содержится $10^{22} \dots 10^{23}$ атомов, а ширина зоны в среднем составляет 1 эВ (электронвольт), то уровни в зоне отстоят друг от друга на $10^{-22} \dots 10^{-23} \text{ эВ}$. Это означает, что энергетическая зона характеризуется квазинепрерывным спектром, и достаточно малейшего энергетического воздействия, чтобы вызвать переход электронов с одного уровня на другой при наличии там свободных состояний. Внутренние электронные оболочки изолированных атомов, как правило, заполнены электронами, соответствующие им энергетические зоны также оказываются заполненными. Самую внешнюю из заполненных электронами зон называют валентной зоной. Ближайшую к валентной разрешенную зону свободных энергетических уровней называют зоной проводимости. Валентная зона и зона проводимости отделены друг от друга запрещенной зоной – энергетическим барьером E_g .

Принято считать, что диэлектрики – это тела, у которых запрещенная зона настолько велика, что электронной проводимости практически не наблюдается ($E_g > 3 \text{ эВ}$). У полупроводников ширина запрещенной зоны лежит в диапазоне $2kT < E_g < 3 \text{ эВ}$.

Проводники – это материалы, у которых заполненная электронами зона вплотную прилегает или даже перекрывается зоной свободных энергетических уровней. Вследствие этого электроны в них свободны и могут переходить с уровней заполненной зоны на незанятые уровни свободной зоны под влиянием слабых напряженностей приложенного к проводнику электрического поля ($E_g < 2kT$).

У металлического проводника проводящее состояние является нормальным в отличие от полупроводников и диэлектриков, где оно является возбужденным, требующим затраты энергии извне на переход электронов через запрещенную зону. Валентная зона не полностью заполнена электронами, имеются свободные энергетические подуровни, которые с зоной проводимости образуют энергетический спектр свободных уровней.

В электрическом поле добавочная энергия, приобретаемая электронами на длине свободного пробега ($10^{-8} \dots 10^{-4} \text{ эВ}$), намного превосходит энергетический интервал ($10^{-22} \dots 10^{-23} \text{ эВ}$) между уровнями в зоне, и электроны переходят на ближайшие свободные уровни, созда-

вая упорядоченное движение (электрический ток). Этим объясняется высокая проводимость металлических материалов.

Ширина энергетических зон определяется видом материала и строением кристалла. Ширина запрещенной зоны меняется с изменением температуры. Это происходит по двум основным причинам:

- из-за изменения амплитуды тепловых колебаний атомов кристаллической решетки;

- из-за изменения межатомных расстояний, т. е. объема тела. При повышении температуры первая причина приводит к сужению запрещенной зоны, вторая может вызывать как ее сужение, так и расширение.

В полупроводниках и диэлектриках валентная зона и зона проводимости разделены запрещенной зоной E_g . При температуре абсолютного нуля валентная зона полностью заполнена электронами, свободных энергетических уровней нет. Электроны полностью заполненной валентной зоны не могут принимать участие в создании электрического тока – зона проводимости абсолютно свободна. Для создания электрического тока необходимо часть валентных электронов перебросить из валентной зоны в зону проводимости, но энергии электрического поля недостаточно для преодоления энергетического барьера E_g . Нужны дополнительные энергетические воздействия, например, нагрев, так как при комнатной температуре энергия валентных электронов за счет теплового движения составляет порядка 0,04 эВ, что значительно меньше ширины запрещенной зоны.

Различие между полупроводниками и диэлектриками заключается в ширине запрещенной зоны. Условно к полупроводникам относят вещества с запрещенной зоной $E_g < 3$ эВ. В полупроводниках переход электронов в зону проводимости может быть осуществлен путем тепловых, электромагнитных и иных воздействий, либо обеспечить проводимость с помощью атомов примеси.

В диэлектриках ширина запрещенной зоны настолько велика (E_g от 3 до 10 эВ), что энергии внешних возбуждающих воздействий недостаточно для перехода электронов в зону проводимости. Это означает, что электронная проводимость в них не играет определяющей роли.

При отсутствии в полупроводнике свободных электронов ($T = 0\text{К}$) приложенная к нему разность потенциалов не вызовет тока.

Если извне будет подведена энергия, достаточная для переброса электронов через запрещенную зону, то, став свободным, электрон сможет перемещаться под действием электрического поля, создавая электропроводность полупроводника.

В заполненной зоне, откуда ушел электрон, образуется незанятый уровень – дырка, а поэтому в полупроводнике начинается другое движение электронов, заполняющих образовавшуюся дырку, причем под воздействием электрического поля дырка двигается в направлении поля как эквивалентный положительный заряд, величиной $+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Процесс перехода электронов в свободное состояние сопровождается и обратным явлением, т. е. возвратом электронов в нормальное состояние. В результате в веществе при любой температуре наступает динамическое равновесие, т. е. количество электронов, переходящих в свободную зону, становится равным количеству электронов, возвращающихся обратно в нормальное состояние. С повышением температуры число свободных электронов в полупроводнике возрастает, а с понижением температуры до абсолютного нуля убывает вплоть до нуля. Энергию, необходимую для перевода электрона в свободное состояние или для образования дырки, может дать не только тепловое движение, но и другой источник энергии, например, поглощенная материалом энергия света, энергия потока электронов и ядерных частиц, энергия электрических и магнитных полей, механическая энергия и т. д. Увеличение числа свободных носителей заряда (электронов и дырок) под воздействием какого-либо вида энергии способствует повышению электропроводности, увеличению тока, появлению электродвижущих сил. Электрические свойства определяются условиями взаимодействия и расстоянием между атомами вещества. Так, например, углерод в виде алмаза является диэлектриком, а в виде графита он обладает большой проводимостью. Примеси и связанные с ними дефекты кристаллической решетки играют не менее существенную роль в электрических свойствах твердых тел.

1.3. Влияние агрегатного состояния на электрические свойства веществ

В природе существуют две разновидности твердых тел, различающиеся по своим свойствам, – кристаллические и аморфные. Кристаллические тела остаются твердыми, т. е. сохраняют приданную им форму до вполне определенной температуры, при которой они переходят в жидкое состояние. При охлаждении процесс идет в обратном направлении. Так, у чистых металлов переход из одного состояния в другое протекает при определенной температуре плавления (рис. 1.2).

Аморфные тела при нагревании размягчаются в большом температурном интервале, они становятся вязкими, а затем переходят в жидкое состояние.

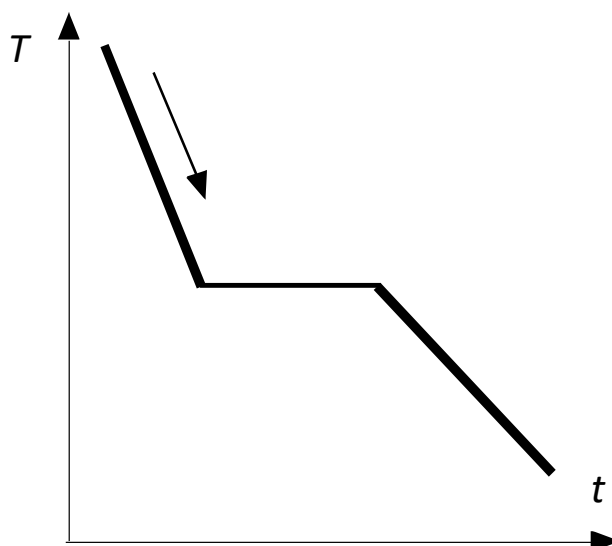


Рис. 1.2. Кривая охлаждения при кристаллизации металла:
 T – температура плавления; t – время процесса

При охлаждении процесс идет в обратном направлении. Кристаллическое состояние твердого тела более стабильно, чем аморфного. Аморфное состояние можно зафиксировать во многих органических и неорганических веществах ускоренным охлаждением из жидкого состояния. Однако при повторном нагреве, длительной выдержке при 20...25°C, а в некоторых случаях при деформации нестабиль-

ность аморфного твердого тела проявляется в частичном или полном переходе в кристаллическое состояние. Примерами такого перехода могут служить помутнение неорганических стекол при нагреве, частичная кристаллизация плавленого янтаря при нагреве.

Кристаллические тела, в отличие от аморфных, характеризуются упорядоченным расположением в пространстве частиц (ионов, атомов, молекул), из которых они составлены.

1.4. Особенности строения твердых тел

Свойства кристаллов зависят от электронного строения атомов и характера взаимодействия их в кристалле, пространственного расположения частиц, химического состава. Все эти детали строения кристаллов описывает понятие структуры. В зависимости от размеров структурных составляющих и методов их выявления используют следующие понятия: тонкая структура, микро- и макроструктура.

Тонкая структура описывает расположение частиц в кристалле и электронов в атоме; изучают ее дифракционными методами (рентгенография, электронография, нейтронография). Анализируя дифракционную картину, получаемую при взаимодействии атомов кристалла с короткими волнами ($\lambda = 10^{-10} \dots 10^{-12}$ м) рентгеновских лучей (или волн электронов, нейтронов), можно получить обширную информацию о строении кристаллов.

Большинство материалов состоит из мелких кристалликов (зерен). Наблюдать такие мелкие структурные составляющие – микроструктуру – можно с помощью оптического (до 10^{-7} м) или электронного (до $2 \cdot 10^{-10}$ м) микроскопа.

В кристалле частицы (ионы, атомы, молекулы), из которых построен кристалл, сближены до соприкосновения и располагаются различно, но закономерно по разным направлениям (рис. 1.3, *a*). Для упрощения пространственное изображение заменяют схемами (рис. 1.3, *б*), отмечая точками центры тяжести частиц. Кристаллы различаются симметрией расположения частиц.

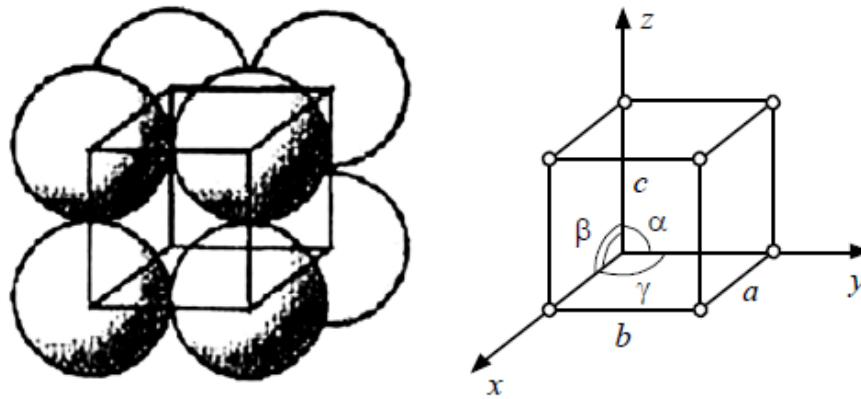


Рис. 1.3. Расположение частиц в кристалле:
a – пространственное изображение; *б* – схема

Если в кристалле провести три направления (x, y, z) , не лежащие в одной плоскости, то расстояния между частицами, расположенными по этим направлениям, в общем случае неодинаковы и соответственно равны a, b, c . Плоскости, параллельные координатным плоскостям, находящиеся на расстоянии a, b, c , разбивают кристалл на множество параллелепипедов, равных и параллельно ориентированных. Наименьший параллелепипед называют элементарной ячейкой. Последовательное перемещение его образует пространственную кристаллическую решетку. Вершины параллелепипеда называют узлами пространственной решетки. С этими узлами совпадают центры тяжести частиц, из которых построен кристалл. Для описания элементарной ячейки кристаллической решетки используют шесть величин: три отрезка, равные расстояниям a, b, c до ближайших частиц по осям координат, и три угла α, β, γ между этими отрезками (см. рис. 1.3).

Размер элементарной ячейки кристаллической решетки оценивают отрезки a, b, c . Их называют периодами решетки. По параллельным направлениям свойства одинаковы, поэтому достаточно указать для всего семейства параллельных прямых одно направление, проходящее через начало координат. Это даёт возможность задать направление прямой только одной точкой, так как другой всегда является начало координат. Такой точкой является узел кристаллической решетки, занимаемый частицей. Координаты этого узла выражают целыми числами, заключают в квадратные скобки и называют индексами направления. Отрицательное значение индекса обозначают знаком «минус» над ним (рис. 1.4, *a, б*).

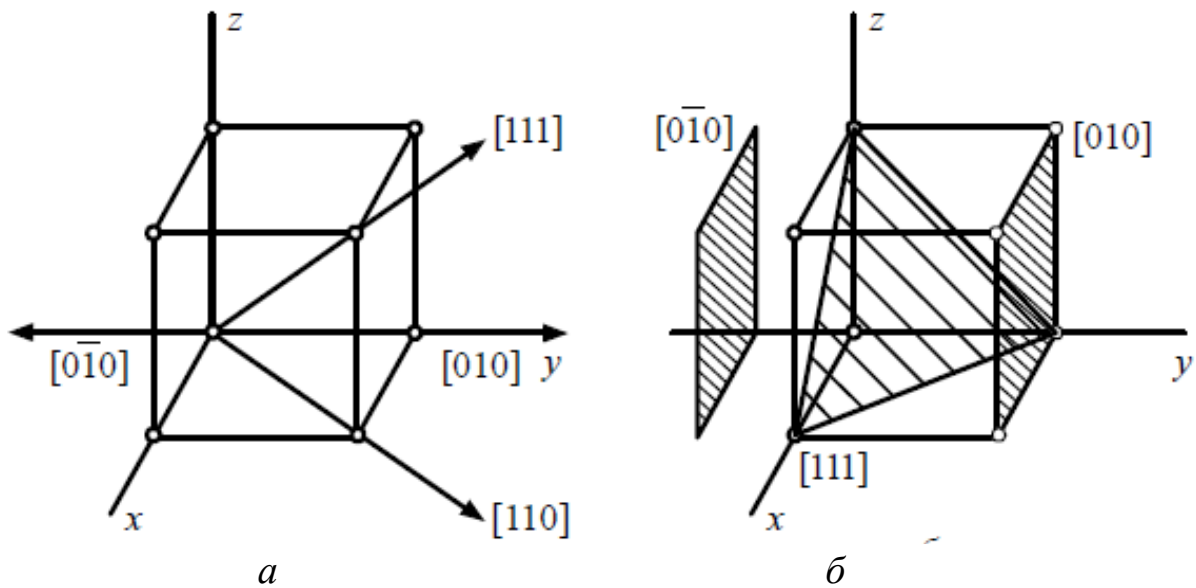


Рис. 1.4. Кристаллографические индексы направлений (а) и плоскостей (б)

Положение плоскости в пространстве определяется отрезками, отсекаемыми плоскостью по координатным осям. Эти отрезки выражают целыми числами m, n, p в единицах отрезков a, b, c . Принято за индексы плоскостей брать обратные отрезки: $h = 1/m; k = 1/n; l = 1/p$.

Три числа (h, k, l) , заключенные в круглые скобки, называют индексами плоскости. Если плоскость отсекает по осям отрицательные отрезки, то это отмечают знаком «минус» над соответствующим индексом.

Анизотропия – это зависимость свойств кристалла от направления, возникающая в результате упорядоченного расположения атомов (ионов, молекул) в пространстве. Свойства кристаллов определяются взаимодействием атомов. В кристалле расстояния между атомами в различных кристаллографических направлениях различны, а поэтому различны и свойства.

Анизотропия присуща многим свойствам кристаллов. Наиболее сильно она проявляется в кристаллах со структурами, обладающими малой симметрией. Анизотропия свойств проявляется при использовании монокристаллов, полученных искусственным путем. В природных условиях кристаллические тела – поликристаллы, т. е. состоят из множества мелких, различно ориентированных кристаллов. В этом случае анизотропии нет, так как среднестатистическое расстояние между атомами по всем направлениям оказывается примерно одина-

ковым. В связи с этим поликристаллические тела считают мнимоизотропными. В процессе обработки давлением поликристалла кристаллографические плоскости одного индекса в различных зернах могут ориентироваться параллельно. Такие поликристаллы называют текстурованными, и они, подобно монокристаллам, анизотропны.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятия «электротехнический материал».
2. Назовите классы материалов, применяемых в мехатронике.
3. Назовите три основных параметра, характеризующие электротехнические свойства материала.
4. Какова основная характеристика электропроводности материалов?
5. Какие Вам известны типы электропроводности?
6. Что такое «удельное электрическое сопротивление»?
7. Как связаны электрические и магнитные свойства со строением вещества и структурой материала?
8. Охарактеризуйте области применения материалов с особыми физическими свойствами.
9. Какие виды строения твердых тел Вы знаете?
10. Опишите зонное строение твердых тел.
11. В чем различие энергетических диаграмм для проводников, полупроводников и диэлектриков?
12. Объясните на основе зонной теории возникновение высокой электропроводности в проводниках.
13. Какие твердые тела относятся к кристаллическим?
14. В чём основное отличие аморфных тел?
15. Как строится кристаллическая решетка?
16. Назовите основные дефекты в строении кристаллических тел.
17. Определите роль дефектов кристаллической решётки в формировании свойств материала.
18. Что такое анизотропия?

Глава 2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Свойства и классификация проводниковых материалов

Проводниковые свойства проявляют металлы, металлические сплавы, графит (модификация углерода) и электролиты. Металлы относятся к проводникам с электронной проводимостью. В электролитах (растворы кислот, солей, щелочей) перенос электрических зарядов осуществляют ионы.

Проводниковые материалы обладают способностью проводить электрический ток и характеризуются весьма малым или заданным удельным электрическим сопротивлением ρ .

По агрегатному состоянию проводниковые материалы разделяют на:

1) *газообразные* – все газы и пары, в том числе и пары металлов. При достаточно малых значениях напряженности электрического поля E они являются диэлектриками и обладают очень высоким удельным электрическим сопротивлением ρ . Однако при напряженности электрического поля, которая обеспечивает начало ионизации, газ может стать проводником, в котором перенос электрических зарядов осуществляется электронами и ионами. Если в единице объема сильно ионизированного газа наступает равенство между числом электронов и положительных ионов, то такой газ представляет собой особую проводящую среду, называемую плазмой. Проводимость газов и паров используют в различных газоразрядных приборах.

2) *жидкие* – расплавы металлов и растворы (в частности, водные) и расплавы солей, кислот и других веществ с ионным строением молекул. Растворы и расплавы солей, кислот и щелочей, проводящие электрический ток, называют электролитами или проводниками второго рода. При прохождении электрического тока через электролит, в который погружены электроды, электрические заряды переносятся вместе с частицами молекул (ионами) электролита. На электродах происходит выделение веществ из раствора. Большинство металлов имеют высокую температуру плавления. Только ртуть и некоторые специальные сплавы (например, сплавы системы индий-галлий) могут

быть использованы в качестве жидких проводников при нормальной температуре. Электролиты используют в технологии изготовления различных элементов радиоэлектронных устройств.

3) *твёрдые* – металлы и сплавы. В Периодической системе химических элементов Д.И.Менделеева 75% элементов – металлы. В твёрдом состоянии металлы имеют кристаллическую структуру, для которой характерен особый вид металлической связи между атомами. При прохождении электрического тока через контакт различных металлов не происходит переноса вещества одного металла в другой, как это имеет место при прохождении тока в электролитах, поскольку перенос электрических зарядов осуществляется только электронами. Механизм прохождения электрического тока через твёрдые и жидкие металлы обусловлен направленным движением свободных электронов под воздействием электрического тока, который создается приложенным извне напряжением. Поэтому твёрдые и жидкие металлы называют проводниками с электронной (металлической) электропроводностью или проводниками первого рода.

По характеру применения в электронных приборах проводниковые материалы разделяют на материалы:

1) *высокой проводимости* (удельное электрическое сопротивление $\rho < 0,1$ мкОм·м). К ним относятся железо, медь, алюминий, золото, серебро и др., используют как основу в контактных материалах и припоях, для изготовления проводов, микропроводов, проводящих покрытий и пленок, различных токопроводящих деталей.

2) *с высоким сопротивлением* (удельное электрическое сопротивление $\rho > 0,3$ мкОм·м). Используют в качестве резистивных материалов и материалов для термопар. Наиболее известные: медно-марганцевые (манганины), медно-никелевые (константаны), сплавы железа, никеля и хрома (нихромы).

3) *сверхпроводники* – материалы, обладающие ничтожно малым удельным электрическим сопротивлением при очень низких температурах. Свойством сверхпроводимости обладают ртуть, алюминий, свинец, ниобий, соединения ниобия с оловом, титаном и др.

4) *нематаллические проводники* (уголь, графит, сажа, бороуглеродистые пленки, высокоионизированные газы).

2.1.1. Свойства проводниковых материалов

У проводниковых материалов различают следующие свойства:

а) *механические* свойства: прочность, твёрдость, упругость, вязкость, ударная вязкость, пластичность, хрупкость, усталость;

б) *технологические* свойства: ковкость, свариваемость, обрабатываемость резанием, жидкотекучесть, усадка и др. Технологические свойства определяются комплексом физико-химических свойств материала. Для определения свойств материала проводят соответствующие лабораторные испытания;

в) *физико-химические* свойства: цвет, плотность, температура плавления, теплопроводность, тепловое расширение, электропроводность, магнитные свойства, поглощение газов, коррозионная стойкость и др.

Физико-химические свойства оценивают:

1) *удельным электрическим сопротивлением* ρ , для образцов правильной формы $\rho = R \cdot S / l$, где R – сопротивление образца, Ом; S – площадь поперечного сечения образца, м²; l – длина образца, м. Величину ρ измеряют в Ом·м, однако для практических целей 1 Ом·м слишком большое значение, поэтому этот параметр чаще всего выражают в более мелких единицах: 1 Ом·м = 10⁶ мкОм·м = 10⁶ Ом·мм²/м (для серебра $\rho = 0.016$ мкОм·м.). Наличие примесей и дефектов в кристаллической решетке увеличивает ρ ;

2) *удельной электрической проводимостью* $\gamma = 1/\rho$, См/м. Зависит от температуры, чем выше температура, тем меньше проводимость;

3) *температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления* $\text{ТКС } \rho = (1/\rho) \cdot (\Delta\rho/\Delta T)$, 1/град, где $\Delta\rho$ – элементарное приращение сопротивления проводника, соответствующее элементарному приращению температуры ΔT . Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, выраженный в К⁻¹, обозначается $\alpha_\rho = (1/\rho) \cdot (\rho_1 - \rho_0)/(T_1 - T_0)$, где ρ_0 – удельное сопротивление при температуре T_0 , которую обычно принимают равной 20°C; ρ_1 – то же при температуре T_1 . Для металлов $\alpha_\rho = 9 \dots 65 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹ (ртуть...никель);

4) *коэффициентом теплопроводности*. Если через пластину площадью S и толщиной Δl за время t проходит тепловой поток энергии θ , то между поверхностями противоположных граней создаётся разность температур ΔT , связанная с θ соотношением $\theta = \lambda S \cdot \Delta T / \Delta l$.

Параметр λ называют коэффициентом теплопроводности проводников, который прямо пропорционален их удельной проводимости γ . Чем выше электропроводность металла, тем больше его теплопроводность. Поэтому теплоотводящие устройства, например, мощных резисторов, полупроводниковых приборов, изготавливают из металлов с высокой электропроводностью (медь, алюминий и сплавы на их основе).

2.1.2. Физическая природа электропроводности металлов

Металлы имеют кристаллическое строение: в узлах кристаллической решетки находятся положительно заряженные ионы, окруженные коллективизированными электронами (электронным газом).

Свободные электроны хаотически перемещаются по кристаллу со средней тепловой скоростью $u = 10^5$ м/с. В электрическом поле напряженностью E электроны получают добавочную скорость v упорядоченного движения – дрейфа, благодаря чему и возникает электрический ток. Плотность тока зависит от скорости дрейфа, заряда электрона e и концентрации свободных электронов n .

$$j = e \cdot n \cdot v.$$

Скорость дрейфа в реальных условиях существенно меньше скорости теплового движения электронов $v \ll u$. Так, в медном проводнике при плотности тока $j = 1$ А/мм² скорость дрейфа составляет $v = 1 \cdot 10^{-4}$ м/с.

За время τ между столкновениями с узлами кристаллической решетки на длине свободного пробега l , электроны, двигаясь с ускорением $a = e \cdot E / m_e$, приобретают скорость дрейфа $V = a \cdot \tau$.

Согласно принципа Паули, в каждом энергетическом состоянии может находиться только один электрон, а на каждом энергетическом уровне – не более двух (с антипараллельными спинами). Тогда, при температуре абсолютного нуля ($T = 0$ К) половина из общего числа свободных электронов в кристалле ($n/2$) займет наиболее низкие энергетические уровни.

В квантовой теории вероятность заполнения электронами энергетических состояний с энергией уровня \mathcal{E} определяется функцией

Ферми, определяющей максимальную энергию, которую может иметь электрон в металле при температуре абсолютного нуля.

Концентрация свободных электронов в чистых металлах, характер их распределения по энергиям и энергия Ферми с повышением температуры почти не изменяются. Например, при нагреве серебра от 0 до 1000 К энергия Ферми уменьшается лишь на 0,2%. Такие малые изменения в широком температурном диапазоне можно не учитывать. Поэтому электропроводность металла определяется, в основном, средней длиной свободного пробега электронов, которая зависит от электронного строения атомов и типа кристаллической решетки. Длина свободного пробега для некоторых металлов представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Длина свободного пробега электронов в некоторых металлах при 0 °С

Металл	Ag	Cu	Au	K	Na	Li	Fe	Ni
l, нм	57	42	41	37	35	11	22	13,3

Наибольшая длина свободного пробега наблюдается в металлах с гранцентрированной кубической кристаллической решеткой (Ag, Cu, Au), которые и являются лучшими проводниками.

Переходные металлы (Fe, Ni, Co, Cr, Mn, V, Zr, Nb, Mo, W, Hf, Ta, Re, Pt и др.) имеют меньшую электропроводность, что связано с их специфическим электронным строением. В этих элементах внутренние *d*- или *f*-оболочки не полностью заполнены электронами. В электрическом поле часть валентных электронов из внешней *s*-оболочки переходят на свободные уровни внутренних оболочек, что приводит к уменьшению числа свободных электронов, участвующих в проводимости.

Особенности электронного строения переходных металлов являются причиной многих их специфических свойств: тепловых, магнитных, склонности к полиморфизму, переменной валентности и др.

Таким образом, у чистых металлов при нагреве средняя энергия электронов практически остается без изменения, что свидетельствует о малой теплоемкости электронного газа.

2.1.3. Температурная зависимость удельного сопротивления металлов

Движение свободных электронов в проводнике в физике рассматривается в виде плоских электронных волн, длиной λ . Такая электронная волна распространяется в строго периодическом потенциальном поле без рассеяния энергии. Это означает, что в идеальном кристалле длина свободного пробега электронов равна бесконечности, а сопротивление электрическому току равно нулю.

Причинами рассеяния электронов в реальных металлах, создающего электрическое сопротивление, являются:

– тепловые колебания узлов кристаллической решетки (ρ_T – тепловая составляющая электрического сопротивления);

– примеси и дефекты структуры ($\rho_{ост}$ – составляющая ρ , обусловленная нетепловыми факторами).

Известно, что эффективное рассеяние энергии электронов происходит в том случае, если размер рассеивающих центров (дефектов) превышает $1/4$ длины волны. В металлах энергия электронов проводимости составляет $3 \dots 15$ эВ, этой энергии соответствует длина электронной волны $\lambda = 0,3 \dots 0,7$ нм. Поэтому любые микронеоднородности и несовершенства кристаллического строения вызывают снижение проводимости.

Итак, удельное сопротивление реальных металлов представляет собой сумму двух составляющих:

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}.$$

Относительное изменение удельного сопротивления металлов при изменении температуры характеризует *температурный коэффициент удельного сопротивления* α_ρ .

Металлы имеют положительное значение α_ρ , т.е. с ростом температуры ρ увеличивается, что связано с увеличением амплитуды тепловых колебаний узлов кристаллической решетки. Причем удельное сопротивление растет пропорционально температуре. Однако линейная зависимость $\rho(T)$ нарушается при низких температурах из-за снижения амплитуды и частоты тепловых колебаний атомов. Максимальная частота тепловых колебаний определяет характеристическую температуру – температуру Дебая ($\theta_D \approx 400$ К).

Температурная зависимость удельного сопротивления металлов приведена на рис. 2.1. В области сверхнизких температур, близких к абсолютному нулю, значение ρ практически не зависит от температуры (участок I) и определяется остаточным сопротивлением $\rho_{\text{ост}}$. В этой области у некоторых металлов наблюдается состояние сверхпроводимости ($T_{\text{св}}$ – критическая температура сверхпроводимости). В узкой переходной области II (до температуры θ_D) удельное сопротивление растет по степенной зависимости $\rho \sim T^n$. Экспериментально установлено, что линейная зависимость $\rho(T)$ справедлива от $T = 2/3 \theta_D$ и сохраняется у большинства металлов вплоть до температуры плавления. В области линейной зависимости (III) удельное электрическое сопротивление определяется по формуле

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_\rho (T - T_0)),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при начальной температуре (например, при комнатной $T_0 = 293$ К).

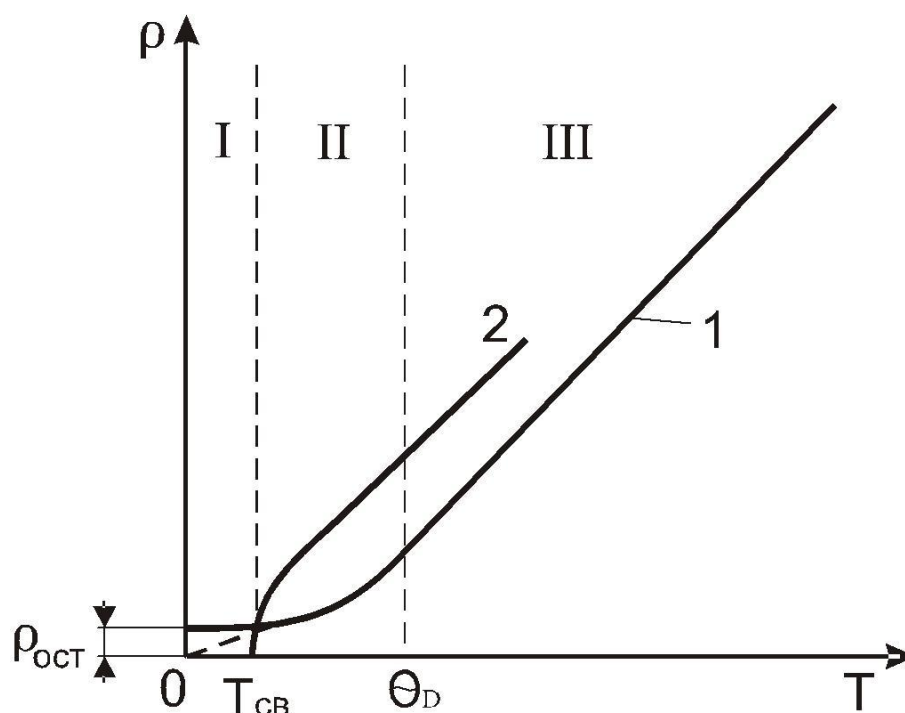


Рис. 2.1. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления металла (1) и сверхпроводника (2)

При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается резкое увеличение удельного сопротивления (в 1,5...2 раза), связанное с нарушением ближнего порядка в расположении атомов. Исключения составляют висмут, сурьма, галлий, объём которых при плавлении уменьшается, что сопровождается уменьшением удельного сопротивления.

В таблице 2.2 приведены основные характеристики некоторых металлов.

Таблица 2.2 – Значения характеристик некоторых металлов при 20 °С

Металл	Химич. символ	Плотность, г/см	Температура плавления, °С	ρ , мкОм м
1	2	3	4	5
Алюминий	Al	2,7	658	0,028
Барий	Ba	3,75	710	0,5
Бериллий	Be	1,84	1284	0,041
Ванадий	V	6,11	1900	0,241
Висмут	Bi	9,8	271	1,16
Вольфрам	W	19,3	3380	0,055
Галлий	Ga	5,92	30	0,560
Железо	Fe	7,87	1539	0,098
Золото	Au	19,3	1063	0,0225
Индий	In	7,3	156	0,090
Иридий	Ir	22,4	2410	0,054
Кадмий	Cd	8,65	321	0,076
Калий	K		64	0,069
Кобальт	Co	8,85	1500	0,064
Литий	Li		180	0,087
Магний	Mg	1,74	651	0,045
Марганец	Mn	7,44	1244	1,85
Медь	Cu	8,92	1083	0,017
Молибден	Mo	10,2	2620	0,05
Натрий	Na		98	0,046
Никель	Ni	8,96	1453	0,068
Ниобий	Nb	8,57	2500	0,15

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5
Олово	Sn	7,29	232	0,113
Осмий	Os	22,5	3000	0,095
Палладий	Pd	12,02	1550	0,108
Платина	Pt	21,45	1770	0,098
Рений	Re	21,02	3180	0,214
Родий	Rh	12,48	1970	0,043
Ртуть	Hg	13,5	-39	0,958
Рутений	Ru	12,4	2250	0,075
Свинец	Pb	11,34	327	0,19
Серебро	Ag	10,49	961	0,015
Стронций	Sr	2,63	770	0,227
Тантал	Ta	16,6	3000	0,124
Титан	Ti	4,52	1670	0,47
Торий	Th		1850	0,186
Хром	Cr	7,19	1900	0,13
Цинк	Zn	7,14	419	0,059
Цирконий	Zr	6,5	1855	0,41

2.1.4. Влияние примесей и дефектов структуры на удельное сопротивление металлов

Примеси вносят наиболее существенный вклад в величину остаточного сопротивления. Атомы любого примесного элемента повышают ρ , даже если сама примесь обладает большей электропроводностью.

Рассеяние электронов проводимости на атомах примеси тем сильнее, чем больше разница в валентности примесного элемента и металла – растворителя ΔZ : $\rho_{\text{ост}} \sim \Delta Z^2$. Так что металлоидные примеси на снижение проводимости оказывают более сильное влияние, чем металлические элементы.

Дефекты структуры – вакансии, атомы в междоузлии, дислокации, границы зерен и субзерен, прочие несовершенства кристаллического строения вносят определенный вклад в $\rho_{\text{ост}}$. Например, увели-

чение точечных дефектов в меди на 1 ат.% увеличивает $\rho_{\text{ост}}$ в среднем на 0,01 мкОм·м. Чем выше плотность дефектов, тем больше удельное сопротивление.

На удельное сопротивление металлических материалов влияет *термообработка*. Так, при *закалке* стали образуется неравновесная структура с большими искажениями кристаллической решетки и внутренними напряжениями. Плотность дефектов по всему объему кристалла резко возрастает, что приводит к значительному росту удельного сопротивления. При *отжиге* металлов и сплавов создается термодинамически устойчивая равновесная структура, внутренние напряжения исчезают, плотность дефектов уменьшается до минимума (в 2 раза и более), поэтому $\rho_{\text{ост}}$ резко снижается.

Пластическая деформация вызывает увеличение плотности дефектов и снижение проводимости. Для чистых металлов это снижение составляет несколько процентов, для них пластическую деформацию можно использовать как способ упрочнения без существенных потерь в электропроводности. Для металлических сплавов снижение электропроводности в результате наклепа может составлять до 25%. Для восстановления электропроводности после пластической деформации проводят рекристаллизационный отжиг.

2.1.5. Удельное сопротивление металлических сплавов

Электрическое сопротивление сплава всегда выше, чем сопротивление любого его компонента. Характер изменения электропроводности сплава зависит от фаз и структур в сплаве, что определяется диаграммой состояния.

В сплавах со структурой твердых растворов $\rho_{\text{ост}}$ может значительно превосходить тепловую составляющую $\rho_{\text{т}}$. Для большинства твердых растворов с неограниченной растворимостью (Au-Ag, Ag-Cu, Cu-Au и др.) изменение остаточного сопротивления в зависимости от состава сплава хорошо описывается параболической функцией в соответствии с законом Нордгейма (рис. 2.2):

$$\rho_{\text{ост}} = c \cdot x_{\text{A}} \cdot x_{\text{B}} = c \cdot x_{\text{A}}(1 - x_{\text{A}}),$$

где x_{A} , x_{B} - атомные доли компонентов в сплаве;
 c - постоянная, зависящая от природы сплава.

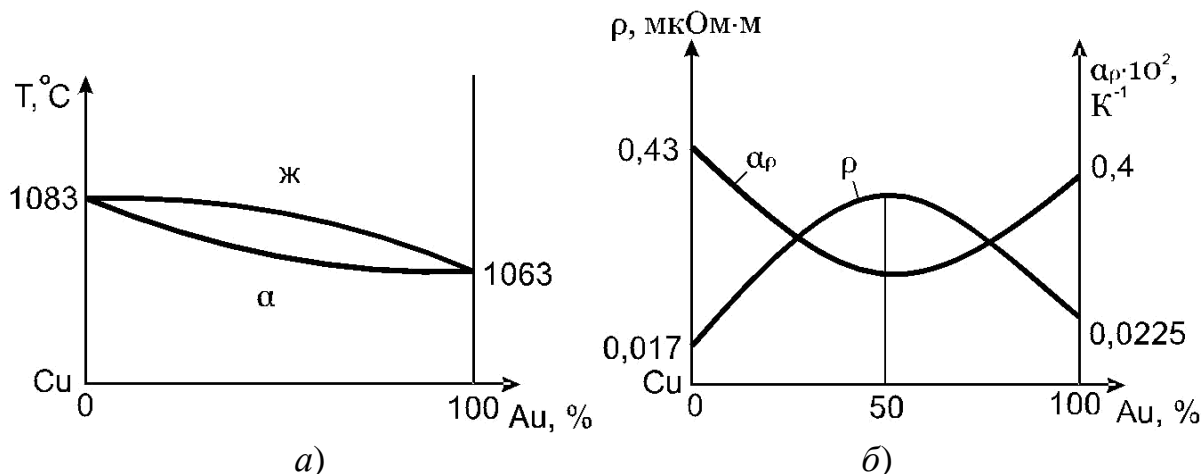


Рис. 2.2. Диаграмма состояния Cu-Au (а) и зависимости ρ и α_{ρ} от состава сплава (б)

Если ни один из компонентов не является переходным металлом, то ρ_{max} и $\alpha_{\rho\text{min}}$ соответствует 50%-ному соотношению компонентов $x_A = x_B = 0,5$. Если один из компонентов относится к металлам переходных групп, как, например, в сплавах Cu-Ni, то характер изменения ρ и α_{ρ} имеет некоторые особенности:

- ρ_{max} существенно выше, чем в системе с непереходными металлами, что связано с переходом части валентных электронов на незаполненные уровни внутренней d -оболочки переходного металла и уменьшением концентрации электронов проводимости;

- ρ_{max} и $\alpha_{\rho\text{min}}$ не соответствуют 50%-ному соотношению компонентов;

- α_{ρ} достигает в некоторых сплавах нулевых и даже отрицательных значений.

Сплавы со структурой твёрдых растворов используют как проводниковые материалы высокого удельного сопротивления для изготовления резисторов и нагревательных элементов.

В *сплавах с гетерофазной структурой* – при образовании эвтектик, эвтектоидов, включений вторичных фаз удельное сопротивление, согласно правилу Н.С.Курнакова, в первом приближении линейно изменяется с изменением состава сплава. Такие сплавы сохраняют высокую электрическую проводимость, близкую к проводимости чистых металлов, но по сравнению с чистыми металлами могут обладать более высокими механическими и технологическими свой-

ствами. Так, сплавы с выделениями дисперсных фаз имеют повышенную твердость, а эвтектические сплавы – высокую жидкотекучесть и литейные свойства. У многих сплавов часто наблюдаются отклонения от линейной зависимости ρ из-за структурной неоднородности.

При образовании в сплаве промежуточных фаз или химических соединений удельное сопротивление резко изменяется. Химические соединения с металлическим типом связи (интерметаллидные электронные соединения, фазы внедрения) достаточно электропроводны. При упорядоченном расположении атомов проводимость резко возрастает, так как восстанавливается периодичность кристаллической решетки и увеличивается длина свободного пробега электронов. В химических соединениях с ионной и ковалентной связью удельное сопротивление возрастает из-за дефектности структуры.

2.1.6. Сопротивление проводников на высоких частотах

При высоких частотах электрического тока наблюдается неравномерное распределение электрического тока по сечению проводника. Максимальная плотность тока имеет место на поверхности, затем она уменьшается вглубь проводника. Это получило название поверхностного эффекта, или скин-эффекта. Объясняется это действием на проводник своего же магнитного поля.

Изменение магнитного потока ведет к появлению ЭДС самоиндукции, которая имеет направление, противоположное току в проводнике, и тормозит его изменение согласно закону Ленца. Так как потокосцепление максимально в центре проводника, здесь же максимум ЭДС самоиндукции, что приводит к ослаблению тока в его центральных частях.

С увеличением частоты тока «вытеснение» его к поверхности увеличивается. Усиливает этот эффект увеличение магнитной проницаемости μ и удельной проводимости материала. Можно рассчитать плотность тока на глубине z по уравнению

$$j_z = J_0 \cdot e^{-z/\Delta},$$

где J_0 – плотность тока на поверхности; Δ – глубина проникновения поля в проводник. При высоких частотах плотность тока во

всех сечениях, кроме небольшого поверхностного слоя, практически равно нулю. В связи с этим R провода на переменном токе больше R провода на постоянном. Коэффициент увеличения сопротивления материала при скин-эффекте может достигать 1000 и более.

2.1.7. Сопротивление тонких металлических пленок. Размерный эффект

Металлические пленки широко используются в микроэлектронике. Их электрические свойства могут значительно отличаться от свойств объемного образца. Наряду с изменением структуры пленок очень сильно возрастает роль поверхностных процессов в них за счет вклада поверхностных атомов. С уменьшением толщины пленки могут возникнуть размерные эффекты. При сравнительной близости толщины пленки и длины свободного пробега электрона размерный эффект сказывается на электропроводности материала (рис. 2.3).

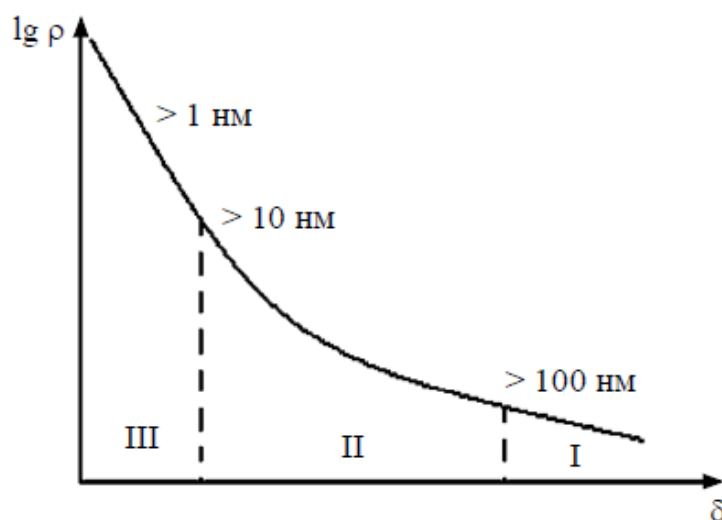


Рис. 2.3. Характер изменения удельного сопротивления металла от толщины его пленки:

область I соответствует $\delta = 0,1$ мкм и более;

область II — $\delta = 10^{-1} \dots 10^{-2}$ мкм;

область III ($\delta \sim 10^{-3}$ мкм) характеризуется отрицательным температурным коэффициентом удельного сопротивления

За счёт туннелирования электронов проводимость диэлектриков с ростом температуры может увеличиваться. Увеличению удельного

сопротивления способствует островковый характер пленок и размерный эффект. Его причина – в уменьшении возможной длины свободного пробега электронов вследствие их отражения от межфазной поверхности образца.

Поскольку характер зарождения и роста пленок зависит от множества факторов, то на практике удельное сопротивление слоев одинаковой толщины не совпадает. Поэтому для сравнительной оценки проводящих свойств тонких пленок пользуются параметром – сопротивлением ее квадрата (R_{\square}). R_{\square} численно равно сопротивлению участка пленки, длина которого равна ширине, при прохождении тока через две его противоположные грани параллельно поверхности подложки. Для определения R_{\square} образца пленки не требуется знание ρ или ее толщины пленки, хотя формально $R_{\square} = \rho\delta/\delta$.

В связи с этим электрическое сопротивление тонкой пленки может быть рассчитано по формуле:

$$R = R_0 \cdot l_0/d_0,$$

где l_0 – длина пленки; d_0 – ширина пленки.

Размерный эффект используется для изготовления прецизионных пленочных резисторов (500...1000 Ом/ \square) из вольфрама, молибдена, тантала, рения, хрома.

Металлические пленки, наносимые на диэлектрическую или полупроводниковую подложку, широко используются в микроэлектронике. По выполняемым функциям различают резистивные пленки (тонкопленочные резисторы) и высокопроводящие пленки (контактные площадки, межэлементные соединения, обкладки конденсаторов).

Методы получения тонких пленок:

- термическое испарение металла с последующей конденсацией на подложку;
- испарение электронным лучом;
- катодное или ионно-плазменное осаждение;
- эпитаксиальное наращивание.

Современные технологии позволяют получать пленки толщиной от десятых долей микрометра до нескольких десятков нанометров.

В зависимости от условий осаждения (конденсации) может сформироваться различная структура пленки от аморфного состояния до монокристаллического строения. Размерный и структурный факторы обуславливают существенные отличия электрических свойств тонких пленок от свойств объемных металлов. Особенно сильно проявляется размерный эффект в том случае, когда толщина пленки соизмерима с длиной свободного пробега электронов.

Вопросы для самопроверки

1. Какие материалы проявляют проводниковые свойства?
2. Приведите классификацию проводниковых материалов по агрегатному состоянию.
3. Как различают проводниковые материалы по характеру применения в электронных приборах?
4. Назовите механические свойства проводниковых материалов.
5. Назовите технологические свойства проводниковых материалов.
6. Назовите физико-химические свойства проводниковых материалов.
7. Какова физическая природа электропроводности металлов?
8. Какова температурная зависимость удельного сопротивления металлов?
9. Дайте определение температурного коэффициента удельного сопротивления металла.
10. Как влияют примеси на удельное сопротивление металлов?
11. Как влияют дефекты структуры на удельное сопротивление металлов?
12. От чего зависит характер изменения электропроводности сплава?
13. Что такое скин-эффект?
14. Как определяется сопротивление тонких металлических пленок?

2.2. Материалы высокой проводимости

К проводниковым материалам высокой проводимости относят материалы с величиной удельного сопротивления $\rho < 0,1$ мкОм·м. Они применяются для изготовления электрических проводов различного назначения, токоведущих деталей приборов, аппаратуры и электрических контактов.

Основные требования, предъявляемые к этим материалам:

- малое удельное сопротивление;
- достаточная прочность и пластичность;
- коррозионная стойкость в атмосферных условиях;
- способность подвергаться сварке и пайке.

Наиболее широко используются медь и ее сплавы, алюминий, используют также благородные и тугоплавкие металлы.

2.2.1. Проводниковая медь и её сплавы

Медь в электротехнике является самым распространенным проводящим материалом. Её применяют для изготовления проводов, кабелей, шин, токоведущих деталей приборов, анодов, обмоток трансформаторов, магнетронов, волноводов, резонаторов, для изготовления фольгированного диэлектрика – стеклотекстолита при производстве печатных плат.

Главное преимущество меди – малое удельное сопротивление (меньше только у серебра). Кроме того, для нее характерны следующие свойства:

- высокая механическая прочность;
- относительно высокая теплопроводность;
- удовлетворительная стойкость к коррозии;
- хорошая обрабатываемость (может быть изготовлена проволока толщиной в тысячные доли миллиметров);
- относительная легкость пайки и сварки.

Медь относится к группе цветных металлов, наиболее широко применяемых в промышленности. Порядковый номер меди в периодической системе Д. И. Менделеева – 29, атомный вес $A = 63,57$.

Удельный вес меди $\rho = 8,94 \text{ г/см}^3$, температура плавления – 1083 С. Чистая медь обладает высокой тепло- и электропроводностью. Удельное электрическое сопротивление меди $\rho = 0,0175 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Медь – немагнитный металл. Она обладает хорошей технологичностью: обрабатывается давлением, резанием, легко полируется, хорошо паяется и сваривается, имеет высокую коррозионную стойкость. Основная область применения – электротехническая промышленность.

Электропроводность меди существенно понижается при наличии даже очень небольшого количества примесей. Поэтому в качестве проводникового материала применяют в основном особо чистую медь *M00* (99,99 %), электролитическую медь *M0* (99,95 %), *M1* (99,9 %). Марки технической меди *M2* (99,7 %), *M3* (99,5 %), *M4* (99,0 %).

В зависимости от механических свойств различают *медь твердую*, нагартованную (*MT*) и *медь мягкую*, отожженную (*MM*).

Вредными примесями в меди являются висмут, свинец, сера и кислород. Действие висмута и свинца аналогично действию серы в стали; они образуют с медью легкоплавкие эвтектики, располагающиеся по границам зерен, что приводит к разрушению меди при её обработке давлением в горячем состоянии (температура плавления эвтектики соответственно 270 С и 326 С).

Сера и кислород снижают пластичность меди за счет образования хрупких химических соединений Cu_2O и Cu_2S .

В качестве конструкционного материала технически чистую медь применяют редко, так как она имеет низкие прочностные свойства, твёрдость. Основными конструкционными материалами на основе меди являются сплавы латуни и бронзы. Для маркировки медных сплавов используют следующее буквенное обозначение легирующих элементов:

О – олово; *Ц* – цинк; *Х* – хром;

Ж – железо; *Н* – никель; *С* – свинец;

К – кремний; *А* – алюминий; *Ф* – фосфор;

Мц – марганец; *Мг* – магний; *Б* – бериллий.

Краткие сведения из истории металлургии меди

Семь металлов принято считать доисторическими. Золото, серебро, медь, железо, олово, свинец и ртуть были известны людям с древнейших времен. Роль меди в становлении человеческой культуры особенна. Каменный век сменился медным, медный – бронзовым. Не везде этот процесс происходил одновременно. Коренное население Америки переходило от каменного века к медному в 16 веке, т.е. всего 400 лет назад. В Древнем Египте медный век наступил в 4 тысячелетии до нашей эры. Доказано, что знаменитая пирамида Хеопса выложена из камней, вытесанных инструментом из меди.

Подобно золоту и серебру медь способна образовывать самородки. Видимо, из них около 10000 лет назад были изготовлены первые металлические орудия труда. Распространению меди способствовали такие её свойства, как способность к свободной ковке и относительная простота выплавки из богатых руд.

«Медный век» длился около тысячи лет – вдвое меньше, чем бронзовый, наступивший после медного. Руда, из которой выплавляли медь египтяне, не содержала олова. Грекам повезло больше. Они добывали «оловянный камень» там же, где медную руду. Открытие оловянной бронзы произошло, видимо, случайно. Приятно удивили древних людей большие показатели твердости и прочности бронзы по отношению к меди. Достигается относительная легкоплавкость продукта (добавка 15% олова уменьшает температуру плавления меди с 1083 С до 960 С), что снижает требования к футеровке печей и уменьшает расход топлива для выплавки и литья слитков.

Искусство выплавки и обработки меди и бронзы от греков унаследовали римляне. Они получали медь из покоренных стран, в первую очередь из Галлии и Испании, продолжали начатую греками добычу медной руды на Крите и Кипре. Латинское название меди «*cuprum*» связывают с названием острова Кипр.

Существует мнение археологов, что в России медеплавильные производства созданы в 13 веке. Еще в 1213 г. недалеко от Архангельска найдено Цильменское месторождение медной руды. В 1479 г. в Москве уже существовала «пушечная изба» и делались бронзовые пушки разных калибров. В 16–17 в.в. Россия испытывала острую нужду в металлах, особенно в меди. Для «*сыску медных руды*» рус-

ские умельцы отправлялись на север, за Волгу, на Урал. При Петре I роль российской металлургии резко возрастает.

Ломоносов писал:

«...до трудов Петровых почти все получаемы были от окрестных народов, так что и военное оружие иногда у самих неприятелей нужда заставляла перекупать через другие руки дорогою ценою».

Петр I не раз высказывал мысль о замене серебряной разменной монеты медной. В 1700 г. в России появились медные деньги: «деньга» – ½ копейки, «полушка» – ¼ копейки, «полуполушка» – 1/8 копейки. В 1704 г. взамен серебряных копеек введены медные копейки.

Среди металлов по масштабам производства в наши дни медь уступает лишь железу и алюминию.

Сферы потребления

Как видно из структуры потребления меди в мировой экономике (рис. 2.4), наибольшим спросом пользуется электротехническая медь. На её производство расходуется более половины всего количества добываемого и перерабатываемого медного сырья.

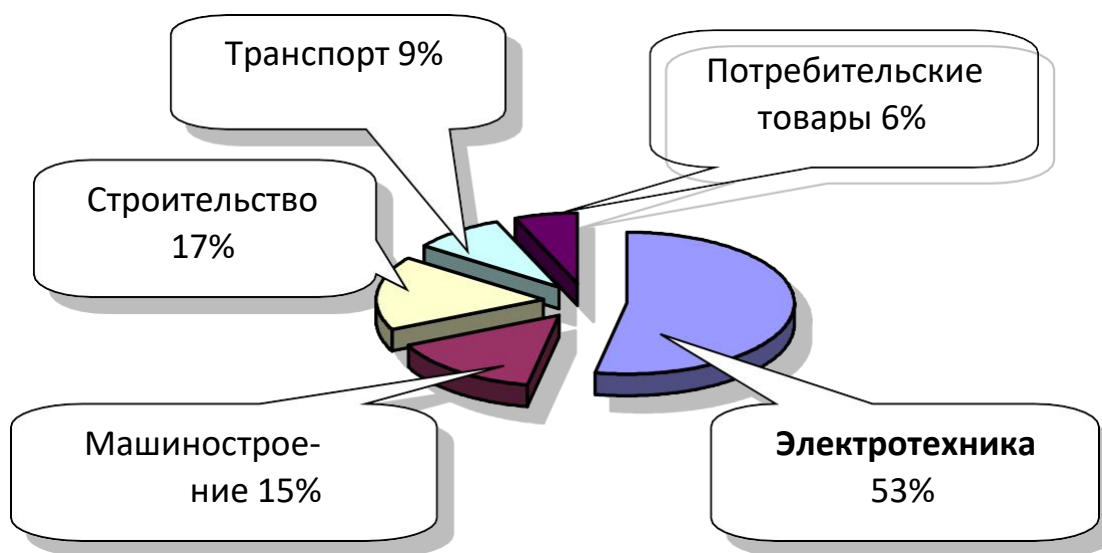


Рис. 2.4. Структура потребления меди в мировой экономике

На втором и третьем местах стоят строительство и общее машиностроение, где медь применяется, в основном, в виде сплавов конструкционного назначения, упрочненных легирующими добавками и

пластической деформацией. Например, за рубежом получили широкое распространение инженерные системы оборудования жилых, офисных и торговых помещений установками кондиционирования и водоснабжения на основе труб из меди и медных сплавов. На железнодорожном и муниципальном транспорте медь часто применяется в виде линий контактной подвески для электропоездов, троллейбусов и трамваев. И, наконец, в быту сплавы меди применяются в виде разнообразных украшений интерьера: бронзовые ручки дверей, светильники, подсвечники и др. Значительное количество меди в сплавах используется при изготовлении разменной монеты. В судостроении медные листы применяются для обшивки корпуса кораблей взамен стальных листов, что позволяет существенно повысить коррозионную стойкость корпуса судна.

Многие элементы улучшают отдельные свойства меди. Практически любые легирующие элементы повышают прочностные свойства меди, но выделяют группу элементов (цинк, олово, алюминий, фосфор и др.), которые это повышение делают особенно значимым (рис. 2.5).

Химический состав

Техническая медь обладает высокими значениями теплопроводности, электропроводности, коррозионной стойкости, что обусловило ее широкое применение в промышленности. Чистота меди, применяемой для технических целей, имеет большое значение. Примеси (даже в небольших количествах) резко снижают электрические свойства меди, делая порой невозможной ее обработку, ухудшая технологические и потребительские свойства. Именно поэтому содержание примесей жестко регламентируется стандартами, как отечественными, так и зарубежными.

Влияние *кислорода* в меди существенно, так как он мало растворим в меди в твердом состоянии. При кристаллизации кислород выделяется в виде эвтектики медь-закись меди, располагающейся по границам кристаллитов, при этом ощутимо ухудшаются технологические и коррозионные свойства металла. Рекристаллизация технической чистой деформированной меди происходит при 180...230 С, для бескислородной меди при величине зерна менее 8 мкм рекристаллизация протекает при комнатной температуре.

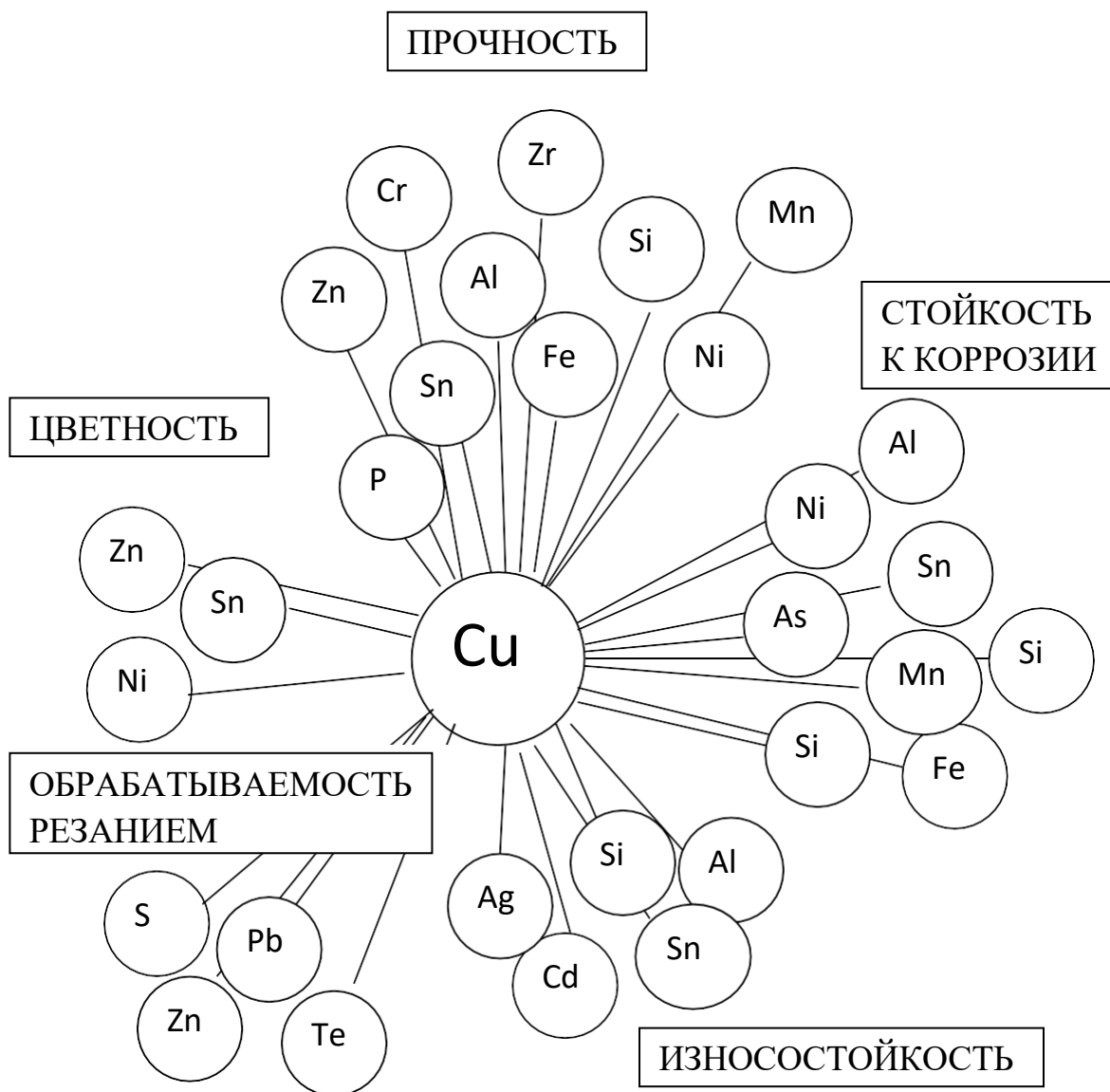


Рис. 2.5. Схема влияния легирующих элементов на свойства меди и медных сплавов

Водород особо разрушительное действие оказывает на медь, содержащую кислород. После отжига в водороде она делается хрупкой и растрескивается.

Сущность этого явления заключается в проникновении водорода в медь при повышенных температурах. Кислород закиси меди реагирует с проникшим водородом с образованием паров воды, которые, находясь под большим давлением, разрушают металл. Такое явление получило название «водородной болезни».

Фосфор ограниченно растворим в меди в твердом состоянии, он сильно понижает электропроводность и теплопроводность меди, но положительно влияет на ее механические свойства, повышает жидкотекучесть, поэтому многие марки меди предполагают наличие остаточного фосфора, который часто выступает в роли раскислителя при литье и сплавообразовании.

Медь, используемая для *электротехнических целей*, должна быть высокой чистоты, потому что примеси, изменяя микроструктуру, существенно изменяют также механические и электрические свойства. Степень воздействия примеси на электрическую проводимость зависит в значительной степени от содержания элемента.

Любая примесь уменьшает электропроводность меди (рис. 2.6). Бериллий, мышьяк, железо, кремний и фосфор, присутствующие в меди в долях процента, снижают ее удельную проводимость до 50% и более. Висмут и свинец в тысячных долях процента вызывают раскискивание при горячей обработке давлением (красноломкость) из-за образования легкоплавких эвтектик. Кислород с медью образует оксиды, что затрудняет пайку, лужение и повышает ρ . Водород вызывает хрупкость, образуя микротрещины.

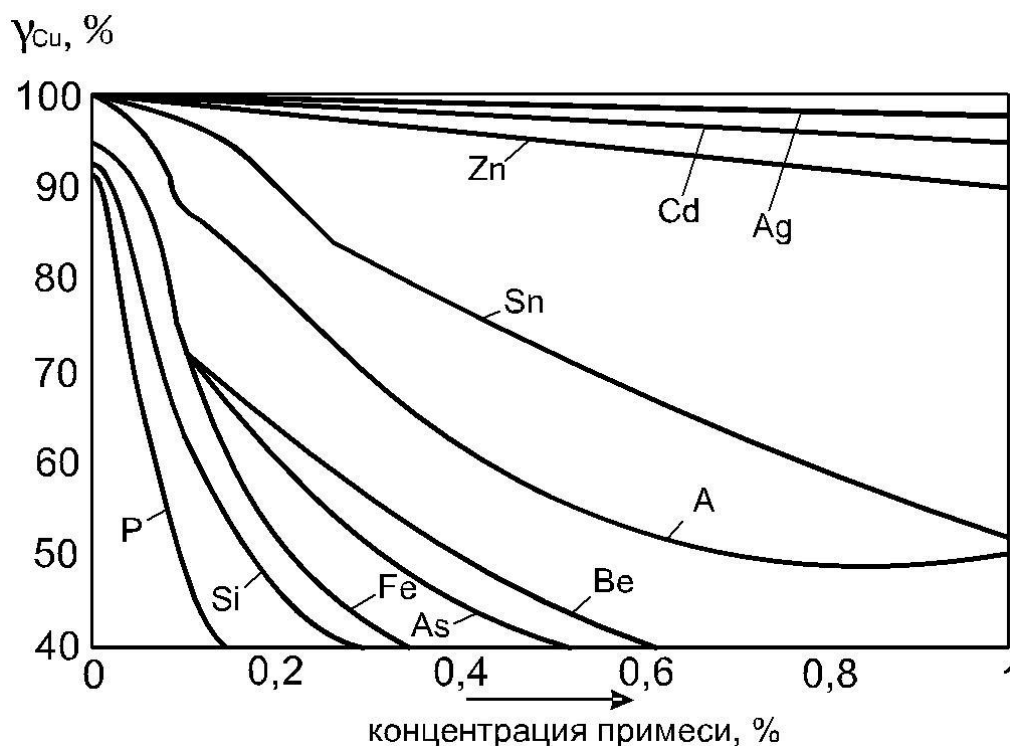


Рис. 2.6. Влияние примесей на удельную электропроводность меди

Для электротехнических целей используют *бескислородную* медь марки **М00** (не более 0,01% примесей), которую получают из электролитической меди переплавом в вакууме, а также медь марок **М0** (до 0,05% примесей) и **М1** (0,1% примесей).

Различают мягкую ММ ($\rho = 0,01754$ мкОм·м) и твёрдую МТ ($\rho = 0,0182$ мкОм·м) медь.

Мягкую отожженную медь применяют для проводов различного назначения, жил кабелей, шин распределительных устройств, обмоток трансформаторов, токоведущих деталей приборов, анодов в гальванопластике.

На воздухе медные провода окисляются медленно, покрываясь тонким слоем CuO , препятствующим дальнейшему окислению меди. Коррозию меди вызывают SO_2 , H_2S , NH_3 , NO , пары HNO_3 и другие реактивы.

Почти все изделия из проводниковой меди изготавливают путем проката, прессования и волочения. Так, волочением могут быть изготовлены провода диаметром до 0,005 мм, ленты толщиной до 0,1 мм и медная фольга толщиной до 0,008 мм.

Твёрдую медь используют, если необходимо обеспечить высокую прочность, твердость и износостойкость (неизолированные провода, коллекторные пластины электрических машин и др.). Из специальных электровакуумных сортов бескислородной меди изготавливают детали магнетронов, волноводов, резонаторов, приборов СВЧ.

Медь применяют в микроэлектронике в виде тонких проводящих пленок.

В целях повышения предела ползучести и термической устойчивости медь легируют серебром в пределах 0,07...0,15%, а также магнием, кадмием, цирконием, другими элементами.

Медь с присадкой серебра применяется для обмоток быстроходных и нагревостойких машин большой мощности, а медь, легированная различными элементами, используется в коллекторах и контактных кольцах сильно нагруженных машин.

Медь является дефицитным металлом, мало распространенным в природе ($4,7 \cdot 10^{-3}\%$). По возможности ее заменяют другими материалами.

Сплавы на основе меди

Наиболее распространенными медными сплавами являются *латуни* и *бронзы*, для которых характерно благоприятное сочетание механических свойств, коррозионной стойкости с достаточной электропроводностью (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Свойства медных сплавов

Марка сплава	Хим. состав	$\sigma_{в}$, МПа*	δ	ρ , мкОм
Л96	Cu + 4%Zn	270/400	35/6	0,040
Л62	Cu + 38%Zn	300/600	50/0,5	0,072
ЛС59-1	Cu + 40%Zn+ 1%Pb	350/440	25/5	0,080
ЛМц58-2	Cu + 40%Zn+ 2%Mn	380/600	30/3	0,108
БрОФ7-0,2	Cu + 7%Sn+ 0,2%P	250/400	30/15	0,140
БрКд1	Cu + 1%Cd	400/700	20/2	0,020
БрБ2	Cu + 2%Be	1350**	2**	0,065

* – в числителе – значение параметра в отожженном состоянии, в знаменателе – в твердотяннутом;

** – значения параметров после термообработки (закалка + старение).

Латуни - это сплавы меди с цинком (от 5 до 45 %). Латуни прочнее и дешевле чистой меди, более устойчивы к атмосферной коррозии, высокотехнологичны.

Латуни применяют либо после холодной обработки давлением, в этом случае они обладают высокой твердостью и прочностью, либо в отожженном состоянии, которому свойственна высокая пластичность.

Сплавы широко используются в электротехнике. Латуни, содержащие до 39% цинка, имеют однофазную структуру твердого раствора, обладают наибольшей пластичностью. Из них изготавливают детали горячей или холодной прокаткой и волочением: листы, ленты, проволоку. Без нагрева из листовой латуни методом глубокой вытяжки и штамповкой можно изготовить детали сложной конфигурации.

Латуни с содержанием цинка свыше 39% называют $\alpha+\beta$ -латунями или двухфазными и применяют, главным образом, для фасонных отливок. Двухфазные латуни являются более твердыми и

хрупкими и обрабатываются давлением только в горячем состоянии. Присадка к латуням олова, никеля и марганца повышает механические свойства и антикоррозионную устойчивость, а добавки алюминия в композиции с железом, никелем и марганцем сообщают латуням, кроме улучшения механических свойств и коррозионной стойкости, высокую твердость. Однако присутствие в латунях алюминия затрудняет пайку, а проведение пайки мягкими припоями становится практически невозможным.

Особенности:

– латуни с содержанием цинка до 12% называют томпаками, например, *Л90* (10% Zn), *Л96* (4% Zn). Для них характерна повышенная электро- и теплопроводность по сравнению с другими латунями, их применяют для изготовления радиаторных трубок;

– латуни марок *Л68* и *Л63* вследствие высокой пластичности хорошо штампуются и допускают гибку, легко паяются всеми видами припоев. В электромашиностроении широко используются для различных токоведущих частей, из них изготавливают изделия глубокой вытяжкой или штамповкой: манометрические трубки, гильзы, волноводы, платы приборов, крепежные изделия, детали штепсельных разъемов, выключателей;

– латуни марки *ЛС59-1* и *ЛМЦ58-2* применяются для изготовления роторных (беличьих) клеток электрических двигателей и для токоведущих деталей, изготовленных резанием и штамповкой в горячем состоянии; они хорошо паяются различными припоями, так, латунь *ЛС59-1* (автоматная латунь), содержащая кроме цинка 1% свинца, обладает антифрикционными свойствами, повышенной обрабатываемостью резанием благодаря ломкости стружки и высоким качеством поверхности, её применяют для изготовления точёных деталей приборов: шестеренок, втулок, подшипников;

– латунь с добавлением 1-2% марганца способствует повышению стойкости сплава к дуговому разряду. Поэтому латуни *ЛМц58-2*, *ЛЖМц59-1-1* применяют для штепсельных разъемов, зажимов, пружинящих контактов;

– латунь *ЛА67-2,5* пригодна для литых токоведущих деталей повышенной механической прочности и твердости, не требующих пайки мягкими припоями;

– латуни *ЛК80-3Л* и *ЛС59-1Л* широко используется для литых токоведущих деталей электрической аппаратуры, для щеткодержателей и для заливки роторов асинхронных двигателей. Хорошо воспринимают пайку различными припоями.

Бронзы - это сплавы меди с различными химическими элементами (оловом, алюминием, кремнием, кадмием, бериллием и т.д.).

Общая номенклатура бронз весьма обширна, но высокой электропроводностью обладают лишь немногие марки бронз.

Основные свойства бронз:

- высокие литейные свойства, жидкотекучесть;
- повышенная твердость и упругость;
- высокое сопротивление истиранию;
- антикоррозионные свойства: не требуют защитных мер от атмосферной коррозии;
- антифрикционные свойства.

Оловянные бронзы. Наиболее распространены и применяются, главным образом, в машиностроении. В качестве электротехнического материала для изготовления пружинных контактов, мембран применяют холоднодеформированную бронзу *БрОФ7-0,2*, содержащую 7% олова и 0,2% фосфора. Недостатком этого сплава является низкая электропроводность ($\gamma = 10...15\%$ от γ Cu).

Кадмиевая бронза БрКд1. Обладает наиболее высокой электропроводностью среди всех бронз ($\gamma = 95\%$ от γ Cu). Она прочнее отожженной меди в 3 раза. Кадмий повышает температуру рекристаллизации меди, поэтому провода из твердотянутой бронзы не теряют своей прочности до 250°C. Вследствие повышенного сопротивления истиранию и более высокой нагревостойкости эта бронза широко применяется для изготовления троллейных проводов и коллекторных пластин быстроходных машин, пружинных контактов, проводов повышенной прочности.

Хромистая бронза БрХ0,5 имеет высокую электропроводность ($\gamma = 85\%$ от γ Cu). Она обладает высокой износостойкостью и применяется для скользящих контактов.

Ценными свойствами обладает *бериллиевая бронза БрБ2*: высоким пределом упругости, твердостью, сопротивлением усталости и износу, высокой электропроводностью ($\gamma = 65\%$ от γ Cu). Она обладает высокими упругими свойствами, устойчивыми при нагревании до

250°C и электрической проводимостью в 2...2,5 раза большей, чем проводимость других марок бронз общего назначения. Эта бронза нашла широкое применение для изготовления различных пружинных деталей, выполняющих одновременно и роль проводника тока, например токоведущих пружин, отдельных видов щеткодержателей, скользящих контактов в различных приборах, штепсельных разъемов. Её применяют после термообработки, состоящей из закалки с температур 770...780°C и старения при 350...370°C. Бериллиевую бронзу применяют для изделий ответственного назначения, работающих в сложных условиях - при больших давлениях и температурах.

Фосфористая бронза обладает высокой прочностью и хорошими пружинными свойствами, но из-за малой электропроводности применяется для изготовления пружинных деталей с низкими плотностями тока.

Литые токоведущие детали изготавливаются из различных марок машиностроительных литевых бронз с проводимостью в пределах 8...15% проводимости чистой меди. Характерной особенностью бронз является малая усадка по сравнению с чугуном и сталью и высокие литейные свойства, поэтому они применяются для отливки различных токоведущих деталей сложной конфигурации, предназначенных для электрических машин и аппаратов.

2.2.2. Проводниковый алюминий и его свойства

Алюминий относится к группе легких металлов. Доступность, сравнительно большая проводимость, а также стойкость к атмосферной коррозии позволили широко применять алюминий в электротехнике.

Его широкое применение в электротехнике обусловлено следующими особенностями:

- высокой электропроводностью ($\rho = 0,028$ мкОм·м);
- доступностью сырья (содержание Al в земной коре 7,5%);
- низкой стоимостью (примерно в 3 раза дешевле меди);
- малым удельным весом: плотность алюминия составляет 2,7 г/см³, что почти в 3,5 раза ниже, чем у меди;
- высокой коррозионной стойкостью в водяном паре, пресной и морской воде;

- высокой пластичностью, позволяющей изготавливать проволоку различного сечения и фольгу толщиной до 6...7 мкм.

Технический алюминий получают путем электролиза глинозема, а алюминий высокой чистоты – дополнительной электролитической рафинировкой. Примеси, образующие с алюминием твердые растворы (Cu, Ag, Mg, Mn, V, Ti), снижают его удельную проводимость (на 5...10% при содержании примеси 0,5% по массе). Менее заметно влияют на электропроводность Ni, Si, Fe, Zn.

Алюминий по сравнению с медью имеет худшие механические свойства: так, его прочность на разрыв в 3 раза меньше, чем у меди. Алюминиевая проволока, применяемая в отожженном состоянии, имеет предел прочности 80...90 МПа и относительное удлинение 25...33%.

Алюминий — металл серебристо-белого цвета. Температура плавления алюминия 658...660°C, а температурный коэффициент расширения в 1,5 раза больше, чем у меди. Алюминий быстро покрывается тонкой пленкой окисла (Al_2O_3), которая надежно защищает металл от проникновения кислорода, поэтому голые (неизолированные) алюминиевые провода могут длительно работать на открытом воздухе. Оксидная пленка на алюминиевых проводах обладает значительным электрическим сопротивлением, поэтому в местах соединения алюминиевых проводов могут образовываться большие переходные сопротивления. Зачистку мест соединения алюминиевых проводов (шины) обычно производят под слоем вазелина во избежание окисления алюминия на воздухе. При увлажнении мест соединений алюминиевых проводов с проводами из других металлов (медных, железных и др.), полученных механическим способом (болтовые соединения и др.), могут образовываться гальванические пары (гальванические элементы) с заметной электродвижущей силой. При этом алюминиевый провод будет разрушаться местными токами. Чтобы избежать образования гальванических пар во влажной атмосфере, места соединений алюминиевых проводов с проводами из других металлов должны быть тщательно защищены от влаги (лакированием и другими способами).

Непосредственную коррозию алюминия вызывают окислы азота (NO), хлор (Cl), сернистый газ (SO_2), соляная и серная кислоты, щелочи и другие агенты. Надежные соединения алюминиевых проводов

друг с другом, а также с проводами из других металлов осуществляются с помощью холодной или горячей сварки.

Для электротехнических целей используют алюминий технической чистоты марки *AE* (0,5% примесей), алюминий высокой чистоты *A97* (0,03% примесей) и алюминий особой чистоты *A999* (0,001% примесей).

Чем выше химическая чистота алюминия, тем он лучше сопротивляется коррозии. Поэтому наиболее чистые сорта алюминия с содержанием чистого металла 99,95% и более идут для изготовления электродов в электролитических конденсаторах. Для изготовления алюминиевой фольги и обмоточных проводов малых диаметров (0,05...0,08 мм) применяют проводниковый алюминий с содержанием чистого металла не менее 99,7%. Для изготовления большинства проводниковых изделий (проволока, шины и др.) применяют алюминий с содержанием чистого металла не менее 99,5%.

Алюминиевая оксидная изоляция получила применение в электролитических конденсаторах, а также в различных катушках без дополнительной межвитковой и межслойной изоляции (пробивное напряжение до 100...250 В).

Пленки алюминия особой чистоты широко используют в микроэлектронике в качестве межэлементных соединений и контактов. Преимущество алюминия как контактного материала заключается в том, что он легко напыляется, обладает хорошей адгезией к кремнию и пленочной изоляции из двуокиси кремния SiO_2 .

Благодаря легкости, коррозионной стойкости и немагнитности технический алюминий идёт на изготовление деталей радиоаппаратуры и приборов, корпусов, стрелок, циферблатов и т.д.

Из проводникового алюминия изготавливают волочением и прокаткой проводниковые изделия – проволоку и шины. Алюминиевую проволоку выпускают трех марок *AM* (мягкая, отожженная), *АПТ* (полутвердая) и *AT* (твердая, неотожженная). Проволока выпускается диаметром от 0,08 до 10 мм. Изделия (проволока) из алюминия обладают удельным сопротивлением $\rho = 0,0279...0,0283$ мкОм·м. Алюминиевые шины нагартованные, с повышенной жесткостью, вызванной холодной прокаткой шин, выпускают толщиной от 3 до 12 мм и шириной от 10 до 120 мм, $\rho = 0,0289...0,0290$ мкОм·м.

Температурный коэффициент электрического сопротивления для всех сортов алюминия принимается равным $\alpha_p = 0,00423 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Поскольку удельное сопротивление алюминия в 1,68 раза больше удельного сопротивления меди, то при одинаковой длине сечение алюминиевого провода должно быть в 1,68 раза больше по сравнению с медным проводом при одной и той же величине общего сопротивления. Если же сравнить вес алюминиевого и медного проводов одной и той же длины и одинакового электрического сопротивления, то алюминиевый провод все же будет иметь меньший вес – почти в два раза по сравнению с медным проводом (см. таблицу 2.4).

Таблица 2.4 – Сравнительная характеристика Cu и Al проводников

Cu	Al
1	2
<i>1. Удельное электросопротивление (мкОм·м)</i>	
0,017	0,027
<i>2. Коэффициент теплопроводности (Вт/м·К)</i>	
406	218
<i>3. Температура плавления (°C)</i>	
1084	660
<i>4. Плотность (г/см³)</i>	
8,93	2,71
<i>5. Примеси, наиболее сильно уменьшающие электропроводность</i>	
Fe, P, Si, As, Ag	Ti, V, Mn
<i>6. Достоинства</i>	
<ul style="list-style-type: none"> – электро- и теплопроводность; – пластичность и прочность; – удовлетворительная паяемость. 	<ul style="list-style-type: none"> – плотность; – коррозионная стойкость (за счет оксида); – стоимость.
<i>7. Недостатки</i>	
<ul style="list-style-type: none"> – стоимость; – склонность к атмосферной коррозии; – водородная болезнь: $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 = 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$. 	<ul style="list-style-type: none"> – электрическая проводимость; – паяемость (за счет оксида); – механическая прочность.

1	2
<i>8. Примеры промышленных марок</i>	
M0 (0,05 мас. % примесей)	A999 (0,001 мас. % примесей) АЕ
M1 (0,1 мас. % примесей)	(0,5% мас. % примесей)
<i>9. Сплавы с повышенными механическими свойствами</i>	
<i>Бронзы</i> – сплавы меди с лигатурой содержанием до 10 % кадмиевая бронза (Cu+0,9% Cd) бериллиевая бронза (Cu+2,2% Be) <i>Латуни</i> – сплавы системы Cu+Zn Л68 (68% Cu + 32% Zn)	<i>Альдрей</i> (Al + Si (до 0,7 %) + Mg (до 0,5 %) + Fe (до 0,3%))
<i>10. Применение</i>	
– кабели в ответственных цепях; – обмотки; – трансформаторные индукторы; – детали магнетронов.	– кабели бытовых цепей; – кабели повышенной массы.

Алюминиевые провода соединяют друг с другом горячей и холодной сваркой, а также пайкой с применением специальных припоев и флюсов. Холодная сварка производится в специальных устройствах, в которых торцевые поверхности соединенных проводов соприкасаются друг с другом при удельном давлении 10000...12000 кГ/см². При этом происходит процесс проникновения (диффузия) кристаллов из одного провода в другой. В результате этого провода надежно соединяются друг с другом без нагрева (при комнатной температуре). Для заливки роторов специальных электродвигателей применяют сплавы алюминия с кремнием и цинком или с марганцем. Эти сплавы обладают повышенными значениями удельного сопротивления.

Для деталей приборов и электротехнических изделий, испытывающих существенные механические нагрузки, применяют алюминиевые сплавы повышенной прочности.

Дуралюмины – сплавы системы Al-Cu-Mg-Mn, характеризуются высокой прочностью и пластичностью. Достоинство: высокая удельная прочность (используется для изготовления корпусов радиоаппаратуры и приборов, в самолётостроении, кузова автомобилей). Недостаток: пониженная коррозионная стойкость.

Высокопрочные сплавы – сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu. Прочность этих сплавов достигает 700 МПа, но при меньшей пластичности, чем у дуралюминов.

Ковочные сплавы – дуралюмины, но с добавкой Si. Отличаются высокой пластичностью. С ростом содержания меди прочность сплавов увеличивается, а пластичность падает. Из этих сплавов штамповкой при 450...470°C получают детали самолётов и судов, детали двигателей внутреннего сгорания.

Силумины – сплавы системы Al-Si. Они обладают хорошими литейными свойствами, не склонны к образованию трещин и усадочных дефектов. Наиболее широко применяется сплав с 10...13% Si, обладающий высокой коррозионной стойкостью. Но его механические свойства не высоки и его часто заменяют силуминами с добавками Mg, Cu, Mn, Ti. Такие сплавы более прочны и тверды. Из силуминов получают корпуса приборов и редукторов, крышки и т.д.

Альдрей – сплавы системы Al-Cu-Si-Fe. Используются для изготовления проводов малонагруженных ЛЭП.

Магналий – сплав системы Al-Mg, отличается низкой плотностью, применяется для изготовления стрелок различных электротехнических приборов.

2.2.3. Проводниковые железо и сталь

В природе железо находится в различных соединениях с кислородом (FeO; Fe₂O₃ и др.). Выделить химически чистое железо из этих соединений чрезвычайно трудно. По электрическим и магнитным свойствам к химически чистому железу приближается железо, очищенное от примесей электролитическим способом (электролитическое железо). Общее количество примесей в электролитическом железе не превышает 0,03%.

Основными примесями в железе являются: кислород (O₂), азот (N₂); углерод (C), сера (S), фосфор (P), кремний (Si), марганец (Mn) и некоторые другие. Большинство примесей попадают в железо из руды и топлива. Кремний и марганец специально вводятся в железо в качестве раскислителей. Они легко соединяются с кислородом и образуют окислы, которые в расплавленном железе (стали) всплывают на поверхность в виде шлака и удаляются. Этим улучшают механические

свойства сталей, но, оставаясь в небольшом количестве в стали, они снижают ее электропроводность. Сера и фосфор – вредные примеси; попадая в железо и сталь из руды и топлива, они вызывают хрупкость сталей. Газы (азот и кислород) – тоже вредные примеси, так как они ухудшают электрические и магнитные свойства железа и сталей.

Примесью, резко снижающей электропроводность железа, является углерод. Сплавы железа с углеродом называются *сталями*. Кроме углерода, в сталях содержатся другие элементы, вводимые специально с целью получения тех или иных свойств (легирующие элементы).

Техническими сортами железа являются малоуглеродистые стали, содержание углерода в которых составляет от 0,01 до 0,1%. В конструкционных сталях углерод содержится в количестве от 0,07 до 0,7%, а в инструментальных и других специальных (легированных) сталях – от 0,7 до 1,7%.

Железо и сталь – наиболее дешевые и доступные проводниковые материалы, обладающие высокой механической прочностью при растяжении, но их применение ограничивается следующими недостатками. Железо и сталь имеют низкую коррозионную стойкость, т. е. они легко окисляются на воздухе – ржавеют. Кроме того, обладают повышенным удельным сопротивлением ($\rho = 0,13 \dots 0,14$ мкОм·м) по сравнению с медью и алюминием. Электрическое сопротивление у железа и стали на переменном токе сильно возрастает, поскольку железо и сталь являются магнитными материалами. Поэтому ток в большей степени вытесняется из средней части провода к его поверхности (поверхностный эффект).

Для снижения этого эффекта и величины электрического сопротивления переменному току стараются применять сталь с возможно меньшей величиной магнитной проницаемости.

Для изготовления стальной проволоки применяют сталь с содержанием углерода от 0,10 до 0,15%, обладающую следующими свойствами; плотностью $7,8$ г/см³; температурой плавления $1392 \dots 1400$ °С; пределом прочности при растяжении $55 \dots 70$ кГ/мм²; относительным удлинением 5%; удельным сопротивлением $\rho = 0,135 \dots 0,146$ мкОм·м и температурным коэффициентом сопротивления $\alpha_p = 0,0057$ 1/°С.

Для защиты от атмосферной коррозии стальные провода покрывают тонким слоем меди или цинка (0,016...0,020 мм).

Стальную проволоку и шины применяют также в качестве сердечников в биметаллических проводниках (рис. 2.7, а), обеспечивающих значительную экономию проводниковой меди.

Биметаллические проводники применяют в электрических аппаратах (рубильники, контакторы и др.).

Стальная оцинкованная проволока с большой механической прочностью при растяжении используется в качестве сердечников в сталеалюминиевых проводах (рис. 2.7, б) для повышения их механической прочности на разрыв.

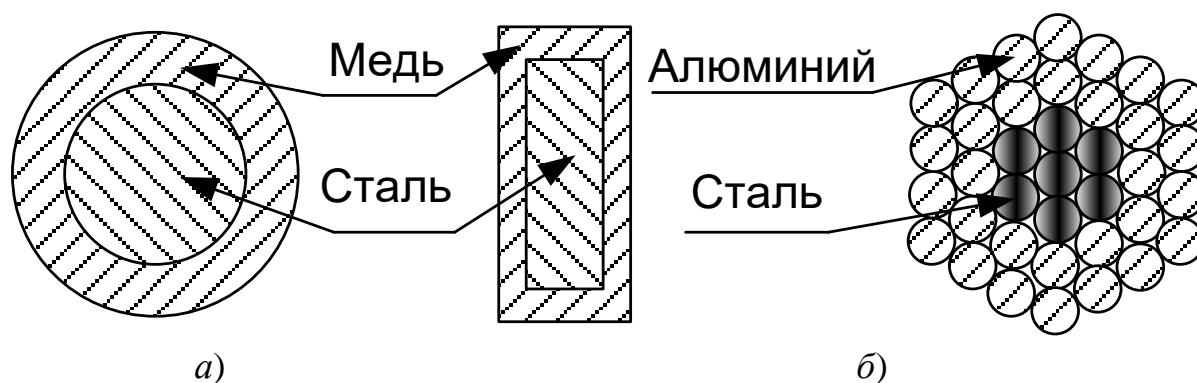


Рис. 2.7. Поперечное сечение провода:
а – биметаллического; б – сталеалюминиевого

Биметаллические проводники на основе стали не следует смешивать с термобиметаллическими проводниками, состоящими из двух металлов, с разными коэффициентами теплового расширения. Из термобиметаллических проводников изготавливают термодатчики, чувствительные к изменению контролируемой ими температуры.

2.2.4. Свинец и никель

Свинец — очень мягкий металл светло-серого цвета, обладающий высокой пластичностью и коррозионной стойкостью к многим реагентам (серной и соляной разбавленным кислотам, аммиаку и некоторым другим).

Благодаря большой пластичности, гибкости и сравнительно невысокой температуре плавления (327°C) свинец широко применяется для изготовления защитных оболочек электрических кабелей. Гибкая

свинцовая оболочка предохраняет кабель от проникновения в него влаги и других агентов, снижающих качество изоляции.

Свинец используется также для получения мягких оловянно-свинцовых припоев (марки ПОС-30, ПОС-40, ПОС-61 и др.), а также в производстве легкоплавких вставок предохранителей и пластин для кислотных аккумуляторов.

Характерным свойством свинца является поглощение им рентгеновских лучей, поэтому свинец применяют в качестве защитных экранов в рентгеновских установках.

Свинец имеет следующие характеристики: плотность $11,35 \text{ г/см}^3$, предел прочности при растяжении $0,8 \dots 2,3 \text{ кГ/см}^2$; относительное удлинение $30 \dots 40\%$; удельное сопротивление $\rho = 0,207 \dots 0,222 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$; температурный коэффициент сопротивления $\alpha_p = 0,00387 \dots 0,00411 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Свинец выпускается шести сортов, отличающихся между собой содержанием примесей (железа, меди, висмута, магния, мышьяка и др.). Недостатками свинца являются: слабая стойкость к вибрациям, что обусловлено его крупнокристаллическим строением, и низкая коррозионная стойкость по отношению к гниющим органическим веществам, а также к растворам извести, бетона и некоторым другим. Кабели со свинцовой оболочкой не рекомендуется прокладывать по эстакадам мостов, вблизи дорог и в других местах, где возможны сотрясения и вибрации, вызывающие разрушения свинца.

Чтобы повысить вибрационную стойкость и механическую прочность свинца, в него вводят различные присадки: сурьму, медь, кадмий и др.

Свинец, пары от расплавленного свинца и различные соединения свинца ядовиты. Работа с расплавленным свинцом должна производиться в специальных хорошо вентилируемых камерах. Свинец и его соединения (окись свинца PbO , свинцовый сурик Pb_3O_2 и др.) могут проникать внутрь организма через кожный покров при соприкосновениях со свинцовыми изделиями. Поэтому после работы со свинцом необходимо тщательно вымыть руки. Работать со свинцом рекомендуется в предохранительных перчатках.

Свинец является дефицитным металлом и в производстве кабелей он заменяется алюминием или синтетическими материалами (поливинилхлоридом, полиэтиленом), из которых изготавливают защитные оболочки кабелей.

Никель обладает хорошими механическими свойствами: прочностью, пластичностью, стоек к окислению. Применяется в электровакуумной технике в качестве электродов и конструктивных деталей ламп и приборов; для защиты декоративных покрытий изделий из железа. В микроэлектронике для формирования контактных площадок как защитный слой, для пайки и сварки внешних выводов микросхем. Удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,073$ мкОм·м. Температура плавления 1455°C ; температурный коэффициент удельного электрического сопротивления $\alpha_\rho = 4 \dots 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

2.2.5. Благородные металлы, применяемые в электротехнике

К благородным металлам относят серебро, золото, платину и металлы платиновой группы (платиноиды) – палладий, иридий, родий, осмий, рутений. Основное свойство благородных металлов – высокая коррозионная стойкость, обусловленная высоким значением электрохимического потенциала. Они практически не окисляются в атмосферных условиях при комнатной и повышенной температуре. Отличаются высокой пластичностью, но невысокой твердостью и прочностью (что можно повысить холодной пластической деформацией).

Благородные металлы встречаются в природе в виде самородков и в различных рудах, из которых путем переработки удается получить чистые металлы с содержанием примесей до тысячных долей процента. Большинство благородных металлов образуют между собой твердые растворы.

Обладая высокой коррозионной стойкостью и низким переходным сопротивлением, благородные металлы широко используются в качестве материалов для электрических контактов.

Платина

Платина – металл серебристо-белого цвета, значительно тяжелее меди, обладает наибольшим удельным сопротивлением среди всех благородных металлов ($\rho = 0,098$ мкОм·м) и низкой теплопроводностью. Основные характеристики мягкой (отожженной) платины следующие: температура плавления платины – $1773,5^\circ\text{C}$, плотность –

21,44 г/см³; предел прочности при растяжении – 15...16 кГ/мм²; относительное удлинение – 20%; температурный коэффициент сопротивления $\alpha_p = 0,00392$ 1/°С. Твердые сорта платины обладают следующими свойствами: предел прочности – 22...28 кГ/мм²; удлинение – 3...5%; $\rho = 0,108$ мкОм·м, $\alpha_p = 0,00396$ 1/°С.

Благодаря высокой пластичности платины из неё изготавливают фольгу толщиной до 0,005 мм (5 мкм) и проволоку диаметром до 0,001 мм, применяемую в качестве подвесов и струн в точных электроизмерительных приборах (электрометрах).

Платина является металлом, весьма устойчивым к воздействию различных химических реагентов. Она не растворяется в отдельных кислотах, а с царской водкой реагирует значительно слабее, чем золото.

Окисление платины на воздухе наблюдается, начиная от 540°С и выше. Введение в платину небольших количеств иридия Ir (3...6%) или родия Rh (5...12%) резко повышает стойкость платины к окислению при температурах 1000°С и выше.

Платиновая проволока применяется для изготовления электронагревательных элементов лабораторных печей. Для измерения высоких температур (до 1300°С) применяют термопары из платиновой и платинородиевой проволок. Из чистой платины, а главным образом её сплавов с иридием, родием и осмием, изготавливают контакты для выключающих аппаратов малой мощности (реле и др.).

Платина часто используется в виде сплавов. Наиболее распространены сплавы платины с иридием (Pt+3...6%Ir) и родием (Pt+5...12%Rh), обладающие более высокой твердостью и стойкостью к окислению до температуры 1000°С. Им свойственна высокая дугоустойчивость (в 2 раза выше, чем у других благородных металлов), они менее подвержены электроэрозии и свариванию. Эти сплавы применяют для термопар и особо ответственных прецизионных контактов в электроизмерительных приборах и радиоаппаратуре.

Металлы платиновой группы

Из других металлов платиновой группы наиболее широко применяется палладий (Pd), который по свойствам близок к платине, но в 4...5 раз дешевле её и в два раза легче. Стойкость к окислению по

сравнению с платиной ниже (металл тускнеет при температурах выше 350°C), обладает хорошими механическими свойствами: $\sigma_{\text{в}} = 200 \text{ МПа}$, $\delta = 40\%$.

Особенностью палладия является способность интенсивно поглощать водород (в более чем 850-кратном объеме по отношению к собственному объему). При последующем нагреве в вакууме поглощенный водород вновь выделяется. Это свойство используется для заполнения водородом газоразрядных приборов.

Палладий и его сплавы с серебром, золотом, иридием, медью, никелем применяют для прецизионных разрывных и скользящих контактов.

Остальные металлы платиновой группы: родий (Rh), иридий (Ir), рутений (Ru) и осмий (Os) используют в качестве легирующих элементов в контактных сплавах для повышения твердости. Из-за высокой стоимости контакты на основе металлов платиновой группы применяют в виде тонких покрытий на серебряном подслое.

Серебро

Серебро – металл с наиболее высокой тепло- и электропроводностью из всех проводниковых материалов ($\rho = 0,015 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$). Он является самым дешевым из благородных металлов, но дороже меди в 25 раз, его содержание в земной коре – $7 \cdot 10^{-6}\%$. Серебро тоже является благородным металлом, но окисление его на воздухе наблюдается при температурах от 250°C и выше. Серебро, как и платина, обладает высокой пластичностью, позволяющей получать из него тонкую фольгу и проволоку диаметром до 0,01 мм.

Основные характеристики проволоки из мягкого (отожжённого) серебра следующие: плотность серебра равна $10,5 \text{ г/см}^3$, а температура плавления $960,5^{\circ}\text{C}$; предел прочности при растяжении – $14 \dots 16 \text{ кГ/мм}^2$; относительное удлинение $\sigma_{\text{л}} = 45 \dots 50\%$; удельное сопротивление $\rho = 0,015 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, температурный коэффициент сопротивления $\alpha_{\rho} = 0,00428 \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. У проволоки из твердых сортов серебра предел прочности – $30 \dots 32 \text{ кГ/мм}^2$, $\sigma_{\text{л}} = 4 \dots 5\%$; $\rho = 0,016 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, $\alpha_{\rho} = 0,00365 \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$.

Проводниковое серебро в чистом виде и в сплавах с кадмием или с медью применяется как материал для электрических контактов

в электрических аппаратах (реле и др.). Серебро входит (как составная часть) в припой, дающие прочные соединения (марки серебряных припоев: ПСр-10; ПСр-25; ПСр-50 и др.).

Благодаря высокой электро- и теплопроводности серебро входит в состав многих контактных сплавов, от слаботочных до высоконагруженных контактов. Но чистому серебру свойственны низкая дуговая стойкость, значительная эрозия и свариваемость. Недостатком серебра является взаимодействие с сероводородом во влажном воздухе с образованием непроводящих пленок сульфида серебра Ag_2S . Поэтому серебро не следует применять рядом с материалами, содержащими серу: резиной, эбонитом и др.

Серебро используют в качестве электродов при изготовлении керамических и слюдяных конденсаторов, для покрытия изделий из меди и латуни (серебрение) с целью защиты от окисления и повышения проводимости.

Золото

Золото (Au) обладает высокими тепло- и электропроводностью ($\rho=0,0225$ мкОм·м) и существенно более высокой коррозионной стойкостью, чем серебро, не окисляется и не образует сернистых пленок. Золото отличается высокой пластичностью ($\delta \approx 40\%$), что позволяет проводить многократную обработку давлением, но имеет очень низкую твердость и прочность ($\sigma_{\text{в}} \approx 150$ МПа).

Золото применяют для прецизионных контактов, работающих при малых нажатиях и низком напряжении, без дугового режима, резонаторов СВЧ, внутренних поверхностей волноводов. Тонкие пленки золота применяются в качестве полупрозрачных электродов в фоторезисторах и полупроводниковых фотоэлементах, а также в качестве межсоединений и контактных площадок в пленочных микросхемах. Металл наносится на подложку вакуумным напылением на промежуточный адгезионный подслоя хрома, меди.

Значительно повышаются механические свойства золота при образовании сплавов. Чаще всего используют сплавы золота с никелем, платиной, упрочняемые закалкой со старением и сохраняющие высокие антикоррозионные свойства.

2.2.6. Тугоплавкие металлы

К тугоплавким относятся металлы с температурой плавления выше 1700°C : вольфрам, молибден, тантал, ниобий, хром, цирконий, рений. Чаще всего их получают методами порошковой металлургии с использованием электровакуумных технологий выплавки и очистки.

Применение тугоплавких металлов:

- изделия электровакуумной техники;
- нагревательные элементы;
- испарители в установках термического осаждения для получения тонких высокопроводящих и резистивных пленок;
- тонкопленочные резисторы;
- термопары для измерения высоких температур.

Все тугоплавкие металлы при нагревании на воздухе до температур выше 600°C интенсивно окисляются с образованием летучих оксидов. Поэтому в качестве нагревательных элементов они работают в вакууме или в защитной инертной среде, например в аргоне. Тугоплавкие металлы имеют ничтожно малое давление насыщенных паров – важное качество для материала испарителя при получении тонких пленок.

Из тугоплавких металлов наибольшее применение в электротехнике получили вольфрам и молибден.

Вольфрам – металл серого цвета, наиболее тугоплавкий из всех металлов ($T_{\text{пл}} = 3400^{\circ}\text{C}$), имеет высокую твердость, хорошую проводимость ($\rho = 0,055 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$).

Вольфрам получают методом порошковой металлургии, т. е. в результате спекания спрессованных частиц металла.

Для этого из частиц вольфрама (порошка) прессованием в стальных пресс-формах получают заготовки – стержни. Их затем подвергают спеканию при температуре 1300°C . У спечённых вольфрамовых стержней наблюдается еще зернистое строение и они обладают хрупкостью. Затем вольфрамовые стержни нагревают до температуры 3000°C .

Для получения механически прочного металла стержни подвергают многократной ковке и волочению с перемежающимися периодами отжига. В результате такой обработки вольфрам приобретает

волокнистое строение, обеспечивающее ему высокую механическую прочность и пластичность. Из вольфрама изготавливают проволоку диаметром до 0,01 мм. Окисление вольфрама на воздухе начинается при температуре от 400 °С и выше.

Благодаря большой твёрдости и износостойкости вольфрама из него изготавливают контакты для электрических аппаратов и приборов. Из вольфрама изготавливают нити ламп накаливания, электроды, пружины и другие детали электровакуумных приборов. В глубоком вакууме или в атмосфере инертного газа вольфрамовые детали могут работать при температурах до 2000°С.

Однако проволока и спирали из чистого вольфрама при высоких температурах становятся хрупкими вследствие процессов рекристаллизации, сопровождающихся интенсивным ростом зерна до размеров поперечного сечения проволоки. Для улучшения свойств чистого вольфрама в него вводят различные присадки. Оксид тория Th_2O_3 замедляет процесс рекристаллизации и препятствует росту зерна, добавки оксидов кремния SiO_2 и алюминия Al_2O_3 улучшают формоустойчивость вольфрамовой проволоки. В электровакуумном производстве применяют вольфрам марок *ВА* (с кремне-алюминиевой присадкой) и *ВТ* (с присадкой оксида тория).

Из вольфрама изготавливают катоды высокого напряжения мощных генераторных ламп, рентгеновских трубок с рабочей температурой 2200...2800 К. Вольфрамовые катоды обладают стабильной эмиссией электронов и способностью работать в высоком вакууме. Катоды из торированного вольфрама *ВТ* имеют более высокие эмиссионные свойства.

Вольфрам обладает наименьшим температурным коэффициентом линейного расширения среди всех чистых металлов, который не превышает $\alpha_l = 4,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Это свойство используется для изготовления термически стойких спаев вольфрама с тугоплавкими стеклами.

Вольфрам и его сплавы с молибденом, иридием, рением используют также для нагревательных элементов, работающих при температурах выше 1200°С, и для высокотемпературных термопар. Благодаря высокой твердости, дугостойкости, электроэрозионной стойкости и низкой свариваемости вольфрам широко используется в высоконагруженных разрывных контактах.

Молибден – металл серебристо-белого цвета, аналог вольфрама. Он отличается от вольфрама меньшей температурой плавления (2630°C) и несколько пониженной твердостью (250 кГ/мм^2). Как и вольфрам, молибден получают методом порошковой металлургии, т. е. в результате спекания (при 2300°C) заготовок из спрессованных частиц металла. Полученные молибденовые заготовки подвергают ковке и прокатке. По сравнению с вольфрамом молибден обладает большей пластичностью, но молибденовые заготовки большой толщины нельзя изгибать и штамповать при комнатной температуре во избежание их растрескивания. Для этих целей их нагревают до $120\dots160^{\circ}\text{C}$ в зависимости от его толщины. Окисление молибдена на воздухе начинается при температуре 500°C и выше.

Из молибдена изготавливают спирали накала, поддерживающие крючки, петли, катоды прямого накала и подогреватели катодов с косвенным накалом в электровакуумных приборах.

Вследствие тугоплавкости, большой твердости и малой испаряемости сплавы вольфрама с молибденом широко применяются для изготовления размыкающихся контактов в электрических аппаратах.

Большое практическое значение имеют сплавы вольфрама с молибденом, которые образуют структуру твердого раствора во всем диапазоне концентраций. Сплавы, содержащие $45\%\text{Mo}$, обладают максимальным удельным сопротивлением и твердостью, высокой эрозионной стойкостью. Их применяют для высоконагруженных контактов в защитной среде. W-Mo-сплавы используют также для нитей накаливания электроламп и катодов подогрева, так как они имеют более высокие механические свойства, чем чистый вольфрам, хотя и более низкие допустимые рабочие температуры.

Рений – редкий и тяжёлый металл с температурой плавления, близкой к температуре плавления вольфрама ($T_{\text{пл}} = 3180^{\circ}\text{C}$). Рений твердый и прочный, как вольфрам, и пластичный, как молибден, имеет высокое удельное сопротивление ($\rho = 0,214\text{ мкОм}\cdot\text{м}$), стоек к дуге постоянного тока. Рений часто применяют в сплавах для высоконагруженных разрывных контактов, например, сплавы $\text{W}+15\dots20\%\text{Re}$ отличаются повышенной износостойкостью.

Рений и его сплавы с вольфрамом применяют в производстве электровакуумных приборов взамен вольфрама, так как он меньше

испаряется в атмосфере водорода, отличается более длительным сроком службы. Re- и W-Re-сплавы используются для термопар до 2500...2800°C в защитной среде.

В радиоэлектронике рений применяют для защиты от коррозии и износа деталей из меди, вольфрама и молибдена. Тонкие пленки рения используются для прецизионных резисторов в интегральных схемах.

Тантал по тугоплавкости несколько уступает вольфраму ($T_{пл} = 3000^\circ\text{C}$), но значительно превосходит его по пластичности, что позволяет изготавливать фасонные детали, проволоку и фольгу толщиной до 10 мкм. Тантал образует на поверхности плотную оксидную пленку Ta_2O_5 , устойчивую до температуры 1500°C. Это свойство используется при производстве электролитических и тонкопленочных конденсаторов высокой удельной емкости, получаемых путем анодного оксидирования.

Тантал широко используется в электровакуумной технике для ответственных деталей: анодов и сеток генераторных ламп, катодов накаливания. Благодаря своей способности поглощать газы в диапазоне температур 600...1200°C, тантал применяют в вакуумной аппаратуре в качестве стабилизатора высокого вакуума (геттера). Тантал используется также в тонкопленочных технологиях при производстве резисторов. На воздухе происходит активное растворение азота в танталовой пленке с образованием нитридной пленки Ta_2N , обладающей высокой стабильностью свойств.

Ниобий – металл, близкий по свойствам к танталу, но более легкоплавкий ($T_{пл} = 2500^\circ\text{C}$), обладает высокой газопоглощающей способностью в температурном интервале 400...900°C. Поэтому в электровакуумных приборах детали из ниобия одновременно выполняют функции геттера. У ниобия среди всех тугоплавких металлов наименьшая работа выхода электронов, его применяют в качестве катодов накаливания в мощных генераторных лампах. Среди всех химических элементов ниобий обладает самой высокой критической температурой перехода в сверхпроводящее состояние ($T_{св} = 9,2 \text{ K}$). Поэтому ниобий, как и тантал ($T_{св} = 4,5 \text{ K}$), применяют в криогенной технике.

Хром обладает сравнительно невысокой температурой плавления ($T_{\text{пл}} = 1900^{\circ}\text{C}$) по сравнению с другими тугоплавкими металлами, но в противоположность остальным металлам этой группы является весьма распространенным в земной коре. Его отличительная особенность – высокая стойкость к окислению, поэтому хром используется для защитных покрытий изделий (хромирование), в том числе эксплуатируемых при повышенных температурах.

Хром обладает хорошей адгезионной способностью к стеклу, керамике, ситаллам и хорошо совместим с другими проводящими материалами. Поэтому технология осаждения тонких пленок хрома на подложку широко используется в микроэлектронике при изготовлении резисторов, адгезионных подслоев для контактных площадок и токопроводящих соединений.

2.2.7. Сверхпроводящие металлы и сплавы

Сверхпроводимость - это состояние вещества, характеризующееся отсутствием электрического сопротивления. Сверхпроводимость наблюдается у ряда металлов и сплавов при температурах, близких к абсолютному нулю. Температура перехода в сверхпроводящее состояние называется критической температурой сверхпроводимости – $T_{\text{св}}$.

2.2.7.1. Физическая природа сверхпроводимости

Впервые сверхпроводимость была обнаружена у ртути ($T_{\text{св}} = 4,2 \text{ K}$) голландским физиком Х. Каммерлинг-Оннесом в 1911 г.

Если в кольце из сверхпроводника индуцировать электрический ток (например, с помощью магнитного поля), то он не будет затухать в течение длительного времени. По скорости уменьшения магнитного поля наведенного тока в кольце была произведена оценка удельного сопротивления материалов в сверхпроводящем состоянии. Его значение составило около 10^{-26} Ом м , что в 10^{17} раз меньше сопротивления меди при комнатной температуре.

Явление сверхпроводимости можно понять и обосновать только с помощью квантовых представлений. Почти полвека с момента открытия сущность этого явления оставалась неразгаданной из-за того, что методы квантовой механики еще не в полной мере использова-

лись в физике твердого тела. Микроскопическая теория сверхпроводимости, объясняющая все опытные данные, была предложена в 1957 г. американскими учеными Бардиным, Купером и Шриффером (теория БКШ). Значительный вклад в развитие теории сверхпроводимости внесли работы советского академика Н. Н. Боголюбова.

Согласно установившимся представлениям, явление сверхпроводимости возникает в том случае, когда электроны в металле притягиваются друг к другу. Притяжение электронов возможно только в среде, содержащей положительно заряженные ионы, поле которых ослабляет силы кулоновского отталкивания между электронами. Притягиваться могут лишь те электроны, которые принимают участие в электропроводности, т.е. расположенные вблизи уровня Ферми. Если такое притяжение имеет место, то электроны с противоположным направлением импульса и спина связываются в пары, называемые куперовскими. В образовании куперовских пар решающую роль играют взаимодействие электронов с тепловыми колебаниями решетки – фононами. В твердом теле электроны могут как поглощать, так и порождать фононы. Мысленно представим себе следующий процесс: один из электронов, взаимодействуя с решеткой, переводит ее в возбужденное состояние и изменяет свой импульс; другой электрон, также взаимодействуя с решеткой, переводит ее в нормальное состояние и тоже изменяет свой импульс. В результате состояние решетки не изменяется, а электроны обмениваются квантами тепловой энергии – фононами.

Обменное фононное взаимодействие и вызывает силы притяжения между электронами, которые превосходят силы кулоновского отталкивания. Обмен фононами при участии решетки происходит непрерывно.

В упрощенном виде обменное фононное взаимодействие проиллюстрировано схемой на рис. 2.8.

Электрон, движущийся среди положительно заряженных ионов, поляризует решетку, т.е. электростатическими силами притягивает к себе ближайшие ионы. Благодаря такому смещению ионов в окрестности траектории электрона локально возрастает плотность положительного заряда.

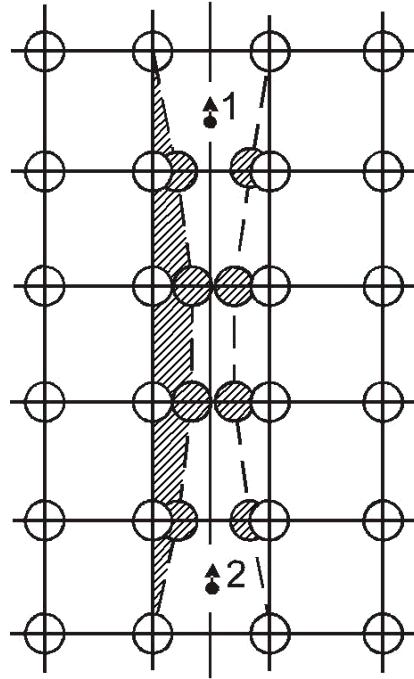


Рис. 2.8. Схема образования электронных пар в сверхпроводящем металле

Второй электрон, движущийся вслед за первым, естественно, может притягиваться областью с избыточным положительным зарядом. В результате косвенным образом, за счет взаимодействия с решеткой между электронами 1 и 2, возникают силы притяжения. Вторым электрон становится партнером первого – образуется куперовская пара. Поскольку силы притяжения невелики, спаренные электроны слабо локализованы в пространстве. Эффективный диаметр куперовской пары имеет порядок 10^{-7} м, т.е. охватывает тысячи элементарных ячеек. Эти парные образования перекрывают друг друга, постоянно распадаются и вновь создаются, но в целом все пары образуют электронный конденсат, энергия которого за счет внутреннего взаимодействия меньше, чем у совокупности разобценных нормальных электронов. Вследствие этого в энергетическом спектре сверхпроводника появляется энергетическая щель 2Δ – область запрещенных энергетических состояний (рис. 2.9).

Спаренные электроны располагаются на дне энергетической щели. Грубая оценка показывает, что количество таких электронов составляет около 10^{-4} от общего их числа. Размер энергетической щели зависит от температуры, достигая максимального значения при абсолютном нуле и полностью исчезая при $T = T_{св}$.

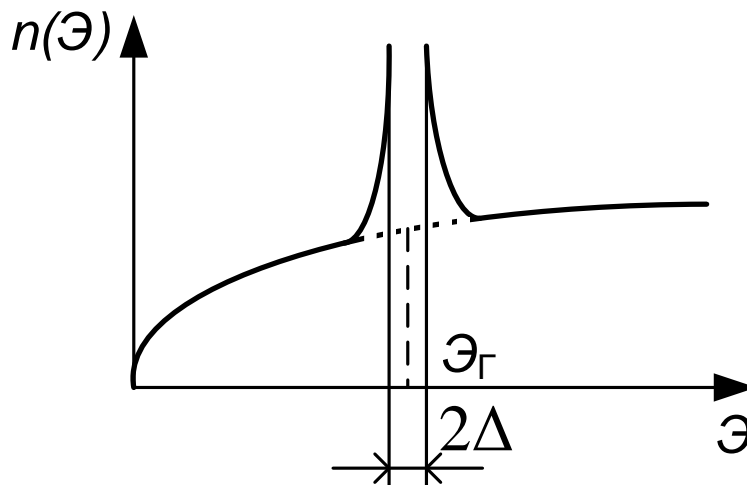


Рис. 2.9. Распределение электронов по энергиям в металле в состоянии сверхпроводимости

Как было показано, электрическое сопротивление металла обусловлено рассеянием электронов на тепловых колебаниях решетки и на примесях. Однако при наличии энергетической щели для перехода электронов из основного состояния в возбуждённое требуется достаточная порция тепловой энергии, которую при низких температурах электроны не могут получить от решетки, поскольку энергия тепловых колебаний меньше ширины щели. Именно поэтому спаренные электроны не рассеиваются на дефектах структуры. Особенностью куперовских пар является их импульсная упорядоченность, состоящая в том, что все пары имеют одинаковый импульс и не могут изменять свои состояния независимо друг от друга. Электронные волны, описывающие движение пар, имеют одинаковые длину и фазу. Фактически движение всех электронных пар можно рассматривать как распространение одной электронной волны, которая не рассеивается решеткой, «обтекает» дефекты структуры. Такая согласованность в поведении пар обусловлена высокой мобильностью электронного конденсата: непрерывно меняются наборы пар, происходит постоянная смена партнеров.

При абсолютном нуле все электроны, расположенные вблизи уровня Ферми, связаны в пары. С повышением температуры за счет тепловой энергии происходит разрыв некоторой части электронных пар, вследствие чего уменьшается ширина щели. Движение неспарен-

ных электронов, переходящих с основных уровней на возбужденные, затрудняется рассеянием на дефектах решетки. При температуре $T = T_{св}$ происходит полный разрыв всех пар, ширина щели обращается в нуль, сверхпроводимость исчезает.

Переход вещества в сверхпроводящее состояние при его охлаждении происходит в очень узком интервале температур (сотые доли градуса). Неоднородности структуры, создаваемые примесями, искажениями решетки, границами зерен, пластической деформацией и т.п., не приводят к уничтожению сверхпроводимости, а вызывают лишь расширение температурного интервала перехода из одного состояния в другое. Электроны, ответственные за создание сверхпроводимости, не обмениваются энергией с решеткой. Поэтому при температуре ниже критической наблюдается существенное уменьшение теплопроводности металлов (табл. 2.5).

Таблица 2.5 – Свойства сверхпроводников

Сверхпроводники	Критическая температура $T_{св}$, К
<i>Элементарные</i>	
Ir	0,14
Al	1,2
In	3,4
Sn	3,7
Hg	4,2
Ta	4,5
V	5,3
Pb	7,2
Nb	9,4
<i>Химические соединения</i>	
V₃Ga	14,8
V₃Si	17
Nb₃Sn	18,3
Nb₃Ga	20,3
Nb₃Ge	24,3

2.2.7.2. Магнитные свойства сверхпроводников

Важнейшая особенность сверхпроводников состоит в том, что внешнее магнитное поле совершенно не проникает в толщу образца, затухая в тончайшем слое. Силовые линии магнитного поля огибают сверхпроводник. Это явление, получившее название эффекта Мейснера, обусловлено тем, что в поверхностном слое сверхпроводника при его внесении в магнитное поле возникает круговой незатухающий ток, который полностью компенсирует внешнее поле в толще образца. Глубина, на которую проникает магнитное поле, обычно составляет $10^{-7} \dots 10^{-8}$ м. Таким образом, сверхпроводники по магнитным свойствам являются идеальными диамагнетиками с магнитной проницаемостью $\mu = 0$. Как всякие диамагнетики, сверхпроводники выталкиваются из магнитного поля. При этом эффект выталкивания выражен настолько сильно, что открываются возможности удерживать груз в пространстве с помощью магнитного поля. Аналогичным образом можно заставить висеть постоянный магнит над кольцом из сверхпроводящего материала, в котором циркулируют индуцированные магнитом незатухающие токи (опыт В. К. Аркадьева).

Состояние сверхпроводимости может быть разрушено, если напряженность магнитного поля превысит некоторое критическое значение $H_{св}$. По характеру перехода материала из сверхпроводящего состояния в состояние обычной электропроводности под действием магнитного поля различают *сверхпроводники I и II рода*. У сверхпроводников I рода этот переход происходит скачкообразно, как только напряженность поля достигнет критического значения. Сверхпроводники II рода переходят из одного состояния в другое постепенно; для них различают нижнюю $H_{св1}$ и верхнюю $H_{св2}$ критические напряженности поля. В интервале между ними материал находится в промежуточном гетерогенном состоянии, в котором сосуществуют нормальная и сверхпроводящая фазы. Соотношение между их объемами зависит от H . Таким образом, магнитное поле постепенно проникает в сверхпроводник II рода. Однако материал сохраняет нулевое сопротивление вплоть до верхней критической напряженности поля.

Сверхпроводимость может быть разрушена не только внешним магнитным полем, но и током, проходящим по сверхпроводнику, если он превышает некоторое критическое значение $I_{св}$.

2.2.7.3. Сверхпроводящие материалы

Явление сверхпроводимости при криогенных температурах достаточно широко распространено в природе. Сверхпроводимостью обладают 26 металлов. Большинство из них являются *сверхпроводниками I рода* с критическими температурами перехода ниже 4,2 К. В этом заключается одна из причин того, что большинство сверхпроводящих металлов для электротехнических целей применить не удаётся.

Еще 13 элементов проявляют сверхпроводящие свойства при высоких давлениях. Среди них такие полупроводники, как кремний, германий, селен, теллур, сурьма и др. Следует заметить, что сверхпроводимостью не обладают металлы, являющиеся наилучшими проводниками в нормальных условиях. К ним относятся золото, медь, серебро. Малое сопротивление этих материалов указывает на слабое взаимодействие электронов с решеткой. Такое слабое взаимодействие не создает вблизи абсолютного нуля достаточного межэлектронного притяжения, способного преодолеть кулоновское отталкивание. Поэтому и не происходит их переход в сверхпроводящее состояние. Кроме чистых металлов сверхпроводимостью обладают многие интерметаллические соединения и сплавы. Общее количество наименований известных в настоящее время сверхпроводников составляет около 2000. Среди них самыми высокими критическими параметрами обладают сплавы и соединения ниобия. Некоторые из них позволяют использовать для достижения сверхпроводящего состояния вместо жидкого гелия более дешевый хладагент – жидкий водород.

К *сверхпроводникам II рода* из чистых металлов можно отнести ниобий и ванадий. Из всех элементов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, самую высокую критическую температуру перехода имеет ниобий – 9,4 К. Все интерметаллические соединения и сплавы относятся к сверхпроводникам II рода. Наиболее высокими критическими параметрами (значениями температуры перехода, критической напряженности магнитного поля и допустимых токов) обладают сплавы и соединения ниобия. Например, по проволоке из стапнида ниобия Nb_3Sn в полях с индукцией примерно 10 Тл можно пропускать ток с плотностью выше 10^9 А/м² (10^3 А/мм²).

Однако деление веществ по их сверхпроводящим свойствам на два вида не является абсолютным. Любой сверхпроводник I-го рода

можно превратить в сверхпроводник II-го рода, если создать в нем достаточную концентрацию дефектов кристаллической решетки. Например, у чистого олова $T_{св} = 3,7$ К, но если вызвать в олове резко неоднородную механическую деформацию, то критическая температура возрастет до 9 К, а критическая напряженность магнитного поля увеличится в 70 раз.

В 1986 г. было обнаружено явление высокотемпературной сверхпроводимости, которой обладают некоторые виды керамики на основе редкоземельных металлов с характерным расположением атомов. Например, соединения лантана $La_{2-x}M_xCuO_4$ (где $M = Ba, Sr$) переходят в сверхпроводящее состояние при температуре, близкой к температуре жидкого азота. В сплавах иттрия $YBa_2Cu_3O_7$ переход в сверхпроводящее состояние происходит при температуре -173°C и выше.

Разрабатываются новые материалы, обладающие большей плотностью тока и более высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние. Перспективными в этом отношении являются так называемые висмутовые системы с химической формулой $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_2O_x$, температура перехода которых достигает -158°C .

Сверхпроводимость никогда не наблюдается в системах, в которых существует ферро- или антиферромагнетизм. Образованию сверхпроводящего состояния в полупроводниках и диэлектриках препятствует малая концентрация свободных электронов. Однако в материалах с большой диэлектрической проницаемостью силы кулоновского отталкивания между электронами в значительной мере ослаблены. Поэтому некоторые из них также проявляют свойства сверхпроводников при низких температурах. Примером может служить титанат стронция ($SrTiO_3$), относящийся к группе сегнетоэлектриков. Ряд полупроводников удается перевести в сверхпроводящее состояние добавкой большой концентрации легирующих примесей ($GeTe$, $SnTe$, CuS и др.).

В настоящее время промышленность выпускает широкий ассортимент сверхпроводящих проволок и лент для самых различных целей. Изготовление таких проводников связано с большими технологическими трудностями. Они обусловлены плохими механическими свойствами многих сверхпроводников, их низкой теплопроводностью и сложной структурой проводов. Особенно большой хрупкостью от-

личаются интерметаллические соединения с высокими критическими параметрами. Поэтому вместо простых проволок и лент приходится создавать композиции из двух (обычно сверхпроводник с медью) и даже нескольких металлов. Для получения многожильных проводов из хрупких интерметаллидов особенно перспективен бронзовый метод (или метод твердофазной диффузии), освоенный промышленностью. По этому методу прессованием и волочением создается композиция из тонких нитей ниобия в матрице из оловянной бронзы. При нагреве олово из бронзы диффундирует в ниобий, образуя на его поверхности тонкую сверхпроводящую пленку станнида ниобия Nb_3Sn . Такой жгут может изгибаться, но пленки остаются целыми.

2.2.7.4. Применение сверхпроводников

Сверхпроводящие элементы и устройства находят все более широкое применение в самых различных областях науки и техники. Разработаны крупномасштабные долгосрочные программы промышленного использования сильноточной сверхпроводимости.

Одно из главных применений сверхпроводников связано с получением сверхсильных магнитных полей. Сверхпроводящие соленоиды позволяют получать однородные магнитные поля напряженностью свыше 10^7 А/м в достаточно большой области пространства, в то время как пределом обычных электромагнитов с железными сердечниками являются напряженности порядка 10^6 А/м. К тому же в сверхпроводящих магнитных системах циркулирует незатухающий ток, поэтому не нужен внешний источник питания. Сильные магнитные поля необходимы при проведении научных исследований. Сверхпроводящие соленоиды позволяют в значительной мере уменьшить габариты и потребление энергии в синхротронах и других ускорителях элементарных частиц. Перспективно использование сверхпроводящих магнитных систем для удержания плазмы в реакторах управляемого термоядерного синтеза, в магнитогидродинамических (МГД) преобразователях тепловой энергии в электрическую, в качестве индуктивных накопителей энергии для покрытия пиковых мощностей в масштабах крупных энергосистем. Широкое развитие получают разработки электрических машин со сверхпроводящими обмотками возбуждения. Применение сверхпроводников позволяет исключить из

машин сердечники из электротехнической стали, благодаря чему уменьшаются в 5...7 раз их масса и габаритные размеры при сохранении мощности. Экономически обосновано создание сверхпроводящих трансформаторов, рассчитанных на высокий уровень мощности (десятки – сотни мегаватт). Большое внимание в разных странах уделяется разработке сверхпроводящих линий электропередач на постоянном и переменном токах. Разработаны опытные образцы импульсных сверхпроводящих катушек для питания плазменных пушек и систем накачки твердотельных лазеров. В радиотехнике начинают использовать сверхпроводящие объёмные резонаторы, обладающие, благодаря ничтожно малому электрическому сопротивлению, очень высокой добротностью. Принцип механического выталкивания сверхпроводников из магнитного поля положен в основу создания сверхскоростного железнодорожного транспорта на «магнитной подушке».

Нарушение сверхпроводимости материала внешним магнитным полем используется в конструкции прибора, который называют криотроном. На рис. 2.9 схематически изображено устройство пленочного криотрона. В условиях $T < T_k$ пленка из олова остается сверхпроводящей до тех пор, пока магнитное поле, создаваемое током, пропущенным через свинцовый сверхпроводник, не превысит критического для олова значения.

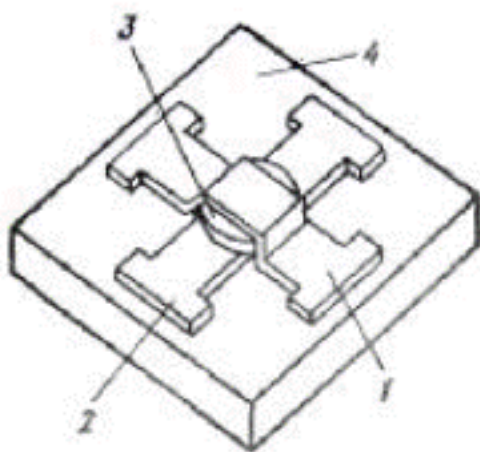


Рис. 2.10. Схема пленочного криотрона:

- 1 – управляющая пленка из свинца; 2 – вентильная пленка из олова;
- 3 – изоляционный слой; 4 – подложка

Широкие перспективы применения сверхпроводников открываются в измерительной технике. Дополняя возможности имеющихся измерительных средств, сверхпроводящие элементы позволяют регистрировать очень тонкие физические эффекты, измерять с высокой точностью и обрабатывать большое количество информации. На криотронных элементах можно выполнить ячейки вычислительных машин. Из криотронов можно собрать любую схему памяти или переключения. Два состояния с нулевым и конечным сопротивлениями естественно отождествить с позициями 0 и 1 в двоичной системе счисления. Достоинствами ячеек на пленочных криотронах являются высокое быстродействие, малые потери и чрезвычайная компактность. Уже сейчас на основе сверхпроводимости созданы высокочувствительные болометры для регистрации ИК-излучения, магнитометры для измерения слабых магнитных потоков, индикаторы сверхмалых напряжений и токов. Круг этих приборов непрерывно расширяется.

Открытие высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) послужило толчком к развитию нового направления в электроэнергетике. В настоящее время уже введены в эксплуатацию сверхпроводящие электрические кабели, рассчитанные на 13 кВ. Так, проект сверхпроводящего силового кабеля в г. Олбани, столице штата Нью-Йорк, в настоящее время является крупнейшим действующим проектом среди ВТСП силовых кабелей. Кабель конструкции «три–в–одном» (рис. 2.11) длиной 350 м изготовлен компанией Сумитомо (Япония) из сверхпроводника I рода производства той же компании. Кабель установлен 8 июля 2006 года на территории энергетической компании National Grid штата Нью-Йорк и соединяет две подстанции с напряжением 34,5 кВ. Это первый сверхпроводящий кабель в реальной сети, первый подземный кабель и первый сверхпроводящий кабель, имеющий промежуточную муфту.

Упрощенно сверхпроводящий кабель устроен так. В центре обычно находится пучок медных проводов диаметром около 20 миллиметров, который является несущим элементом. На этот элемент по окружности укладывают сверхпроводящие ленты (массовое производство таких лент организовано компанией *American Superconductor*). Они укладываются спиралью, скручиваются под углом.

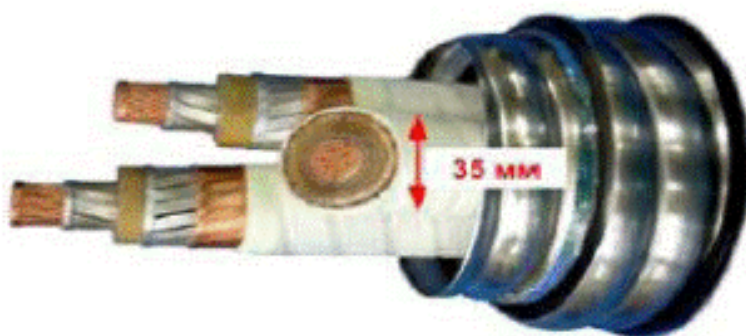


Рис. 2.11. Электрический кабель из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП)

Десятка два лент – это первый, так называемый, повив или слой. Поверх этого слоя укладывают второй слой сверхпроводящих лент с противоположным направлением скрутки. Затем накладывают изоляцию толщиной от 6 до 12 миллиметров. Далее кладется еще примерно такое же количество сверхпроводящих лент – это так называемый сверхпроводящий экран. Поверх – медный экран, это защита сверхпроводника. Этот кабель упаковывают в длинную гибкую трубу из гофрированной нержавеющей стали. Причем труба эта двойная – внутренняя обмотана так называемой суперизоляцией, и между двумя трубами откачан воздух – это так называемая высоковакуумная термоизоляция. По внутренней трубе прокачивают жидкий азот. Сверхпроводящий кабель помещается в этот криостат. Главная проблема – это надежность криогенной системы, которую создает жидкий азот и качает его по длинному кабелю.

2.2.8. Неметаллические проводники

2.2.8.1. Материалы на основе графита

Из неметаллических проводников наибольшее применение находят материалы на основе графита.

Графит представляет собой одну из полиморфных модификаций углерода с гексагональной слоистой кристаллической решеткой, что определяет сильную анизотропию физико-механических свойств и его невысокую прочность. Основными

свойствами графита, определяющими его применение как электротехнического материала, являются:

- малое удельное сопротивление ($\rho = 0,05 \dots 1,2$ мкОм·м);
- высокая теплопроводность;
- химическая стойкость во многих агрессивных средах;
- высокая нагревостойкость, обусловленная высокой температурой разложения ($T_{\text{пл}} = 3900^\circ\text{C}$);
- лёгкость механической обработки.

Для электротехнического применения используется как природный графит, так и синтезированные углеграфитные материалы.

Пиролитический графит получают путем термического разложения паров углеводородов (например, метана) в вакууме или в среде инертного газа при температуре 900°C . Плёнки пиролитического углерода широко используются для получения линейных резисторов поверхностного типа.

Электротехнический уголь – сырьем для его производства является графит, антрацит или сажа – мелкодисперсная разновидность углерода, получаемая как продукт неполного сгорания или термического разложения углеродосодержащих веществ. Для получения монолитного изделия измельченное в порошок углеродистое сырье смешивают со связующим (каменноугольной смолой или жидким стеклом), подвергают формованию и последующему обжигу при температурах $900 \dots 2500^\circ\text{C}$. При высоких температурах обжига (выше 2000°C) происходит графитизация – образование плотного поликристаллического графита. Изделия из электротехнического угля обладают достаточной прочностью, твердостью и допускают механическую обработку. Они могут эксплуатироваться в вакууме или в защитных средах при температурах до 2500°C . В зависимости от состава и технологии получения материалов их удельное сопротивление может изменяться в широких пределах (ρ от 0,05 до 60 мкОм·м).

Пиролитический графит и электротехнический уголь широко используются для изготовления электродов дуговых электрических печей и электролитических ванн, анодов гальванических элементов, нагревателей, экранов, лодочек, тиглей, кассет в полупроводниковой технологии и щеток электрических машин.

2.2.8.2. Композиционные проводящие материалы

Представляют собой механическую смесь проводящего наполнителя с диэлектрической связкой. Электрические свойства композитов зависят от состава и характера распределения компонентов. В качестве компонентов проводящей фазы используются металлы, графит, сажа, а роль связующего вещества выполняют как органические, так и неорганические диэлектрики.

Наиболее распространенными композитами являются контактолы и керметы.

Контактолы используются в качестве токопроводящих клеев, покрытий и эмалей. Они представляют собой маловязкие или пастообразные полимерные композиции. В качестве связующего вещества используются синтетические смолы (эпоксидные, кремнийорганические и т.п.), а токопроводящим наполнителем являются мелкодисперсные порошки металлов (серебра, никеля и др.). Вязкость контактолов регулируется добавлением растворителей, например, ацетона.

Контакт между частицами металла в композиции создается благодаря внутренним напряжениям, возникающим при отверждении в результате усадки из-за улетучивания растворителя и полимеризации связующего вещества. Эти внутренние напряжения приводят к появлению контактного давления между частицами наполнителя и резкому уменьшению контактных сопротивлений.

Контактол вязкой консистенции наносится на склеиваемую поверхность, растворитель улетучивается и происходит процесс полимеризации связующего (отверждение). В зависимости от типа контактола температура отверждения составляет от 20 до 200°C. В результате на поверхности образуется тонкая и плотная токопроводящая пленка, прочно связанная с материалом детали.

Большую роль в формировании контактов между частицами металлов в композиции играют внутренние напряжения, возникающие при отверждении в результате усадки из-за улетучивания растворителя и полимеризации связующего вещества. Внутренние напряжения приводят к появлению контактного давления между частицами наполнителя, что обуславливает резкое уменьшение контактных сопротивлений.

Контактолы используют для получения контактов между металлами, металлами и полупроводниками, создания электродов на диэлектриках, экранирования помещений и приборов от помех, для токопроводящих коммуникаций на диэлектрических подложках, в гибких волноводах и других изделиях электронной промышленности.

Серебросодержащие контактолы (К-8, К-12, К-13, К-17, К-20, К-21, К-22) обладают наиболее высокой электропроводностью (минимальное значение $\rho = 0,05$ мкОм·м), стабильностью свойств, высокой термостойкостью (до 250°C) и адгезионной прочностью (прочностью на отрыв) до $\sigma_{отр} = 18...25$ МПа. Их применяют в микроэлектронике для склеивания поверхностей меди, серебра со стеклами и керамикой при создании коммутационных слоев и монтаже элементов гибридных схем.

Палладиевые контактолы (КП-1, КП-2) уступают серебросодержащим по проводимости (ρ от 10 до 100 мкОм·м), но имеют преимущество по спектру склеиваемых материалов – металлов (Ag, Au, Pt, Pd, Cu, Ni, Al) со многими диэлектриками и некоторыми полупроводниками.

Никелевые контактолы (КН-1, КН-6) отличаются высокой адгезионной прочностью ($\sigma_{отр}$ до 50 МПа) и длительным сроком службы. Они применяются при монтаже микросхем, креплении кварцевых элементов в пьезодатчиках, создании экранирующих покрытий на пенопластах и т.д.

Медные контактолы (КМ-1, КМ-2) применяются как заменители дорогостоящих серебросодержащих контактолов.

Керметами называют металлодиэлектрические композиции с неорганическим связующим. Они предназначены для изготовления тонкопленочных резисторов. Существенным преимуществом керметных пленок является возможность варьирования их удельным сопротивлением в широких пределах. Наибольшее распространение получила микрокомпозиция Cr-SiO, тонкие пленки которой изготавливают методом термического испарения и конденсации в вакууме ее последующей термообработкой для стабилизации свойств. При термообработке за счет взаимодействия компонентов происходит вытеснение окисной прослойки между зернами с образованием фазы Cr₃Si. В результате сопротивление изоляционных прослоек между зернами заменяется сопротивлением контактирования.

В толстопленочных микросхемах используют резисторы, получаемые на основе композиции стекла с палладием и серебром. Для этой цели стекло размалывают в порошок до размера зерен 3...55 мкм, смешивают с порошком серебра и палладия, вспомогательной органической связкой и растворителем. Получаемую пасту наносят на керамическую подложку и спекают в обычной атмосфере. Удельное сопротивление пленок зависит от процентного содержания проводящих компонентов и режима спекания.

2.2.8.3. Проводящие материалы на основе окислов

подавляющее большинство чистых окислов металлов в нормальных условиях является хорошими диэлектриками. Однако при неполном окислении (при нарушении стехиометрического состава за счет образования кислородных вакансий), а также при введении некоторых примесей проводимость окислов резко повышается. Такие материалы можно использовать и в качестве контактных и резистивных слоев. Наибольший практический интерес в этом плане представляет двуокись олова SnO_2 . В радиоэлектронике она используется преимущественно в виде тонких пленок. Такие пленки получают различными способами: термическим вакуумным испарением и конденсацией с последующим отжигом на воздухе, окислением пленок металлического олова, осажденного на диэлектрическую подложку, реактивным катодным или ионно-плазменным распылением и др. Окисные пленки SnO_2 отличаются очень сильным сцеплением с керамической или стеклянной подложкой. Прочность сцепления достигает 20 МПа, что намного больше, чем у металлических пленок. Удельное сопротивление пленок зависит от степени нарушения стехиометрического состава и может составлять 0,1 мкОм·м. Нагрев пленок из SnO_2 выше 240°C приводит к необратимому изменению сопротивления в результате более полного окисления. Вместе с тем пленки устойчивы ко многим химическим средам – разрушаются только плавиковой кислотой и кипящей щелочью. Тонкие слои двуокиси олова обладают ценным оптическим свойством – высокой прозрачностью в видимой и инфракрасной частях спектра. Собственное поглощение пленок SnO_2 толщиной до 2 мкм в видимой части спектра не превышает 3%.

Сочетание высокой оптической прозрачности и повышенной электрической проводимости пленок двуокиси олова обуславливает применение их в качестве проводящих покрытий на внутренних стенках стеклянных баллонов электровакуумных приборов, электродов электролюминесцентных конденсаторов и жидкокристаллических индикаторов, передающих телевизионных трубок, преобразователей и усилителей изображения и др.

Кроме двуокиси олова, высокой электрической проводимостью и прозрачностью в видимой области спектра обладают пленки окиси индия In_2O_3 . Они имеют аналогичное применение.

2.2.9. Материалы для электрических контактов

Требования, предъявляемые к материалам контактных соединений:

- высокая электропроводность и теплопроводность;
- стойкость против коррозии;
- стойкость против образования пленок с высоким сопротивлением;
- малая твердость материала, для уменьшения силы нажатия;
- высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях;
- малая эрозия;
- высокая дугостойкость (температура плавления);
- высокое значение тока и напряжения, необходимые для дугообразования;
- простота обработки и низкая стоимость.

Перечисленные требования противоречивы, и почти невозможно найти материал, который удовлетворял бы всем этим требованиям.

Электрические контакты по условиям работы делятся на три типа: разрывные, скользящие, неподвижные.

2.2.9.1. Разрывные контакты

Подвижные латунные, серебряные, никелированные и медные контакты в процессе эксплуатации замыкаются, соединяясь друг с другом, или размыкаются, разъединяясь при помощи электромеханического либо механического привода, и при этом все устройства остаются крепко скреплены между собой.

Разрывные контакты являются наиболее нагруженными элементами электрической цепи. Они испытывают различные виды износа: электрический, химический и механический. Электрический износ связан с возникновением электрических разрядов (дуги), искрением, оплавлением, испарением и переносом металла с одного контакта на другой. Совокупность этих явлений называется *эрозией*. Электроэрозийное изнашивание выражается в изменении формы контактов, образовании кратера (впадины) на одном контакте и иглы (выступа) на другом, что может привести к свариванию и спеканию контактов. *Спекание* – соединение контактов металлическим мостиком при пробое оксидной пленки из-за недостаточных контактных давлений для её разрушения.

Химический износ – это коррозионный износ в результате химического взаимодействия с окружающей средой. Коррозия сопровождается образованием непроводящих пленок на контактных поверхностях, что может вызвать частичное или полное нарушение проводимости контактов.

Механический износ контактов от механических воздействий проявляется в их истирании, деформации и растрескивании.

К разрывным контактам предъявляются следующие требования:

– устойчивость против коррозии, для чего необходим высокий электродный потенциал, малое химическое сродство к компонентам среды, низкая прочность оксидных пленок;

– высокая дугостойкость, стойкость к свариванию и электрической эрозии, что обеспечивается высокой температурой плавления, высокой твердостью и износостойкостью;

– высокая электро- и теплопроводность.

В зависимости от электрической мощности различают слаботочные (малонагруженные), средне- и высоконагруженные контакты.

Слаботочные разрывные контакты используются в прецизион-

ных реле систем автоматики, управления, связи, сигнализации, радиоэлектронной аппаратуре, контрольно-измерительных приборах и др. Они работают при слабых токах (до 1А) и низких контактных давлениях. Основные требования к ним: высокая коррозионная стойкость (недопустимо образование оксидных пленок на рабочих поверхностях контактов) и низкое переходное сопротивление.

Применяемые материалы: золото, серебро, платина, палладий их сплавы (Ag-Au, Au-Pt, Ag-Pd, Pt-Ir, Pt-Ph, Pd-Ir, Au-Ni, Au-Ag-Ni, Au-Pd-Ni). Благородные металлы (кроме Ag) применяют обычно в виде тонких гальванических покрытий, нанесенных на медь, латунь, хром и др. Осажденные слои более стойки к электроэрозии и намного тверже соответствующих металлов. В сплавах Ag-Au, Ag-Pd при 50%-ном соотношении компонентов твердость максимальна, а эрозия минимальна.

Средненагруженные контакты работают в реле различного назначения, магнитных пускателях, стартерах, средненагруженных контакторах, преобразователях тока, сигнальной аппаратуре на ж/д транспорте, бытовых приборах.

Применяемые материалы: медь и её сплавы, вольфрам, Ag-Ni, Ag-Cd, Ag-Cu, Ag-Pd, Pd-Cu, Ag-Pd-Ni, Cu-Cd и др. Сплавы Ag-Cd, Cu-Cd отличаются высокой электропроводностью, повышенной твердостью, дугостойкостью, электроэрозионной стойкостью, сопротивлением свариванию и равномерным износом. Высокой стойкостью против сваривания и электроэрозии обладают сплавы Ag-Cu. Вольфрамовые контакты обладают наибольшей дугостойкостью и меньше всего подвержены электроэрозии, свариванию и износу.

Высоконагруженные контакты работают в особо тяжелых условиях: при больших токах, напряжениях и контактных нагрузках. Для них характерны интенсивный износ, оплавление и сваривание. Применяются тугоплавкие металлы (W, Mo) и их сплавы, либо металлокерамические композиции. Металлокерамические контакты изготавливают прессованием металлических порошков с последующим спеканием или пропиткой спрессованной тугоплавкой основы легкоплавкими компонентами. Используются композиции на основе вольфрамового или молибденового порошка, пропитанного жидким серебром или медью. Серебро и медь обеспечивают высокую электро- и теплопроводность, стойкость к окислению, а тугоплавкая фаза —

стойкость к износу, электрической эрозии и свариванию. Кроме двойных металлических композиций используются тройные композиции: Ag-W-Ni, Cu-W-Ni, а также металлокерамические материалы, содержащие оксиды, карбиды или графит: Ag-CdO, Ag-CuO, Ag-WC, Cu-C, Cu-W, Ag-C, Ag-Ni-C. Металлокерамические контакты обладают высокой износостойкостью и сопротивляемостью к свариванию в самых тяжелых условиях работы, что позволяет их использовать для переключателей, пускателей, реле, регуляторов напряжения, масляных выключателей большой мощности и т.д.

В дополнение к числу подвижных контактов можно причислить *магнитоуправляемые герметизированные контакты* или как их обычно называют «*герконы*», самый простой пример которых – это запаянная стеклянная колба очень маленького размера, в которую впаяны две специальные плоские контактные пружины, сделанные из какой либо мягкой магнитной стали. В том случае, если эти магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) вдруг поместить в созданное постоянным магнитом или обмоткой магнитное поле, то начнут намагничиваться их пружины и соответственно притягиваться одна к другой. В это самое время и происходит замыкание данных электрических контактов и, соответственно замыкается электрическая цепь. Эти контакты из-за своей большой силы упругости данных пружин могут разомкнуться только при полном исключении магнитного поля. Все поверхности этих пружин на контактах обязательно покрываются тонким слоем какого либо драгоценного металла, который имеет небольшое удельное электрическое сопротивление (например: серебро, платина, золото). При помощи герконов можно делать коммутации в разных электрических цепях при наличии очень невысоких значений тока от 1 мА до 0,5 А. Колбу самого геркона заполняют инертным газом либо вакуумируют. Все элементы геркона имеют очень малую массу и довольно высокое быстродействие своих контактов от 0,5 мс до 1,0 мс.

Износоустойчивость – это основное из свойств любых герконов. У отдельных видов герконов число переключений в секунду может достигать двух тысяч, и до сотен миллионов срабатываний.

Герсиконы - тоже являются магнитоуправляемыми герметическими силовыми контактами. Это разновидность герконов, которые дают возможность произвести коммутации внутри электрических це-

пей при значениях электрического тока 60А, 100А или 180А и при напряжении 220В и 440В.

Электрическое сопротивление контактов

Очень важная характеристика, которая определяет работу латунных, серебряных, медных и никелированных контактов, это их электрическое сопротивление. Определяется оно обычно переходным сопротивлением, напрямую зависящим от площади контактирования. Для того, чтобы уменьшить переходное сопротивление, нужно увеличить силу прижатия неподвижных и подвижных коммутирующих контактов. Появление тока в электроцепи контактов обязательно влечет за этим их нагрев, который пропорционален переходному сопротивлению. Чем больше коммутирующие контакты нагреваются, тем больше возрастает переходное сопротивление, что способствует еще большему нагреву. Установленные рабочие температуры таких электрических контактов находятся в пределах 100...120°C. Поэтому по мере увеличения номинального тока какого либо коммутирующего аппарата, переходное сопротивление латунных, посеребренных или медных контактов непременно должно быть снижено, то есть нужно повышать контактное нажатие. Помимо этого, с увеличением коммутируемого тока нужно обязательно увеличивать и поверхность охлаждения, то есть размеры всех контактирующих поверхностей. В основном токоведущие элементы контактов делают из материалов с небольшим удельным электрическим сопротивлением (например: серебро, медь, металлокерамические композиции).

Искрение на контактах и электрическая дуга (дугогасительные контакты)

При больших токах и напряжениях во время размыкания электроцепи, между расходящимися латунными, медными, никелированными или посеребренными неподвижными и подвижными контактами появляется электрический разряд. В месте площадки контактирования, при расхождении подвижных контактов с неподвижными серебряными (серебросодержащими) и медными контактами происходит очень резкий рост переходного сопротивления и разогрев всех электрических контактов до возможного расплавления и образуется контактный перешеек получившегося расплавленного металла. Из-за

высокой температуры, медные или посеребренные контакты могут разогреться, а также рваться, при этом сам металл контактов испаряется и между контактами появляется проводящий ионизирующий воздушный промежуток, где под действием очень высокого напряжения появляется электрическая дуга, снижающая быстродействие всего коммутационного аппарата и влияющая на дальнейшее разрушение всех контактов. Для прекращения появления дуги, необходимо увеличить сопротивление в электроцепи при помощи увеличения изначального расстояния между коммутирующими контактами, либо применить особые меры для ее гашения. Коммутируемая или разрывная мощность электрических контактов – это произведение максимальных значений напряжения и электрического тока в электроцепи, при которых на наименьшем расстоянии между коммутирующими контактами эта электрическая дуга не появляется.

При повышении напряжения в электроцепи максимальный коммутируемый ток необходимо ограничивать. Также коммутируемая мощность зависит от постоянной времени цепи $t = L/R$, то есть чем выше « t », тем ниже мощность коммутируют электрические медные, никелевые или серебряные контакты. Электрическая дуга угасает, когда в цепи с переменным током мгновенное значение электрического тока дойдет до нуля и может снова появиться, в случае, если вдруг напряжение на медных или серебряных контактах вдруг будет увеличиваться быстрее, чем восстановится электрическая прочность того самого промежутка между неподвижными и подвижными коммутирующими электрическими контактами. Все равно, в электроцепи с переменным током дуга очень неустойчива, а разрывная мощность всех контактов больше в несколько раз, чем в электроцепи с постоянным током. В электрических аппаратах с маленькой мощностью электрическая дуга на их контактах бывает редко, но тем не менее очень часто появляется опасное для особо чувствительных аппаратов искрение или же возможен пробой их изоляционного промежутка. Он может появляться в слаботочных цепях в случае быстрого размыкания контактов и нередко приводит к ложным отключениям, а также значительно сокращает срок эксплуатации контактов.

Чтобы уменьшить искрение на латунных, медных, никелированных или серебряных контактах, применяются устройства *искрогашения*. Самый эффективный метод гашения электрической дуги в

данном случае – это её охлаждение при перемещении в воздушном пространстве, соприкосновении со специальными изоляционными стенками особых камер, которые забирают тепло дуги. В современных аппаратах большое распространение получили специальные дугогасительные камеры, сделанные с магнитным дутьем и узкой щелью. Эту дугу можно расценивать как проводник с электрическим током. В случае нахождения в магнитном поле появляется сила, вызывающая перемещение дуги. В движении эта дуга обдувается обычным воздухом, попадая в специально отведенную узкую щель дугогасительной камеры между изоляционными пластинами, теряет свою форму и из-за роста давления гаснет в щели этой камеры.

2.2.9.2. Скользящие контакты

К скользящим контактам относят подвижные контакты, в которых контактирующие элементы скользят друг по другу без отрыва: это контакты между кольцами, коллекторными пластинами и щётками в электрических машинах, потенциометрические обмотки и реохорды в элементах сопротивления, упругие токосъемные контакты.

Основное требование к таким контактам – стойкость к истирающим нагрузкам при сухом трении. Износостойкость при трении связана со свойствами пары контактов: чтобы избежать заедания, один контакт должен быть тверже другого, причем мягкий контакт достаточно пластичным без склонности к наклёпу. Этому требованию в наибольшей степени удовлетворяют контактные пары металл-графит.

Подвижные части контакта – *коллекторные пластины*, кольца изготавливают из твердой меди, латуней (*ЛС59-1*, *ЛМц58-2*) или бронз (оловянно-цинковых, оловянно-фосфористых, бериллиевой *БрБ2*, кадмиевой *БрКд1*, хромистой *БрХ0,5*). Они отличаются высокой прочностью, стойкостью к истиранию, упругостью, антифрикционными свойствами и стойкостью к атмосферной коррозии.

Щётки электрических машин – неподвижные части скользящих контактов. К ним предъявляют следующие требования:

- минимальное удельное сопротивление и переходное падение напряжения ($U_{\text{пер}}$) между контактной парой «щётка – коллектор», «щётка – контактное кольцо»;
- высокая допустимая плотность тока j ;

- малый износ щётки и коллектора;
- низкий коэффициент трения и малое удельное давление прижатия щётки;
- высокая окружная скорость ($\omega = \pi n/30$, где n – число оборотов ротора);
- минимальное искрение.

Этим требованиям отвечают материалы на основе графита. По составу, структуре и технологии получения различают 4 группы щёток. Их основные характеристики представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Щётки для электрических машин

№	Тип щёток	Марка	ρ , мкОм·м	$U_{пер}$, В
1	Углеродистые	Г20, Г21, Г22	35-400	2-5
2	Графитные	Г11М, Г1, Г3	6-75	1-28
3	Электрографитные	ЭГ-2а, ЭГ4, ЭГ61	1-7	1-2
4	Металлографитные	М-1, М-3, МГ, МГС5	0,04-0,25	0,3-1,6

Углеродистые щётки изготавливают из прессованной смеси антрацита, нефтяного кокса с графитом и связующим с последующим обжигом при 1350...1480°C. Щётки отличаются высокой твердостью, большим удельным сопротивлением, применяются в генераторах малой мощности и электродвигателях с облегченными условиями коммутации.

Графитные щётки получают из натурального графита без связующего (мягкие сорта) и со связующим (твердые сорта) путем прокаливания спрессованного порошка. Они отличаются мягкостью и создают незначительный шум. Такие щётки применяют в синхронных генераторах, однофазных электродвигателях, сварочных генераторах, электродвигателях постоянного тока средней мощности.

Электрографитные щётки изготавливают из антрацита, сажи или нефтяного кокса методом высокотемпературного обжига при 2000...2500°C, при котором происходит удаление примесей и графитизация. Щётки отличаются высокой механической прочностью, минимальным износом и обеспечивают хорошую коммутацию в быст-

роходных машинах, их применяют в средненагруженных и высоконагруженных генераторах и электродвигателях.

Металлографитные щётки изготавливают из графитных масс с добавками металлов (меди, бронзы). Они обладают пониженным удельным сопротивлением, малым переходным падением напряжения и допускают высокую плотность тока. Их применяют в машинах низкого напряжения, рассчитанных на большую силу тока (авиационных генераторах и электродвигателях).

2.2.9.3. *Неподвижные контакты. Припои*

Неподвижные контакты могут быть зажимными и цельнометаллическими.

Зажимные контакты представляют собой различного рода зажимы, клеммы, болтовые и винтовые соединения проводников, а также различные штепсельные разъемы типа вилка – розетка.

При соприкосновении контактов возникает переходное сопротивление, которое зависит от состояния контактирующих поверхностей, контактного давления и твердости материала.

Требования к зажимным контактам:

– малое и стабильное переходное сопротивление, что обеспечивается малым удельным сопротивлением материала и невысокой твердостью;

– коррозионная стойкость материала, не образующего на контактной поверхности оксидных пленок.

Основными материалами для зажимных контактов являются медь, латуни, цинк, стали. Контактные поверхности подвергают шлифованию и покрывают мягкими коррозионностойкими металлами: оловом, цинком, кадмием, серебром.

Цельнометаллические контакты – соединения проводников путем пайки или сварки.

Пайка – способ соединения металлических или металлизированных деталей с помощью чистых металлов или специальных сплавов, которые называются *припоями*. Цель пайки – создание механически крепкого и герметического шва или электрического контакта с малым переходным сопротивлением. При пайке кроме припоев используют вспомогательные вещества – *флюсы*.

Припой – материал, которым в расплавленном состоянии заполняют промежуток между соединяемыми частями изделия или создают электрический контакт между ними. При пайке места соединения и припой нагревают. Так как у припоя температура плавления значительно ниже, он плавится, смачивает соединяемые металлы, растекается по ним и заполняет промежуток между ними. В результате возникает слой, который после затвердевания соединяет детали в одно целое.

Припои делят на две группы – *мягкие* и *твердые*. К мягким принадлежат припои с температурой плавления ниже 300°C и границей прочности на растяжение 16...100 МПа. Твердые припои имеют температуру плавления выше 300°C и прочность на растяжение 100...500 МПа. Основные характеристики припоев представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Характеристики припоев

Припой	Марка	Состав	$T_{пл}, ^\circ C$	Применение
<i>Оловянно-свинцовые, мягкие</i>	от ПОС-18 до ПОС-90	Sn: 10...90% Sb: 0,15...2,5% Pb – остальное	185...240	Пайка и лужение проводов, печатных плат, деталей электроаппаратуры
<i>Оловянно-свинцово-кадмиевые, мягкие</i>	ПОСК-47	Sn: 47...50% Pb: 32...36% Cd: 17...18%	145...180	То же самое и пайка металлокерамики, частей микросхем, покрытых серебром
<i>Серебряный, мягкий</i>	ПСр - 3 In	Ag: 2,5...3,5% In – остальное	141	Пайка золота и серебра, контактов микросхем
<i>Медно-цинковые, твердые</i>	ПМЦ - 36 ПМЦ - 54	Cu: 36-54% Zn – остальное	825...970	Пайка меди, её сплавов, стали
<i>Серебряные, твердые</i>	от ПСр-25 до ПСр-80	Ag: 25...70% Cu: 26...40% Zn: 4...35%	720...765	Пайка меди, её сплавов, серебра, платины, стали

Припой выбирают с учетом рода соединяемых металлов или сплавов, нужной механической прочности, коррозионной стойкости, стоимости и (при пайке токопроводящих деталей) удельного электрического сопротивления припоя. Название припоя, как правило, определяется металлами, которые входят в его состав в наибольшем количестве.

Самые употребляемые **мягкие припои** – оловянно-свинцовые с содержанием олова от 18% (ПОС-18) до 90% (ПОС-90). Их удельная проводимость составляет приблизительно 10% от удельной проводимости меди, а температура плавления от 240 до 185°C. Если требуется более низкая температура пайки, применяют легкоплавкие припои, которые содержат висмут и кадмий. Номенклатура легкоплавких припоев, которые применяют в радиоэлектронной промышленности, достаточно широка. Их состав и применение определяется ведомственным стандартом. Характеристики некоторых мягких припоев приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Мягкие припои (сплавы) с низкой температурой плавления

Сплав	Химический состав, %					T _{пл} , °C
	Олово	Свинец	Кадмий	Висмут	Индий	
<i>Вуда</i>	12...13	24,5...25,6	12...13	49...51	–	61
<i>Розе</i>	24,5...25,5	24,5...25,6	–	49...51	–	92
<i>Д'Арсе</i>	9,6	45,1	–	45,3	–	79
<i>Липовица с индием</i>	11,8	22,2	8,5	42	15,5	48

Твёрдые или тугоплавкие припои предназначены для высокотемпературной пайки. Они обеспечивают большую прочность соединения за счет взаимной диффузии элементов основного металла и припоя, их удельное сопротивление ниже, чем у мягких припоев. Твёрдые припои применяются для пайки меди, сталей, латуней, бронз.

В качестве твёрдых припоев используют чистую медь, медно-цинковые, медно-фосфористые сплавы и сплавы, содержащие серебро. Cu-Zn-припои (*ПМЦ*) имеют малое удельное сопротивление

($\rho = 0,03 \dots 0,04$ мкОм·м) и температуры плавления от 825 до 880°C в зависимости от содержания меди. Вместо стандартных припоев для пайки можно применять латуни Л62 или Л68. Медно-фосфористые припои (ПМФ), содержащие 7...10% фосфора, позволяют вести пайку меди без флюса.

Серебряные припои имеют высокие механические, технологические и антикоррозионные свойства, невысокое переходное сопротивление. Кроме серебра они содержат медь или медь с цинком, например, ПСр72 (72%Ag + 28%Cu). С увеличением содержания серебра в припоях падает удельное сопротивление с 0,065 мкОм·м до 0,022 мкОм·м, а температура плавления изменяется от 779 до 920°C. Серебряные припои пригодны для пайки любых разнородных черных и цветных металлов и сплавов. Параметры таких припоев приведены в таблице 2.9, параметры медно-цинковых и медно-никелевых твёрдых припоев – в таблице 2.10.

Таблица 2.9 – Химический состав и физико-механические свойства твёрдых серебряных и медно-фосфорных припоев

Марка припоя	Химический состав, %				Физико-механические свойства			
					Плотность, кг/м ³	Температура кристаллизации, °С		Предел прочности при растяжении, МПа
	Серебро	Медь	Цинк	Фосфор		начало	конец	
ПСр72	72±0,5	28±0,5	–	–	9900	779	779	–
ПСр50	50±0,5	50±0,5	–	–	9300	850	779	–
ПСр45	45±0,5	30±0,5	25±1,5	–	9100	725	660	300
ПСр25	25±0,3	40±1	35±2,5	–	8700	775	745	280
ПСр71	71±0,5	28±0,7	–	1 ±0,2	9800	795	750	–
ПСр25ф	25±0,5	70±1	–	5±0,5	8500	710	650	–
ПСр15	15±0,5	80,2±1	–	4,8±0,2	8300	810	635	–
ПМФ7 (МФ3)	–	Остальное	–	7–8,5	–	860	710	–

Таблица 2.10 – Медно-цинковые и медно-никелевые твёрдые припои

Марка припоя	Химический состав, %							Физические свойства			
	Медь	Никель	Железо	Кремний	Бор	Цинк	Олово	Температура кристаллизации, °С		Плотность, кг/м ³	Предел прочности при растяжении, МПа
								соли-дус	лик-видус		
<i>Л63</i>	62–65	–	–	–	–	Остально е	–	900	905	8500	310
<i>ЛОК59-0,1-0,3</i>	60,5– –63,5	–	–	0,2– –0,4	–	Остально е	0,7– –1,1	890	905	8200	–
<i>ПЖЛ500</i>	Остал ьное	27– –30	41,5	1,5– –2	0,2	–	–	1080	1120	8630	600

Параметры серебряных припоев с пониженной температурой плавления приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Серебряные припои с пониженной температурой плавления

Марка припоя	Химический состав, %						Плотность, кг/м ³	Температура кристаллизации, °С	
	Се-ребро	Медь	Цинк	Кадмий	Олово	Никель		нача-ло	ко-нец
<i>ПСр50Кд</i>	50±0,5	16±1	16±2	18±1	–	–	9300	650	635
<i>ПСр40</i>	40±1	16,7+ +0,7/ -0,4	17+ +0,8/ -0,4	26+ +0,5/ -1	–	0,3±0,2	8400	605	595
<i>ПСр62</i>	62±0,5	28±1	–	–	10±1,5	–	9700	700	660

Преимущественные области применения твёрдых припоев приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Преимущественные области применения твёрдых припоев

Марка припоя	Область применения
<i>ПСр72; ПСр50</i>	Пайка металлокерамических контактов и различных ответственных токоведущих соединений, подвергающихся изгибающим и ударным нагрузкам
<i>ПСр45</i>	Пайка меди и ее сплавов, нержавеющей и конструкционных сталей. Пайка короткозамкнутых обмоток роторов и демпферных обмоток высоконагруженных электрических машин. Припой обеспечивает высокую плотность и прочность паяных швов
<i>ПСр25</i>	Пайка меди и ее сплавов, нержавеющей и конструкционных сталей, заменяет припой ПСр45 при выполнении менее ответственных соединений
<i>ПСр71</i>	Пайка деталей аналогично припою ПСр72, но где требуется большая жидкотекучесть
<i>ПСр25ф; ПСр15; ПМФ7</i>	Пайка меди и ее сплавов, в том числе различных токоведущих частей машин и аппаратов, не испытывающих ударных и изгибающих нагрузок
<i>Л63; ЛОК59-0,1-0,3</i>	Пайка меди и чугуна. Паяные соединения обладают высокой прочностью и хорошо работают в условиях ударных и изгибающих нагрузок
<i>ПЖЛ500</i>	Пайка соединений, работающих при температурах до 600°С

Параметры медно-фосфорных припоев приведены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Медно-фосфорные припои

Марка припоя	Химический состав, %		Температура плавления, °С
	Медь	Фосфор	
<i>ПФМ-1</i>	90,0–91,5	8,5–10	725–850
<i>ПФМ-2</i>	92,5	7,5	710–715
<i>ПФМ-3</i>	91,5–93,0	7,0–8,5	725–860
<i>ПМФ7 (МФЗ)</i>	Остальное	7,0–8,5	710–860

Параметры припоев для пайки алюминия – в таблицах 2.14, 2.15.

Таблица 2.14 – Химический состав и физические свойства припоев для пайки алюминия

Марка припоя	Химический состав, %						Температура плавления, °С	Предел механической прочности при растяжении, Мпа
	Алюминий	Медь	Олово	Цинк	Кадмий	Кремний		
<i>Кадмиевый</i>	–	–	36	40	24	–	–	85
<i>АВИА-1</i>	–	–	55	25	20	–	200	–
<i>АВИА-2</i>	15	–	40	25	20	–	250	–
<i>ВПТ-4</i>	55	–	–	40	–	5	410	–
<i>34-А</i>	66	28	–	–	–	6	545	180
<i>35-А</i>	72	2,1	–	–	–	7	540	140
<i>А</i>	–	2,0– –1,5	40	58,5	–	–	425	80
<i>В</i>	12	8	–	80	–	–	410	185
<i>ЦО-12</i>	–	–	12	88	–	–	500–550	–
<i>ЦА-15</i>	15	–	–	85	–	–	550–600	–

Таблица 2.15 – Другие припои для пайки алюминия

Марка припоя	Химический состав, %					Температура полного расплавления, °С	Температура пайки, °С	Плотность, кг/м ³
	Олово 01	Цинк	Кадмий	Алюминий а7	Медь М0			
<i>П250А</i>	79–81	19–21	–	–	0,15	250	300	7300
<i>П300А</i>	–	50–61	39–41	–	0,045	310	360	7730
<i>П300Б</i>	–	80	–	8	0,5	410	700–750	–

Преимущественные области применения припоев для пайки алюминия *П250А*, *П300А* и *П300Б* приведены в табл. 2.16.

Таблица 2.16 – Преимущественные области применения припоев для пайки алюминия

Марка припоя	Область применения
<i>П250А</i>	Лужение концов алюминиевых проводов, а также пайка погружением алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными наконечниками
<i>П300А</i>	То же, пайка соединений с повышенной коррозионной стойкостью
<i>П300Б</i>	Пайка заливкой алюминиевых проводов с алюминиевыми и медными деталями

Вопросы для самопроверки

1. Какие материалы относят к проводниковым материалам высокой проводимости?
2. Какие основные требования предъявляются к таким материалам?
3. Приведите основные характеристики меди.
4. Как влияют примеси на электрические свойства меди?
5. Приведите основные характеристики латуни.
6. Приведите основные характеристики бронзы.
7. Основные свойства проводникового алюминия.
8. Сравнительная характеристика Cu и Al проводников.
9. Приведите параметры алюминиевых сплавов повышенной прочности.
10. Чем характеризуется проводниковое железо?
11. Каково применение свинца и никеля как электротехнических материалов?
12. Особенности применения благородных металлов в электротехнике.
13. Опишите применение тугоплавких металлов.
14. Дайте определение сверхпроводимости.
15. Приведите основные свойства сверхпроводников.
16. Какие сверхпроводящие материалы вы знаете?
17. Свойства графита как проводника.
18. Что такое композиционные проводящие материалы?
19. Какой материал на основе окисла используется как проводник?
20. Какие материалы используются для электрических контактов?
21. Опишите работу разрывных контактов.
22. Чем опасно искрение контактов?
23. Какие подвижные контакты относят к скользящим?
24. Как реализуются цельнометаллические контакты?
25. Приведите основные параметры мягких припоев.
26. Приведите основные параметры твёрдых припоев.

2.3. Проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением

2.3.1. Общие требования

В ряде случаев от проводниковых материалов требуется высокое удельное сопротивление и малый температурный коэффициент сопротивления. Перечисленными свойствами обладают сплавы на основе меди, никеля и марганца, а также других металлов. Из чистых металлов сюда следует отнести ртуть, так как она обладает большим удельным сопротивлением ($\rho = 0,94 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$). Наибольшее применение имеют проводниковые сплавы с большим удельным сопротивлением ($\rho = 0,42 \dots 0,52 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$). Проволока и ленты из этих сплавов применяются для изготовления точных (образцовых) сопротивлений, пусковых и регулирующих реостатов, электронагревательных приборов и электрических печей сопротивления. В каждом из перечисленных случаев применения эти сплавы должны иметь дополнительные свойства, определяемые назначением прибора, в котором он используется. Так, сплавы, применяемые для изготовления точных сопротивлений, должны еще обладать малой термоэлектродвижущей силой (термо-э. д. с.) при контакте (в паре) с медью. Кроме того, они должны обеспечивать постоянство электрического сопротивления во времени. Для таких областей применения, как электронагревательные приборы, электрические печи сопротивления и другие устройства, работающие при высоких температурах ($800 \dots 1000^\circ\text{C}$), требуются проводниковые материалы, могущие длительно работать при высоких температурах без заметного окисления. Этим требованиям удовлетворяют жаростойкие проводниковые сплавы.

Общим же свойством всех перечисленных сплавов является их большое удельное электрическое сопротивление, поэтому они называются сплавами высокого электрического сопротивления. Эти сплавы представляют собой твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой. Они удовлетворяют перечисленным выше требованиям.

2.3.2. Проводниковые сплавы высокого сопротивления на основе меди и никеля

Проводниковыми сплавами, применяемыми для изготовления точных (образцовых) сопротивлений, являются **манганины**. Они состоят из меди (Cu), марганца (Mn) и никеля (Ni). Наиболее распространенным является манганин состава: Cu 86%; Mn 12%; Ni 2%. Вообще сплавы типа манганина могут содержать: Cu – 84...86%; Mn – 11...13%; Ni – 2...3%.

Для стабилизации свойств в манганины вводят: серебро (0,1%), железо (0,2...0,5%) и алюминий (0,2...0,5%). Цвет манганинов светло-оранжевый. Среднее значение плотности 8,4 г/см³, температура плавления 960°С или несколько выше.

Из манганинов изготавливают мягкие и твердые сорта проволоки:

- ПММ — проволока манганиновая мягкая;
- ПМТ — проволока манганиновая твердая;
- ПМС — проволока манганиновая стабилизированная.

Основные характеристики мягкой (отожженной) проволоки: предел прочности при разрыве 45...50 кГ/мм²; относительное удлинение – 10...20%, удельное сопротивление $\rho = 0,42...0,52$ мкОм·м. Основные характеристики твердой манганиновой проволоки: предел прочности при разрыве 50...60 кГ/мм²; относительное удлинение – 5...9%, удельное сопротивление $\rho = 0,43...0,53$ мкОм·м. Из сплавов типа манганина изготавливают проволоку и ленту.

Манганиновая проволока выпускается диаметром от 0,02 до 6,0 мм. Манганиновая лента выпускается толщиной от 0,09 мм и больше. У манганиновых изделий (проволока, ленты) температурный коэффициент сопротивления ТКС находится в пределах $3...5 \cdot 10^{-5}$ 1/°С; у стабилизированных сортов манганина ТКС $0...1,5 \cdot 10^{-5}$ 1/°С.

Эти данные показывают, что манганин имеет весьма малую зависимость электрического сопротивления от температуры, что очень важно для обеспечения постоянства величины сопротивления в точных электроизмерительных устройствах. Вторым достоинством манганина является очень малая термо-э.д.с., развиваемая этим сплавом в контакте с медью, которая равна 0,9...1,0 мкВ/град.

Для стабилизации электрических свойств манганиновой проволоки её подвергают тепловой обработке в вакууме, заключающейся в

выдержке в течение 1...2 ч при 400°С и длительном выдерживании при комнатной температуре. В результате этого улучшается однородность сплава и стабилизируются его свойства.

Наибольшая допустимая рабочая температура для манганина – 200°С, но у нестабилизированных сортов манганина, начиная с 60°С, уже наблюдается необратимое изменение свойств. Поэтому сопротивления из нестабилизированной манганиновой проволоки не рекомендуется нагревать выше 60°С. Минимальная температура для проводов из манганина равна -60°С.

Кроме голой манганиновой проволоки, мягкой и твердой, выпускаются манганиновые обмоточные провода с эмалевой высокопрочной изоляцией (марки: *ПЭВММ-1*; *ПЭВММ-2*; *ПЭВМТ-2*) и с другими видами эмалевой изоляции. Кроме того, выпускаются манганиновые провода с изоляцией из натурального шелка (марки: *ПШДММ* и *ПШДМТ*), а также провода, изолированные двумя слоями волокнистой изоляции из лавсана (марки *ПЛДММ*), и другие.

Константан также относится к медно-никелевым сплавам, но в отличие от манганина содержит значительно больше никеля. В состав сплавов типа константана входят: медь 60...65%, никель 41...39% и марганец 1...2%.

Характерной особенностью константана является очень незначительная величина его температурного коэффициента сопротивления. Практически он принимается равным нулю. Поэтому электрическое сопротивление константана не изменяется с изменением температуры, что является достоинством сплава.

Цвет константана серебристо-белый, температура плавления его 1270°С, среднее значение плотности 8,9 г/см³. Из константана изготавливают мягкие и твердые сорта проволоки диаметром от 0,02 до 5,0 мм.

Основные характеристики мягкой (отожженной) константановой проволоки: предел прочности при разрыве – 45...65 кГ/мм²; удельное сопротивление $\rho = 0,46...0,48$ мкОм·м. Характеристики твердой проволоки: предел прочности – 65...70 кГ/мм²; $\rho = 0,48...0,52$ мкОм·м. Константан в паре с медью создает большую термо-э.д.с., равную 39 мкВ/град, что не дает возможности применять константан в точных сопротивлениях и электроизмерительных приборах.

Константановая проволока применяется для изготовления реостатов и термопар. В термопарах константановая проволока чаще всего используется в паре с медной. Спай константановой и медной проволоки при нагреве развивает значительную по величине термо-э.д.с., что дает возможность измерять температуры до 300°C. При температурах выше 300°C начинается сильное окисление меди. Заметное окисление голой константановой проволоки начинается при температурах от 500°C и выше.

Кроме голой (неизолированной) константановой проволоки, наша промышленность выпускает константановые обмоточные провода с высокопрочной эмалевой изоляцией (марки: *ПЭВКМ-1*; *ПЭВКМ-2*; *ПЭВКТ-1*; *ПЭВКТ-2*), провода, изолированные двумя слоями пряжи из натурального шелка (марка *ПШДК*) или лавсана (марка *ПЛДК*), а также провода, изолированные эмалью и одним слоем натурального шелка, или лавсанового волокна (марки *ПЭШОК*; *ПЭЛОК* и др.).

При нагревании голой константановой проволоки до 900°C в течение нескольких секунд и последующего охлаждения на воздухе на её поверхности образуется сплошная пленка из окислов. Эта оксидная пленка имеет темно-серый цвет и обладает электроизоляционными свойствами. Она используется в качестве естественной изоляции между витками константановой проволоки, например в реостатах, где напряжение между витками не превосходит нескольких вольт.

2.3.3. Жаростойкие проводниковые сплавы

Для нагревательных элементов, применяемых в электронагревательных приборах и печах сопротивления, необходимы проволока и ленты, могущие длительно работать при температурах от 800 до 1200°C. Описанные ранее чистые металлы (медь, алюминий и др.), а также сплавы (манганин и константан) непригодны для этого, так как интенсивно окисляются, начиная с температуры 300...500°C. Образующиеся на них защитные пленки окислов легко испаряются и не защищают металл от дальнейшего окисления.

Для электронагревательных приборов нужны жаростойкие проводниковые сплавы высокого сопротивления, т. е. стойкие к окислению при высоких температурах. Кроме того, эти сплавы должны обладать большим удельным сопротивлением и малой величиной температурного коэффициента сопротивления.

Перечисленным требованиям удовлетворяют сплавы двух типов: двойные сплавы на основе никеля (Ni) и хрома (Cr), называемые **нихромами**, и тройные сплавы на основе никеля, хрома и железа, называемые **ферронихромами**. Кроме того, находят применение тройные сплавы железа, хрома и алюминия, называемые **фехралями** и **хромалями**. Эти сплавы отличаются различным содержанием составляющих их компонентов и соответственно разной жаростойкостью и электрическими характеристиками: плотность колеблется от 6,8 до 8,4 г/см³, а предел прочности при растяжении — от 65 до 80 кГ/мм² (при 20°C).

Все перечисленные сплавы представляют собой твердые растворы металлов неупорядоченной структуры. При нагревании этих сплавов на их поверхности образуется плотная защитная пленка, состоящая в основном из окиси хрома (Cr₂O₃) и закиси никеля NiO. Эта пленка устойчива при высоких температурах (900...1100°C) и она надежно защищает сплавы от соприкосновения их с кислородом воздуха. Этим обеспечивается длительная работа проволоки и лент, изготовленных из жаростойких сплавов.

В марках сплавов буквы обозначают главные части сплава: хром (Х), никель (Н), алюминий (Ю) и титан (Т). Цифра, стоящая за соответствующей буквой, указывает (в среднем) количество этого металла в сплаве. Например, в нихроме марки *X20H80* содержится хрома 20%, а никеля 80% (по весу). В то же время в обозначениях марок сплавов невозможно отразить точное содержание всех компонентов сплава.

Кроме основных компонентов, в состав жаростойких сплавов входят еще примеси: углерод (0,06...0,15%), кремний (0,5...1,2%), марганец (0,7...1,5%), фосфор (0,35%) и сера (0,03%). Сера, фосфор и углерод — вредные примеси, так как они повышают хрупкость сплавов, поэтому от них стараются освободиться. Марганец и кремний являются раскислителями, т. е. они позволяют устранить из сплавов кислород, ухудшающий их свойства. Присутствие в сплавах никеля, алюминия и особенно хрома обеспечивает жаростойкость сплавов (900...1200°C).

Кроме того, эти компоненты увеличивают удельное сопротивление и снижают величину температурного коэффициента сопротивления, что и требуется для этих сплавов. Содержание в сплавах хрома больше 30% приводит к повышенной хрупкости и твердости сплавов.

Изготовление тонкой проволоки (диаметром 0,02 мм) производится из сплавов, в которых содержание хрома не превышает 20%; эти сплавы марок *X15H60* и *X20H80*. Проволока диаметром больше 0,2 мм и лента толщиной 0,2 мм и выше изготавливаются из сплава остальных марок.

Хромоалюминиевые сплавы *фехраль* и *хромаль* намного дешевле нихромов, так как хром и алюминий сравнительно дешевле и менее дефицитны. Однако они менее технологичны, более твердые и хрупкие. Из них получают проволоку большого диаметра и ленты с большим поперечным сечением, поэтому их используют в электронагревательных устройствах большой мощности и промышленных электрических печах.

Железо, вводимое в сплавы, удешевляет их, но после нескольких нагревов у этих сплавов наблюдается резкое возрастание хрупкости. Поэтому спирали из сплавов типа фехраля и хромалья, проработавшие в электронагревательных приборах, не должны подвергаться деформации (при ремонте) в холодном состоянии. Сращивания и скрутки проволок из этих сплавов должны производиться в подогретом (300...400°C) состоянии. Наибольшая допустимая температура для нагревательных элементов из фехраля равна 800...850°C, а для нагревательных элементов из хромалья – 1000...1200°C.

Нагревательные элементы из нихрома могут длительно работать при температурах 950...1100°C, не изменяя заметно своей пластичности и механической прочности. Однако они надежно работают в стационарном режиме. При частых же включениях и выключениях, вызывающих резкое изменение температуры нихромовых спиралей, может происходить растрескивание защитных окисных пленок на их поверхности. Это вызовет проникновение кислорода воздуха к поверхности нихрома и приведет к его окислению и разрушению.

Для увеличения срока службы трубчатых нагревательных элементов нихромовую проволоку помещают в трубки из стойкого к окислению металла и заполняют их диэлектрическим порошком с высокой теплопроводностью (магний Mg). Такие нагревательные элементы применяют, например, в электрических кипятильниках, которые могут работать длительное время. Нихромовая проволока применяется для изготовления проволочных резисторов, потенциометров, паяльников, электропечей и пленочных резисторов интегральных

микросхем. Как и константаны, нихромы содержат большое количество дорогого дефицитного никеля.

При температурах выше 1200°C (в вакуумных печах) используют сплавы на основе тугоплавких металлов (W, Mo, Ta). Для изготовления нагревателей электрических печей (до 1500°C) применяют также керамические материалы, например, силитовые стержни, которые спекают из карбида кремния. Силит является полупроводниковым материалом и имеет высокое электросопротивление. Распространены также нагреватели из дисилицида молибдена (MoSi₂).

Кроме голой проволоки из жаростойких сплавов, выпускаются обмоточные провода из нихрома с эмалевой изоляцией (марки ПЭНХ, ПЭВНХ и ПЭТВНХ), а также со стекловолоконистой изоляцией на кремнийорганическом лаке (марка ПСДНХ).

2.3.4. Ртуть и её свойства

Ртуть является единственным металлом, который сохраняет жидкое состояние при комнатной температуре.

Ртуть стойка к окислению, которое наблюдается только при температуре, близкой к температуре её кипения (+356,9°C). Взаимодействие ртути с другими газами (водородом, азотом, окисью углерода) также незначительно. Разведённые соляная и серная кислоты и щелочи на ртуть не действуют, но она растворяется в соляной, серной и азотной концентрированных кислотах. Медь, цинк, свинец, никель, олово, серебро и золото растворяются в ртути, образуя *амальгамы*.

Ртуть обладает следующими характеристиками: плотность 13,55 г/см³; температура застывания -39°C; температурный коэффициент объёмного расширения $182 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$. Удельное сопротивление $\rho = 0,94 \dots 0,95 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$; температурный коэффициент сопротивления – +0,00099 1/°C.

Ртуть применяется в качестве жидких контактов в специальных реле и выключателях, а также в ртутных выпрямителях. В метрологии в качестве опорных источников напряжения используются *нормальные элементы* – источники ЭДС с электродами из жидкой ртути, в которой растворены сульфаты ртути и кадмия. ЭДС такого элемента стабильна до единиц микровольт (1,018636 В при 20°C), но внутреннее сопротивление превышает 1 кОм.

Следует отметить исключительную вредность ртути (особенно ее паров) для здоровья. Поэтому работа с ртутью требует осторожности. Ртуть нужно хранить в герметически закрытой стеклянной или фарфоровой таре. Очистку ртути (фильтрация и др.) производят в специальных закрытых шкафах с вытяжной вентиляцией.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) определяет зависимость сопротивления материала от температуры и может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Значение ТКС для различных материалов приведено в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – ТКС для различных материалов

Материал	ТКС – α , °С
Кремний	-0,075
Германий	-0,048
Манганин	+0,00002
Константан	+0,00005
Нихром	+0,0004
Ртуть	+0,0009
Сталь 0,5% С	+0,003
Цинк	+0,0037
Титан	+0,0038
Серебро	+0,0038
Медь	+0,00386
Свинец	+0,0039
Платина	+0,003927
Золото	+0,004
Алюминий	+0,00429
Олово	+0,0045
Вольфрам	+0,0045
Никель	+0,006
Железо	+0,00651

Вопросы для самопроверки

1. Какие материалы обладают высоким удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом сопротивления?
2. Какие проводниковые сплавы применяются для изготовления точных (образцовых) сопротивлений?
3. Какова структура сплавов высокого электрического сопротивления?
4. Проведите сравнение характеристик сплавов: манганин и константан.
5. Какие электротехнические материалы изготавливают из манганина?
6. В каких приборах применяется константановая проволока?
7. Из каких материалов изготавливают нагревательные элементы, применяемые в электронагревательных приборах и печах сопротивления?
8. Опишите основные свойства жаростойких проводниковых сплавов.
9. Сравните нагревательные элементы из нихрома, фехраля и хромаля.
10. Каким образом увеличивают срок службы трубчатых нагревательных элементов?
11. Перечислите основное электротехническое применение ртути.
12. Сравните температурный коэффициент сопротивления для различных материалов.

Глава 3. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Диэлектрики – это вещества, основным электрическим свойством которых является способность поляризоваться в электрическом поле и иметь большое сопротивление прохождению электрического тока.

Это широкий класс электротехнических материалов: газообразных, жидких и твердых, природных и синтетических, органических, неорганических и элементоорганических. По выполняемым функциям они делятся на **пассивные** и **активные**. Пассивные диэлектрики применяются в качестве электроизоляционных материалов. В активных диэлектриках (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и др.), электрические свойства зависят от управляющих сигналов, способных изменять характеристики электротехнических устройств и приборов.

Поляризация – это процесс упорядочения связанных электрических зарядов внутри диэлектрика под действием приложенного напряжения.

Материалы, у которых интенсивно развивается процесс спонтанной поляризации называются *сегнетоэлектрики*.

Каждый материал обладает *диэлектрической проницаемостью* – это основная характеристика электроизоляционных материалов. Диэлектрики всегда подвергаются воздействию высокого напряжения и могут быть разрушены силами электрического поля. Это явление называется *пробоем* диэлектрика.

В процессе работы электротехнических устройств диэлектрик нагревается, так как часть электрической энергии в нем рассеивается в виде тепла. Диэлектрические потери сильно зависят от частоты тока, особенно у полярных диэлектриков, поэтому они являются низкочастотными. В качестве высокочастотных используются неполярные диэлектрики

Величина напряженности электрического поля, при которой произошел пробой диэлектрика, называется его *электрической прочностью*.

3.1. Свойства диэлектриков

Для оценки свойств электротехнических материалов необходимо учитывать основные характеристики, к которым относятся электрические, механические, термические и физико-химические.

Из всего многообразия свойств главными являются электрические. К ним относятся: электропроводность, поляризация, диэлектрические потери, электропрочность и электрическое старение.

Электропроводность характеризуется удельной проводимостью и удельным сопротивлением. Она носит ионный характер, т.е. носителями зарядов являются ионы.

Диэлектрические потери. При взаимодействии электрического поля на любое вещество часть потребляемой им электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается. Рассеянную часть поглощенной диэлектриком электрической энергии называют диэлектрическими потерями.

Поляризация диэлектриков – это, процесс, состоящий в ограниченном смещении или ориентации связанных зарядов в диэлектрике при воздействии на него электрического поля. Степень поляризованности диэлектрика оценивается относительной диэлектрической проницаемостью.

Электрическая прочность – это равная напряжению величина, при которой может быть пробит электроизоляционный материал толщиной в единицу длины. Определяют электрическую прочность экспериментальным путем. В лаборатории измеряется напряжение, которое пробивает установленной толщины образец электроизоляционного материала.

Виды пробоя диэлектриков

Электрическое старение. В сильном электрическом поле в связи с электропереносом зарядов в диэлектрике происходят необратимые изменения свойств – электрическое старение и пробой, сопровождающийся разрушением твердых диэлектриков. Пробой наступает при достижении некоторого порогового значения напряженности поля, выше которого электрическая прочность нарушается. При пробое ток через диэлектрик катастрофически возрастает и сквозь диэлектрик проходит мощный электрический разряд (искра или дуга). Различные физические и физико-химические механизмы приводят к развитию в диэлектриках необратимых процессов – старения, пробоя и механического разрушения.

Электрический пробой обусловлен явлениями ударной ионизации и фотоионизации (рис. 3.1). Он 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 $E_{пр}$, чем в неоднородном поле.

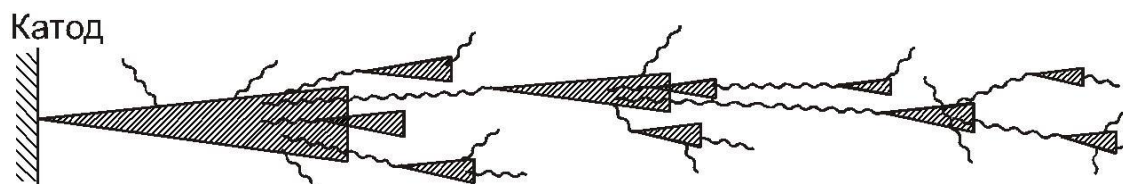


Рис. 3.1. Схема электрического пробоя газов

Тепловой пробой 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 $E_{пр}$ от температуры, частоты тока, размеров детали и условий ее охлаждения.

Электрохимический пробой обусловлен развитием в диэлектрике химических процессов, ведущих к образованию подвижных ионов. Эта форма пробоя характерна для жидких диэлектриков, содержащих небольшие количества примесей электролита. В твердых диэлектриках электрохимический пробой может быть при наличии поверхностных загрязнений, адсорбированной влаги.

Повышение температуры и влажности среды, наличие примесей, неоднородность структуры снижают электрическую прочность диэлектриков.

Механические свойства диэлектриков

Это способность диэлектрика выдерживать внешние статические и динамические нагрузки без недопустимых изменений первоначальных размеров и формы. При выборе диэлектрического материала

в каждом конкретном случае следует учитывать не только электрические свойства, но и механические свойства.

К основным механическим свойствам относят *упругость, прочность, сопротивление раскалыванию, стойкость к надрыву.*

Повышение механического напряжения приводит к разрушению образца при напряжении $\sigma_{пр}$, которое называется пределом прочности.

Прочность материалов характеризуют пределами прочности при растяжении σ_r , сжатии $\sigma_{сж}$ и изгибе $\sigma_{и}$. Материалы, в которых пластическая деформация не наблюдается и образец разрушается (например, стекло, керамика), называются *хрупкими*. Хрупкие материалы легко разрушаются под действием вибраций и динамических нагрузок. Материалы, в которых участок пластической деформации очень широк, называются *пластичными*. Для бумаги и картона – прочность на разрыв; для пластмассы – сопротивление раскалыванию; для бумаги, пленки и лакоткани – стойкость к надрыву. Для многих электроизоляционных материалов важным параметром является гибкость, которая обеспечивает сохранение высоких механических и электрических параметров изоляции при самых разнообразных механических деформациях.

Термические свойства диэлектриков

Поведение диэлектрика при нагревании характеризуется рядом свойств, которые в совокупности определяют его допустимую рабочую температуру. К важным термическим свойствам относятся *теплопроводность, теплоёмкость, плавление, тепловое расширение, нагревостойкость, стойкость к термоударам.*

Теплопроводность – процесс отвода теплоты от нагретых проводников и магнитопроводов через слой электрической изоляции.

Теплоёмкость – это то количество теплоты, которое необходимо для нагрева тела.

Твёрдые кристаллические диэлектрики при нагреве плавятся, и для них характерным параметром является температура плавления и температура размягчения.

Диэлектрик, как и другие материалы, при нагревании расширяется. Термическое расширение оценивают температурным коэффициентом длины и температурным коэффициентом объема.

Нагревостойкость электрической изоляции определяется по изменениям ее электрической прочности, тангенсу угла диэлектрических потерь, потере массы, механической прочности по сравнению с рабочей температурой. Оценкой нагревостойкости материала может служить температура размягчения. Критерием выхода из строя изоляции может служить уменьшение ее электрической прочности в 2 раза по сравнению со значением до испытаний. Материалы, используемые в изоляции электрических машин, трансформаторов и аппаратов по нагревостойкости разделяют на 7 классов.

Холодостойкость электроизоляции определяется путем сравнения механических характеристик при отрицательной и нормальной температурах.

Стойкость к термоударам определяется для хрупких материалов. Это изоляторы из электротехнического фарфора. При определении стойкости к термоударам нагретые изоляторы погружают в ледяную воду, где выдерживают определенное время.

Физико-химические свойства диэлектриков

К ним относятся: *химостойкость, влагостойкость, водопоглощение, тропикостойкость.*

При определении *химостойкости* образцы длительное время выдерживают в условиях наиболее близких к эксплуатационным, после чего определяют изменение их внешнего вида, массы, электрических и других параметров (воздействие масла, топлива, щелочи).

Влагостойкость диэлектрика определяется его способностью сорбировать влагу из окружающей среды (влажного воздуха). В процессе выдержки во влажной атмосфере контролируют изменение параметров материала.

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

Тропикостойкость диэлектрика определяется по изменению удельного объема сопротивления, механической и электрической прочности под воздействием тропических климатических факторов: холода, жары, влаги, солнечной радиации, атмосферы, загрязненной морской солью, пустынной или степной пылью, песком, пеплом, химическими соединениями, воздействием микроорганизмов и вредителей животного мира.

Диэлектрические (изоляционные) материалы по агрегатному состоянию классифицируются на **твёрдые, жидкие и газообразные**. Области применения и количество типов материалов существенно различаются.

3.2. Газообразные диэлектрики

Газообразные диэлектрики делят на две группы: естественные и искусственные. Основными газообразными диэлектриками, применяющимися в электротехнике, являются: воздух, азот, водород и элегаз (гексафторид серы) и др. По сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками, газы обладают малыми значениями диэлектрической проницаемости и, высоким удельным сопротивлением и пониженной электрической прочностью (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Свойства газов по отношению к свойствам воздуха

Характеристика	Воздух	Азот	Водород	Элегаз
Плотность	1	0,97	0,07	5,19
Теплопроводность	1	1,08	6,69	0,7
Удельная теплоемкость	1	1,05	14,4	0,59
Электрическая прочность	1	1	0,6	2,3

3.2.1. Естественные газообразные диэлектрики

Воздух получил наибольшее применение из них в силу своей распространенности, даже в тех случаях, когда его присутствие в изоляции нежелательно. Воздух представляет собой смесь, которая состоит из азота N_2 (78,03%), кислорода O_2 (20,93%), углекислого газа CO_2 (0,03%), инертных газов (He, Xe, Ar, Ne, Kr) (0,1 %).

В воздушных линиях электропередачи, сухих трансформаторах, коммутационных аппаратах, распределительных устройствах и т.п. воздух является основной изоляцией. Во многих электрических объектах он играет роль дополнительной изоляции к твердым и жидким диэлектрикам.

Азот N_2 – бесцветный газ, не имеющий запаха. Он бесцветен также в жидком и твердом состоянии. Обладает одинаковой с воздухом электрической проницаемостью, но менее активен, чем воздух, который содержит кислород. Азот применяется в качестве изоляции в конденсаторах, высоковольтных кабелях и силовых трансформаторах.

В чистом виде азот применяется сравнительно редко (для высоковольтных конденсаторов постоянной емкости, для наполнения баллонов осветительных ламп). В микроэлектронике газообразный азот применяют в качестве защитной среды, а жидкий – для наполнения ловушек в вакуумных системах.

Водород H_2 - бесцветный горючий газ, не имеющий запаха; самый легкий газ (1л водорода при нормальных условиях имеет массу 0,09г). Электрическая прочность $E_{пр}$ водорода примерно на 40% ниже воздуха. Водород – очень легкий газ с высокой теплопроводностью и удельной теплоемкостью.

Водород имеет пониженную электрическую прочность по сравнению с азотом и применяется в основном для охлаждения электрических машин. Замена воздуха водородом приводит к значительному улучшению охлаждения, так как удельная теплопроводность водорода значительно выше, чем у воздуха. Кроме того, при применении водорода снижаются потери мощности на трение о газ и вентиляцию. Поэтому водородное охлаждение позволяет повысить как мощность, так и КПД электрической машины.

Инертные газы – химические элементы, образующие главную подгруппу 8-й группы периодической системы Менделеева: гелий He (атомный номер 2), неон Ne (10), аргон Ar (18), криптон Kr (36), ксенон Xe (54) и радон Rn (86).

Промышленное использование инертных газов основано на их низкой химической активности или специфических физических свойствах. Инертные газы нашли широкое применение в области электротехники для заполнения электровакуумных приборов, радиоламп, газосветных трубок различного цвета свечения.

Аргон, ввиду своей неактивности и низкой теплопроводности, используется в смеси с азотом для наполнения электрических ламп. Аргонem наполняют трубки для световых реклам, при этом они светятся *голубым* цветом. Еще аргон используют в химической лабораторной практике. В промышленности он нашёл свое применение для термической обработки легкоокисляемых металлов. Аргон создаёт защитную атмосферу, в которой можно производить сварку или резку редких и цветных металлов, плавку вольфрама, титана, циркония. Для контроля вентиляционных систем применяют радиоактивный изотоп аргона.

Гелий – инертный газ, используется в качестве низкотемпературного хладагента, например для получения сверхпроводимости. Жидкий гелий используется при изучении многих явлений, например, сверхпроводимость в твердом состоянии. Тепловое движение атомов и свободных электронов в твердых телах практически отсутствует при температуре жидкого гелия.

Кроме того, жидкий гелий выгоден для охлаждения магнитных сверхпроводников, ускорителей частиц и других устройств. Довольно необычным применением гелия в качестве хладагента, является процесс непрерывного смешения ^3He и ^4He , для создания и поддержания температур ниже $0,005\text{ K}$.

Гелий светится *ярко-жёлтым* светом, это объясняется тем, что в его сравнительно простом спектре, двойная жёлтая линия преобладает над всеми другими. Жидкий гелий применяется в качестве хладагента в различных исследованиях, поскольку температура кипения этого газа составляет $-268,9^\circ\text{C}$.

Другие применения гелия – для газовой смазки подшипников, в счетчиках нейтронов (гелий-3), газовых термометрах, рентгеновской спектроскопии, для хранения пищи, в переключателях высокого напряжения. В смеси с другими благородными газами гелий используется в наружной рекламе (в газоразрядных трубках).

Неон светится *огненно красным* светом, так как его самые яркие линии находятся в красной области спектра.

Криптон и **ксенон** обладают еще меньшей теплопроводностью, чем аргон, поэтому наполненные ими электрические лампы долговечнее и экономичнее, чем таковые, наполненные азотом или аргоном.

3.2.2. Искусственные газообразные диэлектрики

Фреоны - производные метана CH_4 или этана C_2H_6 , в которых атомы водорода замещены атомами фтора или хлора. Например, дихлорфторметан CCl_2F_2 (фреон-12) применяется в холодильной технике.

Элегаз (также гексафторид серы или шестифтористая сера, SF_6) – неорганическое вещество, при нормальных условиях тяжёлый газ, в 5 раз тяжелее воздуха (плотность 6,7 против 1,29 у воздуха). Соединение было впервые получено и описано в 1900 году. Название «элегаз» шестифтористая сера получила от сокращения «электрический газ». При рабочих давлениях и обычной температуре элегаз – бесцветный газ, без запаха, не горюч. Он нетоксичен, химически стоек, не разлагается при нагреве до 800°C .

Наибольшее распространение элегаз получил в герметизированных установках для заполнения высоковольтных высокочастотных конденсаторов, рентгеновских трубок, мощных трансформаторов.

Элегаз не стареет, т. е. не меняет своих свойств с течением времени, при электрическом разряде распадается, но быстро рекомбинирует, восстанавливая первоначальную диэлектрическую прочность.

Преимуществами кабеля, заполненного элегазом, является малая электрическая емкость, то есть пониженные потери, хорошее охлаждение, сравнительно простая конструкция. Такой кабель представляет собой стальную трубу, заполненную элегазом, в которой при помощи электроизоляционных распорок укреплена проводящая жила. Заполнение элегазом трансформаторов делает их взрывобезопасными. Элегаз используется в высоковольтных выключателях, так как обладает высокими дугогасящими свойствами.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение диэлектрика.
2. Что такое поляризация диэлектрика?
3. Что характеризует диэлектрическая проницаемость?
4. Какой характер электропроводности диэлектриков?
5. Что такое диэлектрические потери?
6. Какие существуют виды пробоя диэлектриков?
7. Опишите основные механические свойства диэлектриков.
8. Какие материалы называются хрупкими?
9. Какие материалы называются пластичными?
10. Каковы термические свойства диэлектриков?
11. Что такое нагревостойкость электрической изоляции?
12. Дайте характеристику физико-химическим свойствам диэлектриков.
13. Как определяется влагостойкость диэлектрика?
14. На какие группы разделяют газообразные диэлектрики?
15. Какие электротехнические свойства у воздуха?
16. Какие электротехнические свойства у азота?
17. Какие электротехнические свойства у водорода?
18. Какие электротехнические свойства у инертных газов?
19. Какой цвет свечения у инертных газов?
20. Что такое фреон и какое его основное применение?
21. Опишите свойства элегаза.

3.3. Жидкие диэлектрики

Жидкие диэлектрики применяются в электроизоляционной технике в качестве пропитывающих и заливочных составов при производстве электро- и радиотехнической аппаратуры: в электрических аппаратах высокого напряжения, а также в блоках электронной аппаратуры. По применению они делятся на жидкости для конденсаторов, трансформаторов, кабелей, циркулярных систем охлаждения выпрямительных установок и турбогенераторов, масляных выключателей. Применение электроизоляционных жидкостей позволяет обеспечить

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

Жидкие диэлектрики – *минеральные масла, синтетические жидкости, смолы, лаки*. Применяются в масляных трансформаторах, выключателях, кабелях и конденсаторах. В трансформаторах масло служит для изоляции токоведущих частей и охлаждения путем конвекции (перенос тепла при циркуляции масла); в масляных выключателях – для гашения электрической дуги при разрыве цепи; в кабелях и конденсаторах – для пропитки бумажной изоляции. Основные классы жидких диэлектриков представлены в виде схемы на рис. 3.2.

Основными характеристиками диэлектрических жидкостей являются *диэлектрическая проницаемость, электропроводность и электрическая прочность*.

По химической природе жидкие диэлектрики разделяют на нефтяные масла, растительные масла и синтетические жидкости.

3.3.1. Нефтяные масла

Нефтяные масла представляют собой смесь углеводородов. Выделенные фракции представляют собой сложную смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматического рядов

Нефтяные масла – слабовязкие, практически неполярные жидкости, их получают фракционной перегонкой нефти. По химическому составу представляют смесь различных углеводородов парафинового, нафтенового, ароматического и нафтено-ароматического рядов с небольшой примесью других компонентов, содержащих атомы серы, кислорода, азота и с присадками (до 1% масс), улучшающими их стойкость к термоокислительному старению, а также температурно-вязкостные характеристики. По применению различают трансформаторное, конденсаторное и кабельное масла, отличающиеся степенью очистки.

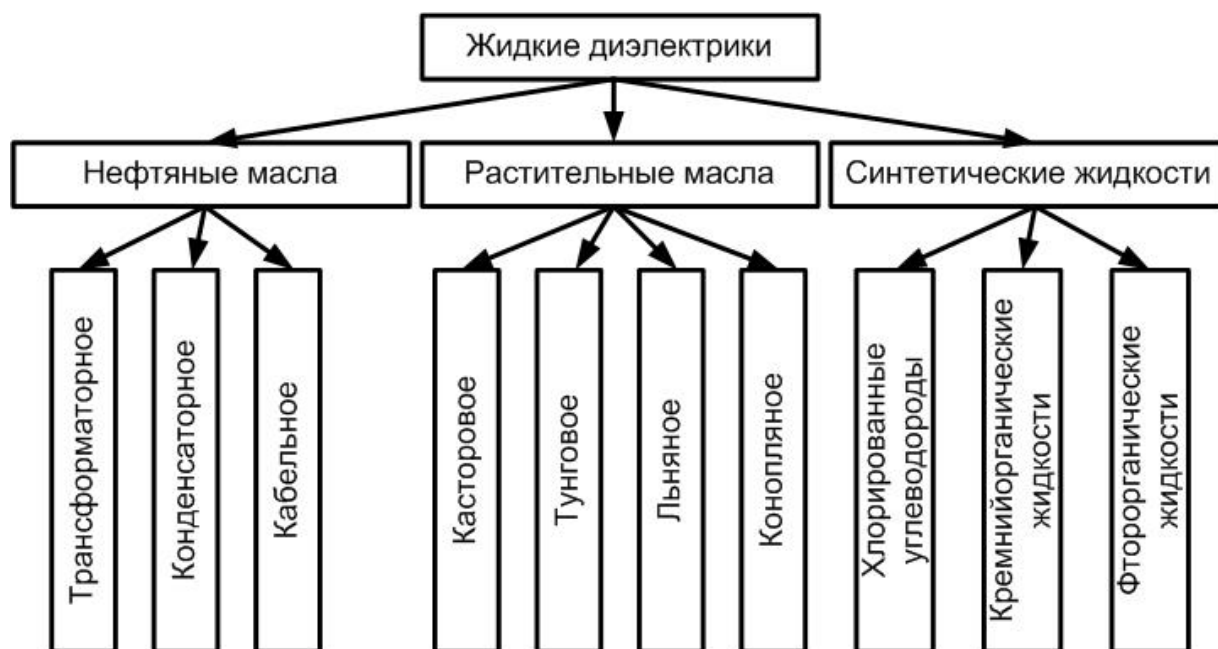


Рис. 3.2. Основные классы жидких диэлектрических материалов

Трансформаторное масло применяют для заливки силовых трансформаторов с целью повышения электрической прочности за счет заполнения пор волокнистой изоляции и промежутков между её слоями, для заливки высоковольтных выключателей, где масло оказывает дугогасящее действие.

Конденсаторное масло получают из трансформаторного путем его более глубокой очистки адсорбентами. Его электрические свойства лучше, чем у трансформаторного масла. Его используют для пропитки бумажной изоляции конденсаторов с целью увеличения их удельного сопротивления и электрической прочности, что позволяет увеличить ёмкость и уменьшить габариты конденсаторов.

Кабельное масло используют для пропитки бумажной изоляции высоковольтных кабелей с рабочим напряжением до 35 кВ в свинцовой или алюминиевой оболочке, а также для заполнения металлических оболочек маслonaполненных кабелей на напряжение до 110 кВ и выше.

Нефтяные масла – это неполярные диэлектрики с электронной поляризацией и ионной проводимостью. В неполярных жидкостях диссоциация молекул незначительна, число носителей заряда невелико и проводимость мала. Источниками ионов могут быть различные

примеси и влага. Диэлектрические потери в нефтяных маслах невелики, они обусловлены током сквозной проводимости.

Свойства масел зависят от температуры. При повышении температуры уменьшается их вязкость и плотность, возрастают подвижность ионов, диссоциация молекул примеси и ионная проводимость.

К достоинствам нефтяных масел относятся высокие электроизоляционные свойства, доступность и невысокая стоимость.

Недостатки нефтяных масел:

- лёгкая воспламеняемость;
- сильная зависимость вязкости от температуры: при понижении температуры от 100°C до -35°C вязкость увеличивается в 1800 раз;
- сильная зависимость электрической прочности от содержания примесей и влаги;
- склонность к старению.

Старение масел заключается в разложении углеводородов и их окислении. При этом образуются полярные продукты, разрушающие изоляцию, увеличивается вязкость, ухудшаются диэлектрические свойства, понижается температура вспышки. Старение ускоряется от кислорода воздуха, света, тепла, электрических полей. Для повышения устойчивости к старению в масло добавляют ингибиторы, замедляющие старение (антиоксиданты). Применяют также герметизацию электрооборудования.

3.3.2. Растительные масла

К растительным маслам относятся *касторовое, тунговое, льняное, конопляное*.

Растительные масла – слабополярные диэлектрики, вязкие жидкости, получаемые из семян различных растений. Из этих масел особенно важны высыхающие масла, способные под воздействием нагрева, освещения, соприкосновения с кислородом воздуха и других факторов переходить в твёрдое состояние. Используются в качестве пленкообразующих в лаках (в том числе электроизоляционных), эмалях и красках.

Тонкий слой масла, налитый на поверхность какого-либо материала, высыхает и образует твёрдую, блестящую, прочно пристаю-

щую к подложке электроизоляционную плёнку. Высыхание масел является сложным химическим процессом, связанным с поглощением маслом некоторого количества кислорода из воздуха.

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.

Отверждённые плёнки высыхающих масел в тяжёлых 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 отверждённая плёнка не размягчается. Наиболее распространённые высыхающие масла - льняное и тунговое.

Льняное масло золотисто-жёлтого цвета получается из семян льна. Его плотность 930...940 кг/м³, температура застывания – около -200°С.

Тунговое (древесное) масло получают из семян тунгового дерева, которое разводится на Дальнем Востоке и на Кавказе. Тунговое масло не является пищевым и даже токсично. Плотность тунгового масла составляет 940 кг/м³, температура застывания – 0...-50°С.

По сравнению с льняным маслом тунговое высыхает быстрее. Оно даже в толстом слое высыхает равномерно и даёт более водонепроницаемую плёнку, чем льняное. Высыхающие масла применяются в электропромышленности для изготовления электроизоляционных масляных лаков, лакотканей, для пропитки дерева и для других целей. В последнее время наблюдается тенденция к замене высыхающих масел синтетическими материалами. Невысыхающие масла могут применяться в качестве жидких диэлектриков.

Касторовое масло получается из семян клещевины; иногда используется для пропитки бумажных конденсаторов. Плотность касторового масла 950...970 кг/м³, температура застывания от минус 10 до минус 180°С, $E_{пр}=15...20$ МВ/м. Касторовое масло не растворяется в бензине, но растворяется в этиловом спирте.

Касторовое масло имеет высокую нагревостойкость и используется как пластификатор и для пропитки бумажных конденсаторов.

Конопляное масло – это продукт, получаемый из промышленных сортов конопли, в которых не содержатся психоактивные веще-

ства, влияющие на нервную систему. Плотность конопляного масла 927...933 кг/м³, температура застывания – минус 15°С. По химическому составу конопляное масло ближе других к льняному маслу и в ряде случаев может его заменить в производстве олифы, лака и краски, так как конопляное масло – высыхающее.

3.3.3. Синтетические жидкие диэлектрики

Наибольшее применение получили синтетические жидкости на основе хлорированных углеводородов (совол, совтол), что связано с их высокой термической устойчивостью, электрической стабильностью, негорючестью, а также кремнийорганические и фторорганические жидкости.

Применяются для наполнения небольших трансформаторов, блоков электронного оборудования и других электрических аппаратов в тех случаях, когда рабочие температуры велики для других видов жидких диэлектриков. Некоторые перфторированные жидкие диэлектрики могут использоваться для создания испарительного охлаждения в силовых трансформаторах. Недостатки – токсичность некоторых видов фторорганических жидкостей, высокая стоимость. Жидкие диэлектрики находят применение и для заливки герметичных кожухов, в которых располагаются блоки электронной аппаратуры. Однако, в связи с токсичностью хлорированных углеводородов их применение сначала ограничивалось, а в настоящее время запрещено, хотя в эксплуатации еще имеется их значительное количество.

Хлорированные углеводороды – это продукты хлорирования дифенила (C₁₂H₁₀). Применяются полихлордифенил C₁₂H₅Cl₅ – *совол*, а также раствор совола в трихлорбензоле – *совтол*.

Хлорированные углеводороды относятся к полярным диэлектрикам, наряду с молекулами примесей могут диссоциировать и их собственные молекулы, что приводит к большей электропроводности ($\rho = 1009...1011 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Диэлектрическая проницаемость имеет более высокие значения ($\epsilon \approx 5,0$), чем у нефтяных масел.

При повышении температуры и частоты поля диэлектрические потери сильно увеличиваются, поэтому частотный диапазон приме-

нения этих жидкостей ограничен низкими частотами. Электрическая прочность большинства жидкостей на основе хлорированных углеводов составляет $E_{пр}$ до 18...20 МВ/м.

Совол применяется, главным образом, для пропитки конденсаторной бумаги, это позволяет повысить емкость конденсатора на 50%. К числу его преимуществ относится более высокая стабильность в сильных электрических полях, стойкость к старению, негорючесть, пожаробезопасность. Недостатком совола является высокая температура застывания ($T_3 = -8^\circ\text{C}$), что ограничивает его применение.

Совтол имеет меньшую, чем у совола вязкость и температуру застывания ($T_3 = -35^\circ\text{C}$), применяется как заменитель трансформаторного масла.

Основной недостаток хлорированных углеводов – токсичность.

Кремнийорганические жидкости – это полимеры, линейные молекулы которых содержат силоксанную группу $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$, где атомы кремния связаны с органическими радикалами: $-\text{CH}_3$ (метил), $-\text{C}_2\text{H}_5$ (этил) и др. По своим диэлектрическим характеристикам полисилоксановые жидкости близки к неполярным диэлектрикам:

$$\varepsilon = 2,4 \dots 2,5;$$

$$\text{tg}\delta \approx 3 \cdot 10^{-4};$$

$$\rho = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$E_{пр} = 18 \dots 20 \text{ МВ/м.}$$

Они отличаются повышенной нагревостойкостью ($T_{всп} > 300^\circ\text{C}$), низкой температурой застывания ($T_3 = -60^\circ\text{C}$), низкой гигроскопичностью, нетоксичностью, высокой стабильностью свойств при изменении температуры. Эти жидкости используются в импульсных трансформаторах, специальных конденсаторах, радиоэлектронной аппаратуре.

Фторорганические жидкости представляют собой молекулярные соединения фтора с углеродом (например, C_8F_{16}). Это неполярные диэлектрики:

$$\varepsilon = 1,9 \dots 2,0;$$

$$\text{tg}\delta = (1 \dots 2) \cdot 10^{-4};$$

$$\rho = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$E_{пр} = 14 \dots 18 \text{ МВ/м.}$$

Их основными особенностями являются негорючесть, высокая нагревостойкость (до 500°С) и дугостойкость, малая гигроскопичность, низкие диэлектрические потери и стабильность свойств, в том числе вязкости, до высоких температур. Фторорганические жидкости применяются для заполнения электрической аппаратуры при высоких рабочих температурах. Обладая высокой теплопроводностью, они обеспечивают интенсивное охлаждение в силовых трансформаторах.

Некоторые виды фторорганических жидкостей токсичны, взаимодействуют с резинами, медью.

Вопросы для самопроверки

1. Какие категории жидких диэлектриков вы знаете?
2. Приведите основные характеристики диэлектрических жидкостей.
3. Дайте определение нефтяных масел.
4. Перечислите основные достоинства и недостатки нефтяных масел.
5. В чём заключается процесс старения нефтяных масел?
6. Дайте определение растительных масел. Основное применение.
7. Как образуется отверждённая диэлектрическая плёнка?
8. Каковы основные особенности синтетических жидких диэлектриков.
9. Как применяются хлорированные углеводороды в электротехнике?
10. Сравните кремнийорганические и фторорганические жидкости.

3.4. Твердые диэлектрические материалы

Большинство диэлектриков в природе – твёрдые. Различают органические и неорганические диэлектрические материалы. Среди органических диэлектриков наибольшее распространение получили полимерные материалы. Они подразделяются по размерам молекул на низкомолекулярные и высокомолекулярные. Последние в свою оче-

редь делятся по форме молекул на термопластичные и термореактивные, а по электрофизическим свойствам на полярные и неполярные.

3.4.1. Твердые неорганические диэлектрики

3.4.1.1. Слюда

Слюда представляет собой природный минерал с характерным слоистым строением, позволяющим расщеплять кристаллы слюды на тонкие листочки – пластины толщиной до 0,005 мм. Склеивая листочки слюды клеящими смолами или лаками, получают твердую или гибкую слюдяную изоляцию для обмоток электрических машин. Слюда залегает в земле в виде жил вместе с другими минералами, такими как кварц. При разработке природной слюды и изготовлении из нее электроизоляционных материалов образуется около 90% различных отходов. Среди них мелкий отход – скрап. Из очищенного скрапа изготавливают слюдяную бумагу, из которой получают твердые и гибкие электроизоляционные материалы – слюдиниты.

По химическому составу слюда представляет собой водные алюмосиликаты. Основные диэлектрические характеристики слюды:

$$\varepsilon = 5 \dots 7;$$

$$\operatorname{tg} \delta = (5 \dots 50) \cdot 10^{-4};$$

$$\rho = 1013 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$E_{\text{пр}} = 12 \text{ МВ/м}.$$

Слюда относится к электроизоляционным материалам высшего класса нагревостойкости: температура начала резкого ухудшения свойств составляет 700...900°C. Слюда применяется для конденсаторов, штампованных деталей электронных и осветительных ламп, для изоляции коллекторных пластин электрических машин.

3.4.1.2. Стекла

Стекла - материалы аморфного строения, состоящие из оксидов различных элементов. В качестве стеклообразующих оксидов используются SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 , P_2O_5 . Наибольшее распространение получили силикатные стекла на основе двуокиси кремния SiO_2 , благодаря химической стойкости, дешевизне и доступности сырья.

При охлаждении расплава имеются две характерные точки: температура текучести T_T , выше которой стекло проявляет текучесть, и температура стеклования T_c , ниже которой проявляется хрупкость стекла. Для большинства силикатных стекол $T_T=900...700^\circ\text{C}$, $T_c=600...400^\circ\text{C}$. Интервал температур между T_T и T_c называют интервалом размягчения, когда стекло обладает пластичными свойствами. Чем шире интервал размягчения, тем технологичнее стекло.

Формовку изделий осуществляют путем выдувания, центробежного литья, вытяжки, прессования, прокатки, отливки и т.д. Изготовленные изделия подвергают отжигу для снятия внутренних напряжений. При отжиге изделие нагревают до $300...400^\circ\text{C}$ и медленно охлаждают.

Группы силикатных стекол:

– *щелочные стекла* - это большинство обычных стекол, в которых помимо стеклообразующих оксидов содержатся оксиды щелочных металлов (Na_2O , K_2O), понижающие интервал размягчения стекла. Они отличаются пониженными электрическими свойствами, невысокой нагревостойкостью, но легко обрабатываются;

– *бесщелочные стекла* не содержат оксидов щелочных металлов. Стекла данной группы обладают более высокой нагревостойкостью и высокими электрическими свойствами;

– *щелочные стекла с добавлением оксидов тяжелых металлов* (PbO , BaO и др.) удовлетворительно обрабатываются, а по электрическим свойствам приближаются к бесщелочным стеклам.

Стекла - это неорганические диэлектрики. По механическим свойствам они обладают высокой прочностью на сжатие, но малой прочностью на растяжение, твердостью в сочетании с хрупкостью. Оптические свойства стекол характеризуются прозрачностью, коэффициентом преломления и т.д. Их электрические свойства зависят от состава и меняются в следующих пределах:

$$\varepsilon = 3,8...16;$$

$$\text{tg}\delta = (1...100) \cdot 10^{-4};$$

$$\rho = 106...1016 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$E_{\text{пр}} = 30...150 \text{ МВ/м}.$$

Наилучшими характеристиками обладает *кварцевое стекло* – материал на основе чистой двуокиси кремния SiO_2 . Его получают при температуре выше 1700°C . Стекломасса обладает очень узким интер-

валом размягчения и даже при температурах выше 1700°C имеет высокую вязкость. Основу микроструктуры кварцевого стекла составляют кремний-кислородные тетраэдры $[\text{SiO}_4]^{4-}$, которые, соединяясь друг с другом через кислородные ионы, образуют сплошные трехмерные сетки. В принципе, кварцевое стекло можно рассматривать как неорганический пространственный полимер.

Свойства кварцевого стекла:

- высокие механические свойства ($\sigma_{\text{сж}} = 2500 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{раст}} = 60 \text{ МПа}$, что в 4–5 раз выше, чем у остальных стекол);
- высокая нагревостойкость (до 1000°C);
- низкий температурный коэффициент линейного расширения ($\alpha_1 = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$);
- высокая химическая инертность;
- высокая прозрачность в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра до $\lambda = 4 \text{ мкм}$, радиопрозрачность.

Кварцевое стекло находит широкое применение во многих областях техники: в производстве лабораторной посуды (реакторы, тигли, лодочки, ампулы и т.д.), оптических линз, призм, баллонов ламп ультрафиолетового излучения, стабилизаторов частот и т.д.

Электровакуумное стекло применяется для изготовления баллонов и других деталей электровакуумных приборов. По химическому составу электровакуумные стекла относятся к группе боросиликатных ($\text{B}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) или алюмосиликатных ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) с добавками щелочных оксидов. Для них важное значение имеет температурный коэффициент линейного расширения, который должен быть близок к α_1 соответствующего металла. Электровакуумные стекла подразделяются на:

платиновые – $\alpha_1 = (8,5 \dots 9,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;

молибденовые – $\alpha_1 = (4,6 \dots 5,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;

вольфрамовые – $\alpha_1 = (3,5 \dots 4,2) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Изоляторные стекла используются для герметизации вводов металлических корпусах различных приборов (конденсаторов, диодов, транзисторов, и др.). Для таких проходных изоляторов в полупроводниковых приборах применяют щелочное силикатное стекло.

Цветные стекла – обычные силикатные стекла с добавками, придающими стеклам соответствующую окраску: CaO – синюю,

Cr_2O_3 – зеленую, MnO_2 – фиолетовую и коричневую, UO_3 – желтую, что используется при изготовлении светофильтров, эмалей и глазурей.

Лазерные стекла применяются в качестве рабочего тела в твердых лазерах. Центрами излучения являются активные ионы, равномерно распределенные в диэлектрической, прозрачной матрице. Наиболее часто применяют баритовый крон ($\text{BaO-K}_2\text{O-SiO}_2$), активированный ионами неодима Nd^{3+} . Преимущество лазерных стекол перед монокристаллами – оптическая однородность, изотропность свойств, высокая технологичность, низкая теплопроводность, что важно для генерации импульсов высокой мощности.

Стекловолокно получают из расплавленной стекломассы вытяжкой через фильеру с быстрой намоткой на вращающийся барабан ($d = 4...7$ мкм). Из стекловолокна методом текстильной технологии ткнут ткани, ленты, делают шланги. Преимущества стекловолокнистой изоляции состоят в высокой нагревостойкости, значительной прочности, малой гигроскопичности и хороших электроизоляционных свойствах.

Световоды используются в оптоэлектронике для передачи различной информации от источника к приемнику с помощью тончайших волокон. Отдельные волокна соединяются в световые кабели (жгуты) с внутренними межволоконными светоизолирующими покрытиями. Чтобы предотвратить прохождение света из одного волокна в другое их покрывают светоизолирующей оболочкой из стекла с меньшим показателем преломления, чем у сердцевины. Тогда световой луч, падая из среды, оптически более плотной (сердцевина), на поверхность раздела со средой, оптически менее плотной (оболочка) под углом больше предельного, будет испытывать многократное полное внутреннее отражение и пойдет вдоль волокна практически без потерь энергии.

Специальные технологические приемы (осаждение пленок на подложку, ионное легирование, ионный обмен) позволяют изготавливать плоские световоды, которые являются основой оптических интегральных схем.

3.4.1.3. Ситаллы

Ситаллы - это стеклокристаллические материалы, получаемые путем стимулированной кристаллизации стекол. В качестве катализаторов кристаллизации в стекломассу вводятся соединения с ограниченной растворимостью или легко кристаллизующиеся из расплава. К ним относятся TiO_2 , FeS , B_2O_3 , Cr_2O_3 , V_2O_5 , фториды и фосфаты щелочных и щелочноземельных металлов.

Технология получения ситаллов включает:

Получение изделия из стекломассы теми же способами, что из обычного стекла.

Отжиг при $500...700^\circ C$ для образования зародышей кристаллической фазы.

Отжиг при $900...1000^\circ C$ для роста кристаллической фазы.

По способу формирования центров кристаллизации различают термоситаллы и фотоситаллы. В термоситаллах формирование кристаллической фазы происходит в результате двойного отжига. В фотоситаллах для образования центров кристаллизации используют добавки Au , Ag , Pt или Cu . Кристаллизация инициируется под действием ультрафиолетового облучения. Структура ситаллов представляет собой смесь мелких ($0,1...1\mu m$) беспорядочно ориентированных кристаллов ($60...95\%$ кристаллической фазы) в окружении остаточного стекла ($5...40\%$ аморфной фазы). По строению ситаллы занимают промежуточное положение между стеклами и керамикой. Ситаллы отличаются от стекол тем, что имеют в основном кристаллическое строение, а от керамики – значительно меньшим размером кристаллов.

По внешнему виду ситаллы могут быть от белого и светло-бежевого до коричневого цвета. Они отличаются повышенной механической прочностью, которая мало изменяется при нагреве до $700...900^\circ C$. Диэлектрические потери в ситаллах во многом определяются свойствами остаточной фазы. Диэлектрические свойства ситаллов:

$$\varepsilon = 5...7;$$

$$\operatorname{tg}\delta = (10...800) \cdot 10^{-4} \text{ (при } f = 10^6 \text{ Гц);}$$

$$\rho = 108...1012 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$E_{\text{пр}} = 25...75 \text{ МВ/м.}$$

Ситаллы имеют температуру текучести $T_T = 1300^\circ\text{C}$, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l = (1,2...12) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Многие ситаллы обладают высокой химической стойкостью в сильных кислотах (кроме HF) и щелочах. Доступность сырья и простая технология обеспечивают невысокую стоимость изделий. Ситаллы применяются для подложек гибридных интегральных схем, тонкопленочных резисторов, деталей электровакуумных приборов, работающих в условиях глубокого вакуума, деталей СВЧ-приборов, конденсаторов.

3.4.1.4. Керамика

Электрокерамические материалы – это твердые камнеподобные вещества, которые можно обработать только абразивами. Все электрокерамические материалы по их назначению можно разделить на три группы: *изоляционная керамика, конденсаторная и сегнетозлектрическая.*

Слово «керамика» произошло от греческого «керамос» (горшечная глина). В настоящее время керамика объединяет не только глиносодержащие, но и другие материалы, сходные по своим свойствам и технологическому процессу их получения.

Технологический цикл получения керамики включает следующие основные операции:

- тонкий размол и тщательное смешивание исходных компонентов;
- пластификация массы и образование формовочного полуфабриката: в качестве пластификатора чаще всего используют поливиниловый спирт и парафин;
- формовка изделия;
- спекание (высокотемпературный обжиг при $1300...1400^\circ\text{C}$, в зависимости от состава шихты усадка после обжига составляет от 2 до 20%).

По структуре керамический материал состоит из кристаллической фазы, участки которой сцементированы аморфной стеклофазой. В керамике также присутствует газовая фаза (пористость), что способствует повышенной гигроскопичности. Для обеспечения влагонепроницаемости керамические изделия подвергают глазуровке.

По применению различают керамику установочную и конденсаторную, по величине диэлектрических потерь – низкочастотную и высокочастотную.

Установочная керамика

Установочная керамика используется для изготовления опорных, проходных, подвесных, антенных изоляторов, подложек интегральных микросхем, ламповых панелей, корпусов резисторов, каркасов индуктивных катушек, оснований электрических печей и др.

Изоляторный фарфор (электрофарфор) – это керамический материал на основе глины, кварцевого песка, полевого шпата, низкочастотный диэлектрик:

$$\varepsilon = 8,5;$$

$$\operatorname{tg}\delta = 10^{-2};$$

$$\rho = 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$E_{\text{пр}} = 20 \text{ МВ/м.}$$

После обжига основной кристаллической фазой является муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Промежутки между кристаллическими зернами заполнены стекловидной фазой полевого шпата. Главной областью применения электротехнического фарфора является производство штыревых, подвесных, опорных, опорно-штыревых, проходных высоковольтных изоляторов и вводов на напряжение до 500 кВ и выше.

Ультрафарфор – высокочастотная установочная керамика, содержит более 80% Al_2O_3 + бариевое стекло ($\text{SiO}_2 + \text{BaO}$). Ультрафарфор сочетает низкие диэлектрические потери ($\operatorname{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-4}$) с высокой механической прочностью. Бариевое стекло улучшает электрические свойства и ускоряет спекание, образуя жидкую фазу в процессе обжига, в результате получается плотная керамика.

Корундовая керамика (алюминоксид), состоящая из 95...99% $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$, – высокочастотный диэлектрик ($\operatorname{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$). Используется в качестве вакуумплотных изоляторов в корпусах полупроводниковых приборов, подложек интегральных микросхем, внутриламовых изоляторов. Разновидностью алюминоксида является *поликор*, обладающий особо плотной структурой. Поликор прозрачен, поэтому он используется для изготовления колб некоторых источников света.

Брокерит – керамика на основе оксида бериллия (95...99% BeO), обладает самой высокой теплопроводностью среди неметаллических

материалов ($200\text{...}250 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$), высоким удельным сопротивлением ($\rho = 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$), малыми диэлектрическими потерями ($\text{tg}\delta < 3 \cdot 10^{-4}$). Металлизация изделий из брокерита обеспечивает получение вакуумплотных спаев с медью и коваром. Помимо подложек для интегральных микросхем брокеритовую керамику применяют в особо мощных приборах СВЧ.

Цельзиановая керамика содержит синтезированное соединение $\text{BaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ (цельзиан), углекислый барий (BaCO_3) и каолин ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), которые при обжиге дополнительно образуют кристаллическую фазу цельзиана и высокобариевое алюмосиликатное стекло. Особенности этого материала являются низкие температурные коэффициенты линейного расширения ($\alpha_l = 2 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) и относительной диэлектрической проницаемости ($\alpha_\epsilon = 6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$), высокая электрическая прочность ($E_{\text{пр}}$ до 45 МВ/м). Цельзиановая керамика применяется для каркасов высокостабильных катушек индуктивности, изоляторов и высокочастотных конденсаторов большой реактивной мощности.

Стеатитовая керамика в основе содержит природный минерал тальк ($3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$). Основной кристаллической фазой, образующейся при обжиге, является ($\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$). Преимуществами стеатитовой керамики являются незначительная усадка при обжиге ($1\text{...}1,5\%$) и малая абразивность. Применяется для высокочастотных проходных изоляторов, опорных плат, деталей корпусов полупроводниковых приборов, а также в виде пористой вакуумной изоляции внутри ламп. Недостатком стеатита является невысокая стойкость к резким изменениям температуры и узкий температурный интервал спекания при обжиге ($1330\text{...}1350^\circ\text{C}$).

Форстеритовая керамика ($2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$) применяется для изготовления изоляторов вакуумных и полупроводниковых приборов, когда требуется вакуумплотный спай с металлом, (например, с медью), имеющий повышенный температурный коэффициент линейного расширения.

Конденсаторная керамика

Конденсаторная керамика должна обладать:

- высокой относительной диэлектрической проницаемостью для обеспечения наибольшей емкости конденсатора при минимальных размерах;

- слабой зависимостью ε от температуры (температурный коэффициент диэлектрической проницаемости α_ε должен быть близок к нулю);
- малыми диэлектрическими потерями;
- минимальной зависимостью ε и $\operatorname{tg}\delta$ от напряженности электрического поля;
- высокими значениями ρ , ρ_s , $E_{\text{пр}}$.

Титановая керамика (тиконды) - керамика на основе рутила TiO_2 ($\varepsilon = 114$, $\alpha_\varepsilon = -850 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), титаната стронция SrTiO_3 и перовскита CaTiO_3 . Для этих материалов главную роль играют электронная и ионная поляризация: $\varepsilon = 10 \dots 230$, $\operatorname{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-4}$. Тиконды используются для высокочастотных конденсаторов, от которых не требуется стабильности емкости при изменении температуры. Их недостатками являются пониженная электрическая прочность $E_{\text{пр}} = 8 \dots 12 \text{ МВ/м}$, подверженность электрохимическому старению при длительной выдержке под постоянным напряжением, высокое отрицательное значение $\alpha_\varepsilon = -(1500 \dots 3000) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Используется также титано-циркониевая керамика ($\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$), (CaTiO₃-CaZrO₃), лантановая керамика (LaAlO₃-CaTiO₃), станнатная керамика (CaSnO₃-CaTiO₃-CaZrO₃).

Все перечисленные виды конденсаторной керамики по структуре являются твердыми растворами. Изменяя состав твердых растворов, можно получить незначительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости как с положительным, так и с отрицательным знаком - такая керамика используется для изготовления высокочастотных термостабильных конденсаторов.

3.4.1.5. Активные диэлектрики

Активные диэлектрики – это органические и неорганические материалы, свойствами которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий, используя эти воздействия для создания функциональных элементов электроники.

К ним относятся сегнето-, пьезо-, пироэлектрики, электреты, материалы квантовой электроники, жидкокристаллические, электро-, магнито- и акустооптические материалы и др.

Резкой границы между пассивными и активными диэлектриками не существует. Один и тот же материал может выполнять пассивные (изолятор, подложка, конденсатор) и активные функции преобразующего элемента.

Активные диэлектрики часто классифицируют по роду физических эффектов, которые можно использовать для управления их свойствами. Однако один и тот же материал может проявлять чувствительность к различным видам энергетических воздействий. Наиболее универсальны сегнетоэлектрики (они же пьезо-, пироэлектрики, нелинейнооптические материалы и т. д.)

Активные диэлектрики по важнейшим свойствам подразделяются на сегнето-, пьезо- и пироэлектрики.

Сегнетоэлектрики

Это вещества, обладающие спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля.

В отсутствие электрического поля сегнетоэлектрики имеют доменную структуру с различным направлением электрических моментов доменов. Суммарная поляризация может быть равна нулю. Внешнее электрическое поле изменяет направление электрических моментов, что создает эффект сильной поляризации. Поэтому значение диэлектрической проницаемости ϵ может вырасти до сотен тысяч. Следствием доменного строения сегнетоэлектриков является нелинейная зависимость их электрической индукции от напряженности внешнего электрического поля и наличием диэлектрического гистерезиса.

При отключении внешнего поля индукция не понизится до нуля, а примет некоторое значение. При изменении полярности поля оно быстро снизится и изменит свое направление. При повышении температуры доменная структура распадается. Температура фазового перехода называется сегнетоэлектрической точкой Кюри T_C . В точке Кюри диэлектрическая проницаемость ϵ максимальна. Для BaTiO_3 T_C равна 120°C .

Существует несколько сотен соединений со свойствами сегнетоэлектриков. Это могут быть *ионные* и *дипольные* кристаллы. Температура точки Кюри изменяется от 15К ($\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_4$) до 1483К (LiNbO_3).

Ионными кристаллами являются BaTiO_3 , PbTiO_3 , KNbO_3 , LiTaO_3 , а дипольными – сегнетовая соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), KH_2PO_4 , NaNO_2 .

Сегнетоэлектрики применяются для изготовления:

- малогабаритных конденсаторов с большой удельной емкостью;
- диэлектрических усилителей, модуляторов;
- ячеек памяти в вычислительной технике;
- пьезоэлектрических и пирозэлектрических преобразователей.

Для изготовления конденсаторов используются *сегнетокерамические* материалы (твердые растворы, смеси кристаллических фаз), которые не имеют сильных температурных зависимостей. Примером служит материал Т-900 (это твердый раствор SrTiO_3 и $\text{Vt}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$).

Точка Кюри этого материала составляет 140°C , а диэлектрическая проницаемость ϵ при 20°C равна 900. Материал СМ-1 ($\text{BaTiO}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{Vt}_2\text{O}_3$) используют для малогабаритных конденсаторов. Его диэлектрическая проницаемость ϵ при 20°C равна 3000. Материал Т-9000 (твердый раствор $\text{BaTiO}_3\text{-BaZrO}_3$) используют для высоковольтных конденсаторов, ϵ при 20°C равна 8000.

У материалов для варикондов (нелинейных конденсаторов), применяемых для управления параметрами электрических цепей, диэлектрическая проницаемость ϵ изменяется в 4...50 раз (твердые растворы $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$, $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr}, \text{Sn})\text{O}_3$).

В качестве материалов для ячеек памяти используют сегнетоэлектрики с прямоугольной петлей гистерезиса. В первую очередь это триглицинсульфат.

При значении $E = 0$ возможны два устойчивых состояния, которые используются для хранения «1» и «0». Считывание информации может проводиться без её разрушения – оптическим методом или измерением сопротивления полупроводниковой пленки, нанесенной на сегнетоэлектрик. Время переключения ячейки – несколько микросекунд (меньше, чем в монокристаллах).

Электрооптические кристаллы изменяют показатель преломления среды n под влиянием внешнего электрического поля E . Если $n \sim E$, то электрооптический эффект является линейным (эффект Показеля), а если $n^2 \sim E$, то квадратичным (эффект Керра).

Электрооптический эффект используется для модуляции лазерного излучения. Электрооптические модуляторы света создаются на базе соединений LiNbO_3 , KH_2PO_4 и $\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Zr})\text{O}_3$.

Материалы нелинейной оптики используют эффект нелинейной поляризации среды под действием мощных световых пучков, создаваемых лазерами (показатель преломления среды n зависит от длины световой волны). Это позволяет преобразовывать частоты оптических сигналов (ИК-излучение переводить в видимое излучение). Для изготовления материалов нелинейной оптики эффективны соединения KH_2PO_4 , LiNbO_3 и др.

Пьезоэлектрики

Это материалы с сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом – поляризацией диэлектриков под действием механических напряжений. Явление открыто в 1880 г. братьями Кюри. Эффект обратим: при изменении E меняются геометрические размеры пьезоэлектрика.

Пьезоэлектриками могут быть либо ионные, либо сильно поляризованные диэлектрики, у которых отсутствует центр симметрии в структуре и которые имеют высокое удельное электрическое сопротивление.

Известно более 1 тыс. пьезоэлектриков. Однако чаще всего используется монокристаллический кварц (β -кварц, устойчив до температуры 573°C). Это *горный хрусталь*. Атомы Si в структуре кварца располагаются по винтовой линии. Кроме кварца, используются Li_2SO_4 , сегнетова соль, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, LiNO_3 , LiTaO_3 .

Большое распространение для изготовления активных элементов большого размера и сложной формы получила *пьезокерамика* (поляризованная сегнетокерамика). Из пьезокерамики на основе соединения PbZrO_3 - PbTiO_3 изготавливают гидролокаторы, микрофоны, ультразвуковые генераторы, телефоны, детонаторы для оружия и поджига газовых смесей.

Плоскопараллельная кварцевая пластина с электродами представляет собой пьезоэлектрический резонатор, т. е. колебательный контур с определенной частотой колебаний. Используется как высокочувствительный детектор для газоанализаторов.

Пироэлектрики

Пироэлектрический эффект – это изменение спонтанной поляризованности $P_{\text{спон}}$ при изменении температуры T . При постоянной температуре спонтанный электрический момент диэлектрика скомпенсирован.

Пироэлектрическими свойствами обладают LiSO_4 , турмалин, триглицинсульфат (ТГС) и др. Для ТГС пироэлектрический коэффициент равен $360 \text{ мкКл/м}^2 \text{ К}$, т. е. для пластинки толщиной 1 мм при нагреве ее на 1°C приобретенный заряд обеспечивает разность потенциалов 1600 В.

Пироэлектрики используются для датчиков ИК- и СВЧ- излучения. Они недороги, имеют широкий спектральный диапазон чувствительности, не требуют охлаждения, имеют быстроедействие до 10 мкс, однако не избирательны и уступают по чувствительности полупроводникам.

Электреты

Электреты – это диэлектрики, длительно сохраняющие поляризацию и создающие в связи с этим электрическое поле в окружающем пространстве (аналог постоянного магнита). Среди них выделяют термо-, фото- и электроэлектреты.

Термоэлектреты получают в сильном электрическом поле с охлаждением (смесь канифоли и пальмового воска).

Фотоэлектреты производят при одновременном воздействии электрического поля и света (CdS, сера). Работают в темноте.

Электроэлектреты (коронозлектреты) получают в сильном электрическом поле.

Воздействия на диэлектрики приводят к созданию структурных дефектов. Время жизни материалов в электретном состоянии составляет от нескольких месяцев до нескольких десятков лет и сильно зависит от температуры и влажности среды, с повышением которых это состояние может исчезнуть.

Электреты используются для изготовления микрогенераторов переменного тока, микрофонов, телефонов, дозиметров, измерителей атмосферного давления и влажности, пылеуловителей, в электрофотографии.

3.4.1.6. Жидкие кристаллы

Жидкими кристаллами называются вещества, находящиеся в промежуточном (мезофазном) состоянии между жидкостью и твердым кристаллическим телом. Обладая текучестью, имеют анизотропию оптических свойств. Были открыты в 1888 г. австрийским ботаником Рейнитцером. Это необычные вещества, которые совмещают в себе свойства кристаллического твердого тела и жидкости. Как жидкость они текучи, как кристаллы обладают анизотропией. Строение молекул жидких кристаллов таково, что концы молекул очень слабо взаимодействуют друг с другом, в то же время боковые поверхности взаимодействуют очень сильно и могут прочно удерживать молекулы в едином ансамбле.

Наибольший интерес для техники представляют холестерические жидкие кристаллы. Углы поворота осей зависят от температуры, а от угла поворота зависит окраска кристалла. Эта зависимость используется в медицине: можно непосредственно наблюдать распределение температуры по поверхности человеческого тела, а это важно для выявления скрытых под кожей очагов воспалительных процессов. Для исследования изготавливают тонкую полимерную пленку с микроскопическими полостями, заполненными холестериком. Когда такую пленку накладывают на тело, то получается цветное отображение распределения температуры. Этот же принцип используется в жидкокристаллических термометрах. Наиболее широкое применение жидкие кристаллы получили в буквенно-цифровых индикаторах электронных часов, микрокалькуляторов и т. п. Нужная цифра или буква воспроизводятся с помощью комбинации небольших ячеек, выполненных в виде полосок. Каждая ячейка заполнена жидким кристаллом и имеет два электрода, на которые подается напряжение. В зависимости от величины напряжения «загораются» те или иные ячейки. Индикаторы можно делать чрезвычайно миниатюрными, они потребляют мало энергии.

С изменением температуры меняется шаг между слоями, что ведет к изменению длины волны рассеянного излучения. Поэтому меняется цвет жидких кристаллов. Изменение цвета при изменении температуры называется термохромным эффектом и используется в цветовых термометрах для визуализации ИК- и СВЧ- излучения. Можно измерять температуру от -40 до $+250^{\circ}\text{C}$ с точностью до

0,01°C. Для получения цветных изображений в жидкие кристаллы вводят красители, молекулы которых ориентируются так же, как жидкие кристаллы.

Жидкие кристаллы используются в индикаторных устройствах (дисплеях, табло, циферблатах часов, измерительных приборах). Они имеют низкую потребляемую мощность (от 10^{-4} до 10^{-6} Вт/см), совместимы с интегральными схемами, дешёвы, используются также для изготовления электрооптических ячеек управления световым потоком в результате проявления эффекта динамического рассеяния света при изменении в жидких кристаллах электрического поля. Недостатками жидких кристаллических индикаторов является малое быстродействие, старение из-за электро- и фотохимических процессов.

3.4.1.7. Оксидная изоляция

При окислении ряда металлов на их поверхности образуется плотная пленка оксидов, которая обладает электроизоляционными свойствами. Оксидная пленка создается путем химического или электрохимического окисления металлов. Например, на алюминии при окислении его в слабых электролитах образуется тонкая ($\delta \leq 1,0$ мкм), плотная пленка оксида алюминия Al_2O_3 ($\epsilon = 10$). Такие пленки используются в электролитических конденсаторах.

Электролитическим анодным окислением алюминия в сильных электролитах (например, в 20%-ном растворе H_2SO_4) можно получить пленки толщиной до 20 мкм. Их используют для изоляции алюминиевых проводов, работающих в сухом состоянии на воздухе. Пленка не теряет своих электроизоляционных свойств при нагреве до 550°C, $E_{пр} = 45$ МВ/м.

В электролитических конденсаторах используется оксидированная фольга (алюминиевая, танталовая, титановая, ниобиевая). Наилучшими свойствами обладают танталовые конденсаторы. Их удельная емкость в 2...4 раза выше алюминиевых, так как пленка оксида Ta_2O_5 имеет $\epsilon = 30$, а сама фольга, ввиду высокой прочности тантала, в 5...10 раз тоньше алюминиевой. Кроме того, эти конденсаторы характеризуются более широким диапазоном рабочих температур (от -75°C до 200°C), большей температурно-временной стабильностью свойств и меньшими токами утечки.

Ниобиевые конденсаторы по удельной емкости примерно такие же, как и танталовые (для пленки Nb_2O_5 $\varepsilon = 30$).

Максимальную удельную емкость имеют конденсаторы на основе двуокиси титана TiO_2 , у которого $\varepsilon = 114$.

3.4.2. Твердые органические диэлектрики

Полимеры – это высокомолекулярные соединения, состоящие из большого числа повторяющихся звеньев, образованных исходными мономерами. Почти все твердые органические диэлектрики являются высокополимерными материалами. Название полимеры происходит от двух греческих слов: «поли» - много и «мерос» - часть. Действительно, молекулы полимеров состоят из большого количества частиц – десятков и сотен тысяч молекул исходных веществ – мономеров. Название «мономер» происходит от греческого слова «моно», что означает один.

Большие молекулы полимеров могут иметь форму вытянутых в длину нитей, т.е. иметь линейное строение, поэтому и называются линейными полимерами. Например: натуральный и синтетический каучуки, полиэтилен, полистирол и др.

Молекулы полимеров могут быть развиты по всем трем направлениям в пространстве, т.е. иметь пространственное (объемное) строение. Они называются пространственные полимеры. Например: синтетические смолы – бакелит, глифталь и др.

Высокополимерные вещества могут быть природными (янтарь, натуральный каучук и др.) и синтетическими (полистирол, поливинилхлорид и др.). Большая часть полимеров является аморфными веществами, и их поэтому называют смолами, некоторые из полимеров (фторопласт-4) имеют кристаллическое строение и не являются смолами.

Ввиду ограниченности свойств природных полимеров современная электротехника использует главным образом синтетические высокополимерные диэлектрики. Они могут быть получены в результате химических реакций полимеризации или поликонденсации.

Полимеризация – это процесс соединения молекул исходного (мономерного) вещества в большие молекулы высокополимерного вещества без изменения его элементарного состава.

Поликонденсация – это процесс соединения молекул исходных (мономерных) веществ в большие молекулы высокополимерного вещества с выделением побочных веществ: воды, кислот, газов и др. Поликонденсация протекает в несколько этапов.

Терморезистивными называют такие материалы, которые в своей конечной стадии производства (в готовом виде) не способны размягчаться при нагревании. Они обладают повышенной прочностью, твердостью, высокой температурой плавления. Их свойства мало зависят от температуры. Однако при высоких температурах (до $T_{пл}$) происходят необратимые структурные изменения (растрескивание, обугливание и т.п.) с потерей электроизоляционных свойств. Например, фенолформальдегидная смола в стадии бакелита, имея высокую механическую прочность, обугливается при воздействии поверхностных электрических разрядов.

Терморезистивные полимеры широко используются при производстве композиционных пластмасс.

К ним относятся: бакелитовые смолы и пластмассы на их основе (гетинакс, текстолит), глифтали и др.

Термопластичными называют такие материалы, которые не могут быть переведены в неплавкое состояние. Они при нагревании размягчаются и постепенно превращаются в густые жидкости. В зависимости от температуры они могут находиться в трех физических состояниях:

– в стеклообразном состоянии тепловое движение ограничено колебаниями атомов и боковых групп. Под нагрузкой полимер ведет себя как упругое тело, модуль упругости $E=2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^5$ МПа. При нагревании степень свободы элементов макромолекулы полимера возрастает, и полимер переходит в высокоэластичное состояние, при охлаждении – из высокоэластичного состояния в стеклообразное. Температура перехода называется температурой стеклования $T_{ст}$;

– в высокоэластичном состоянии полимер легко меняет свою форму за счет движения звеньев главной и боковых цепей. Ему свойственны большие обратимые высокоэластичные деформации. При снятии нагрузки молекулы постепенно восстанавливают свою равновесную форму. Модуль упругости высокоэластичного состояния $E \approx 10$ МПа;

– в вязкотекучем состоянии полимер «течет» под нагрузкой. Линейные молекулы легко скользят относительно друг друга. В этом состоянии при небольших нагрузках полимер проявляет необратимую пластическую деформацию, что используется для его технологической обработки.

Этим свойством термопластичных материалов пользуются при изготовлении из них гибких изделий: пленок, нитей, а также для производства деталей методом литья под давлением. К таким диэлектрикам относятся полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид и др.

3.4.2.1. Высокочастотные линейные полимеры

К высокочастотным диэлектрикам относятся неполярные линейные полимеры с электронной поляризацией: полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен (фторопласт-4), они обладают низкими диэлектрическими потерями, высоким удельным сопротивлением (табл. 3.2), слабой зависимостью свойств от температуры и частоты тока.

Таблица 3.2 – Основные свойства неполярных полимеров

Параметры	Полиэтилен	Полистирол	Фторопласт-4
ρ , Ом·м	1015	1016	1016
ϵ	2,3...2,4	2,5...2,6	1,9..2,2
$\text{tg}\delta$	2...5	2...4	2...3
$E_{\text{пр}}$, МВ/м	40...150	20...110	40...250
Нагревостойкость, °С	105...130	75...80	300

Полиэтилен – твердый непрозрачный материал белого или светло-серого цвета, несколько жирный на ощупь. Полиэтилен - продукт полимеризации этилена ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$). Обычно применяют полиэтилен низкого давления, его синтезируют при $p = 0,5$ МПа и $T = 80^\circ\text{C}$. У полученного материала степень кристалличности составляет 80...90%, его механические свойства: $\sigma_{\text{в}}=30$ МПа, $\delta = 50\%$. Электроизоляционные свойства и стойкость к воде у полиэтиленов находятся на таком же высоком уровне, как и у полистиролов. При комнатной температуре полиэтилены не растворяются ни в одном из растворителей, обла-

дают высокой стойкостью к кислотам и щелочам. Полиэтилен применяют в виде пленки, литых деталей, прессованных панелей для изоляции высокочастотных кабелей, деталей электро- и радиоаппаратуры. Полиэтилен низкого давления имеет более высокие механические свойства и более высокую температуру плавления, чем полиэтилен высокого давления. Недостатком является тепловое старение, которое приводит к образованию трещин на поверхности изделий; в сильных электрических полях происходят структурные изменения, снижающие качество изоляции. Следует отметить, что все полиэтиленовые изделия нестойки к солнечному свету. Для повышения светостойкости в них вводят сажу и другие красители.

Полистирол – твердый прозрачный материал. Он обладает высокими электроизоляционными свойствами и стоек к воде, кислотам и щелочам. Полистирол ($-\text{CH}_2-\text{CHC}_6\text{H}_5-$) более прочен, чем полиэтилен ($\sigma_{\text{в}}=60$ МПа), но склонен к образованию тончайших трещин. Его изготавливают в виде листов, гранул, порошка.

Полистирол – термопластичный диэлектрик, размягчающийся при $110-120^\circ\text{C}$. При 300°C полистирол деполимеризуется, т.е. снова переходит с исходное вещество – стирол. Допустимая рабочая температура – 70°C . Полистирол растворяется в неполярных растворителях: бензоле, толуоле, ксилоле, частично растворяется в ацетоне. Полистирол имеет высокую прозрачность (95%) и высокий коэффициент преломления ($n = 1,6$), что позволяет его использовать в качестве оптических стекол.

Из полистирола изготавливают каркасы катушек, изоляционные панели, основания и изоляторы для электроизмерительных приборов. На основе полистирола делают электроизоляционные лаки.

Из размягченного полистирола получают гибкие стирольные пленки толщиной $10...300$ мкм, которые применяют для изоляции жил высокочастотных кабелей, а также в производстве конденсаторов.

Фторопласты – кристаллические полимеры фторпроизводных этилена, где атомы водорода замещены фтором, материалом, который прочно связывается с углеродом, что повышает теплостойкость и химическую стойкость. В радиотехнике наиболее часто используют:

– *Фторопласт-4* – белый материал с высокой плотностью. Цифра 4 указывает на число атомов фтора в молекуле мономера. Выпускается также под названием фторлон-4, а за рубежом – под назва-

нием *тефлон*. Рабочий диапазон температур $-250...+250^{\circ}\text{C}$, высокие диэлектрические свойства, химически стойкий, не растворяется ни в одном растворителе, не горит, его устойчивость к химическому воздействию выше, чем у золота, платины, стекла, фарфора; не подвержен действию грибков. Недостатки: выделение ядовитого газообразного фтора при температуре 400°C , низкая радиационная стойкость, сложная технология переработки, высокая стоимость, склонность к хладотекучести.

Изготавливают тонкие конденсаторные и электроизоляционные плёнки, химическую посуду; применяют в оснастке для температурных испытаний, так, как хорошо переносит резкую смену температуры.

– *Фторопласт-3* – полимер, имеющий замену в элементарном звене одного атома фтора на атом хлора. Имеет более высокие механические свойства и влагостойкость, чем фторопласт-4; остальные свойства несколько хуже, чем у фторопласта-4, а технология получения проще. Применяют главным образом в виде суспензий для антикоррозионных покрытий.

Кремнийорганические полимеры (полисилоксаны) являются промежуточным звеном между органическими и неорганическими материалами. Могут быть термопластичными с линейным строением и терморезистивными с образованием пространственных структур. Способны длительно выдерживать температуру до 200°C и кратковременно до 500°C , имеют высокие электроизоляционные свойства, дугостойкость, не смачиваются водой, устойчивы к грибковой плесени; имеют высокую стоимость. Применяются для получения пластмасс, клеев, лаков, компаундов.

3.4.2.2. Низкочастотные линейные полимеры (полярные термопласты)

К полярным термопластам относятся поливинилхлорид, полиэтилентерефталат, полиметилметакрилат, полиамидные смолы.

Поливинилхлорид (*полихлорвинил, ПВХ*) $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$ – продукт полимеризации газообразного винилхлорида $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$. Он обладает высокой химической стойкостью в воде, кислотах и щелочах, бензине, керосине, спирте, озоне, но растворим в дихлорэтане, хлорбен-

золе, частично в ацетоне, бензоле. Для него характерна невысокая морозостойкость и нагревостойкость от -25°C до 70°C . ПВХ представляет собой порошок белого цвета, из которого получают горячим прессованием или горячим выдавливанием механически прочные изделия (платы, листы, стержни, трубы и др.), стойкие к минеральным маслам, многим растворителям, щелочам и кислотам. Виниловые изделия легко окрашиваются в различные цвета, отличаются химической стойкостью, обладают высокой механической прочностью, особенно к ударным нагрузкам и имеют хорошие электроизоляционные свойства. Поливинилхлорид часто применяют с различными пластификаторами, что позволяет получать пластифицированный хлорвинил (винипласт) различной степени эластичности (от жестких до резиноподобных). Винипласт применяют для изоляции проводов и кабелей низкого напряжения, защитных шлангов, трубок для дополнительной изоляции, липких изоляционных лент, листового и пленочного пластика. Пластифицированный поливинилхлорид получил широкое применение в производстве монтажных проводов.

Хлорированный полихлорвинил (перхлорвинил) отличается более легкой растворимостью и применяется для изоляционных химически стойких лаков и антикоррозионных покрытий. Непластифицированный полихлорвинил обладает высокой жесткостью и идет на изготовление путем литья под давлением аккумуляторных баков, изоляционных втулок, труб и других деталей. Из него изготавливают изделия, способные работать в химически агрессивных средах.

Данный материал поддается всем видам механической обработки, легко сваривается и склеивается.

Полиэтилентерефталат (лавсан) - это термопластичный полимер, полученный из этиленгликоля и глифталевой кислоты $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH})_2$. Он обладает значительной механической прочностью. При повышенных температурах лавсан быстро окисляется на воздухе, так что обработку размягченного материала проводят в атмосфере азота. Лавсан применяют в виде волокон, пленок. Пленки из лавсана используют в качестве несущей основы для магнитной ленты. Тонкие пленки используются для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов, дросселей и подобных изделий, рассчитанных на рабочую температуру от -60°C до 150°C . Применяют пленки также в конденсаторах.

Полиметилметакрилат (органическое стекло) – высокополимерный, термопластичный прозрачный материал, легко окрашиваемый во многие цвета. Используется, в основном, как декоративный материал в электро- и радиоаппаратуре.

Полиформальдегид – твердый термопластичный диэлектрик, представляет собой порошок белого цвета, из которого получают изделия с повышенными механическими характеристиками: высокая твердость, стойкость к истиранию и малый коэффициент трения.

3.4.2.3. Смолы

Глифталевые смолы

Глифталевые смолы относятся к группе полиэфирных смол (гликоль, глицерин).

Для обеспечения достаточной гибкости к смоле добавляют касторовое масло. Отличительной способностью является высокая клеящая способность, стойкость к поверхностным разрядам и повышенная нагревостойкость. Клеящие глифталевые лаки нашли большое применение для клейки слюды в производстве твердой и гибкой слюдяной изоляции (миканиты, микаленты).

Поликонденсационные смолы

В реакции поликонденсации участвуют не менее двух химических веществ. Образуются полимеры пространственной структуры, из которых получают прочные, теплостойкие терморезистивные материалы – продукты поликонденсации.

Фенолоформальдегидные смолы получают поликонденсацией фенола в водном растворе формальдегида при $t=70...90^{\circ}\text{C}$ в присутствии катализатора (кислоты или щелочи). Обладают высокой прочностью, хорошими электроизоляционными свойствами и способностью функционировать в любых климатических условиях. Эти смолы подразделяют на резольные и новолачные.

Если поликонденсация происходит с избытком формальдегида в присутствии щелочи, то получают бакелитовую смолу, которая может находиться в трех стадиях: резол, резитол, резит.

Резольные смолы – терморезистивные материалы, полярные диэлектрики. Применяются для изготовления слоистых пластиков (тек-

столита, гетинакса), для композиционных пресс-материалов (фенопластов), трубок, клеев.

Если поликонденсация проходит с избытком фенола в соляной или щавелевой кислоте, то получают твердые, хрупкие прозрачные материалы, называемые *наволаками*. Они термопластичны, растворяются в спирте, ацетоне и др. органических растворителях; имеют невысокие электроизоляционные свойства и низкую стойкость к искровым разрядам. Применяются для изготовления корпусов, приборов, плат, разъёмов, кнопок, и ручек управления радиоаппаратуры, для изготовления лака и как заменитель шеллака.

Полиэфирные смолы получают в результате поликонденсации различных многоатомных спиртов (гликоля, глицерина и др.) и многоосновных кислот. По физическим свойствам близки к природным смолам (канифоль, шеллак). Наибольшее распространение получили:

– *лавсановая смола*, ее получают поликонденсацией терефталевой кислоты и этиленгликоля. Может иметь кристаллическое или аморфное строения. Лавсан кристаллического строения применяют для изготовления волокон, пряжи, тканей, тонких изоляционных пленок и используют для изоляции проводов и кабелей. Аморфный лавсан используют для изготовления эмалированных проводов, при производстве электроизоляционных лаков;

– *глифталевая смола*, ее получают поликонденсацией трехатомного спирта глицерина и фталевого ангидрида при $t=150...200^{\circ}\text{C}$ в алюминиевых котлах. Имеют высокую нагревостойкость, гибкость и клеящую способность. Применяют как основу для клеящих, пропиточных и покрывных лаков, пленки которых стойки к нагретому минеральному маслу; для изготовления лаков, пластмасс, клеев;

– *поликарбонаты* - это полиэфирные угольной кислоты; имеют хорошие электрические и механические свойства, хорошую химическую стойкость. Применяют для изготовления слоистых пластиков, компаундов, пленок для изоляции в электрических машинах.

Кремнийорганические смолы – термореактивные полимеры с пространственной структурой; обладают высокой нагревостойкостью и хорошими диэлектрическими свойствами, химической инертностью. Применяются для изготовления стеклотекстолита, слюдяной изоляции, компаундов, лаков, эмалей, резиностеклотканей и др.

Эпоксидные смолы – получают в результате хлорирования глицеринов с многоатомными фенолами в щелочной среде. В чистом виде термопластичные низкоплавкие жидкие материалы, которые растворяются во многих органических растворителях, длительно хранятся, не меняя свойств. При добавлении отвердителей смолы образуют толстый монолитный слой изоляции без выделения побочных продуктов. Применяют для лаков, клеев, заливочных компаундов. В жидком виде эпоксидные смолы токсичны, а отвердевшие уже не оказывают на человека вредного воздействия.

Полиамиды – термопластичные полярные диэлектрики с линейной структурой. Обладают высокой механической прочностью, эластичностью и химической прочностью, не высокими электрическими параметрами. Наиболее распространены: *капрон* и *нейлон*, которые применяют для получения синтетического волокна. Полиамиды, как многие полимеры, стареют при длительном воздействии света, влаги и температуры. Их применяют в виде волокон, пленок и в качестве связующего при производстве пластмасс. Капрон, благодаря хорошим термопластичным свойствам и высокой механической прочности, используют в радиоаппаратуре (корпуса приборов, ручки и кнопки управления, каркасы катушек индуктивности и др.). Капроновое волокно применяется в качестве изоляции обмоточных и некоторых типов монтажных проводов, а также в качестве основы электроизоляционных лакированных тканей. Из капрона изготавливают дюбеля, скобки, сальники, вкладыши подшипников, шестерни, ролики транспортеров, крыльчатки вентиляторов и др.

На основе полиамидов изготавливают *эмальлаки*, создающие на металлических проводах прочные, эластичные диэлектрические покрытия. Из полиамидов изготавливают устойчивые к коррозии изолирующие крепежные винты, гайки, шайбы, детали выключателей.

Полиимиды - органические полимеры с высокой нагревостойкостью (длительно выдерживают до 300°C), с очень высокой холодностойкостью (сохраняют работоспособность до -269°C) и с хорошими диэлектрическими свойствами. Полиимидные пленки применяют в конденсаторах, в нагревостойких кабелях, в качестве подложек в микросхемах; полиимидные лаки используют для эмалирования проводов и пропитки катушек, в качестве межслойной изоляции интегральных схем.

Полиуретаны – линейные термопластичные материалы, которые после отвердевания превращаются в термореактивные полимеры. Устойчивы к окислению, действию кислот, влаги, большинству органических растворителей. Температура плавления ниже, чем у полиамидов, а электроизоляционные свойства лучше. Применяются для изготовления пряжи, ткани, нитей, лаков, компаундов, клеев, каучуков; для защиты приборов от вибрации, тепла и механических перегрузок.

Природные электроизоляционные смолы

Из природных смол, наибольшее применение в электротехнике получили канифоль, шеллак и битумы.

Канифоль представляет собой хрупкое стеклообразное вещество в виде кусков неправильной формы. Канифоль получают из сока хвойных деревьев. В состав канифоли входят смоляные кислоты: абиетиновая, колофеновая, эфирные масла и др. Канифоль относится к термопластичным материалам, размягчающимся при нагревании, и хорошо растворяется во многих растворителях: скипидаре, бензине, этиловом спирте, ацетоне, минеральном масле и др. В электротехнике канифоль применяется в качестве загустителя минеральных масел, идущих для пропитки бумажной изоляции кабелей, а также в качестве составной части масляно-канифольных заливочных электроизоляционных материалов. Канифоль находит большое применение в качестве флюса при пайке медных проводов.

Шеллак – продукт жизнедеятельности некоторых насекомых на ветвях тропических деревьев. При длительном нагревании переходит в неплавкое и нерастворимое состояние. Применяется в виде спиртового раствора для изготовления клеящих лаков, слюдяной изоляции и лакировки деталей.

Янтарь – ископаемая смола растений с температурой плавления выше 300°C. Применяется в электроизмерительных приборах.

Природные смолы представляют собой органические соединения в основном растительного и биогенного происхождения. При нагревании они размягчаются и плавятся.

Воскообразные диэлектрики. Характерными особенностями данных материалов являются их мягкость, незначительная механиче-

ская прочность и наличие жирной, плохо смачиваемой водой поверхности, вследствие чего водопоглощение этих материалов практически равно нулю. Из воскообразных диэлектриков в электротехнике находят применение *парафины, церезины и галовакс*.

3.4.3. Пластмассы

Пластическими массами называются материалы, способные в исходном состоянии приобретать пластичность, т.е. легко воспринимать заданную форму какого-либо изделия и её сохранять. Пластмассы в подавляющем большинстве являются материалами органического происхождения.

Пластические массы (пластмассы) объединяют группу твердых или упругих материалов, которые состоят полностью или частично из полимерных соединений, которые являются связующими. Пластмассы формуется в изделия методами, основанными на использовании их пластических деформаций.

Связующие вещества – природные и синтетические смолы, цемент, стекло. Содержание связующего вещества в пластмассах колеблется в пределах 30...60%.

В состав сложных пластмасс, кроме связующего вещества, входят:

1) *наполнитель* – вещество, которое вводят для придания необходимых эксплуатационных свойств (прочности, электропроводности, облегчения переработки, снижения стоимости). К наиболее распространённым наполнителям относятся: древесная или минеральная мука (порошковые наполнители), асбестовое или хлопчатобумажное волокно (волокниты), а также стекловолокно (стекловолокниты), листы бумаги (гетинаксы), различные ткани (текстолиты). Введение наполнителей уменьшает объемную усадку пластмасс, однако повышает гигроскопичность и ухудшает их электроизоляционные свойства, поэтому в пластмассах с высокими диэлектрическими характеристиками наполнитель часто отсутствует. Обычно пластмассы содержат 40...70% наполнителя;

2) *пластификатор* – вещество, которое вводят для повышения пластичности и холодостойкости. Однако большое количество пластификатора приводит к понижению теплостойкости и механической

прочности пластмасс. В качестве пластификаторов применяют маслообразные синтетические жидкости с высокой температурой кипения (стеарин, олеиновую кислоту, сульфитную целлюлозу);

3) *отвердители* (ингибитор) – ускоряет переход термореактивных пластмасс в неплавкое или термопластичных смол в твёрдое состояние;

4) *смазывающие вещества* – повышают текучесть материала при переработке и предупреждают прилипание изделия к форме (воск, стеарин, трансформаторное масло);

5) *стабилизаторы* – вещества, которые вводят для торможения процесса старения пластмасс;

б) *красители*.

Основные положительные свойства пластмасс:

- *коррозионная стойкость*. Основные виды пластмасс противостоят не только атмосферной коррозии, но и воздействию различных кислот, щелочей, солей, растворителей;
- *стойкость к износу*. Многие пластмассы отличаются низким коэффициентом трения и малым износом;
- *диэлектрические свойства*. Большинство пластмасс хорошие диэлектрики;
- *оптические свойства*. Некоторые пластмассы называются органическими стёклами. Они бесцветны, прозрачны, способны пропускать лучи света;
- *внешний вид*. Изделия из пластмасс имеют твёрдую и блестящую поверхность. Они не нуждаются в окрашивании и лакировке, т.к. в процессе производства, путём добавления различных пигментов, можно получить любые цвета и оттенки;
- *простота переработки* в изделие. Коэффициент использования материала при переработке пластмасс 0,95...0,98;
- *доступность сырья*. Синтетические пластмассы получают путём химических превращений из простых химических веществ, которые в свою очередь получают из доступных видов сырья.

Недостатки:

- *низкая теплостойкость* (работа в определённых интервалах температур);

- *низкая твёрдость*;
- *ползучесть* – непрерывная пластическая деформация материала под действием постоянной нагрузки при любой температуре;
- *прочность* – механическая прочность самых жёстких пластмасс в 1,5 раза меньше, чем у металлов;
- *старение* – изменение свойств пластмассы под действием нагрузки, теплоты, влаги, света, воды.

Пластмассы можно классифицировать по различным свойствам:

1) *по применению*:

– *конструкционные* (для изготовления корпусов приборов, ручек управления и других деталей);

– *электроизоляционные* (для каркасов катушек, панелей, плат и пр.);

– *специальные* (магнитодиэлектрики, электропроводные и др.);

2) *по нагревостойкости*:

– *класс А* – с нагревостойкостью до 120°C; к нему относятся пластмассы на основе фенол- и меламиноформальдегидных смол с органическими наполнителями, текстолит, гетинакс;

– *класс В* – с нагревостойкостью до 130 °C; к нему относятся те же пластмассы, что и в классе А, но с неорганическими наполнителями;

– *класс F* – с нагревостойкостью до 155°C; к нему относятся сложные пластики на основе стекла или асбеста;

– *класс С* – с нагревостойкостью до 180°C; к нему относятся прессованные и слоистые пластмассы на основе асбеста и стекла с кремнийорганической связкой;

3) *по химическим свойствам*:

– *термопластичные пластмассы (термопласты)* обладают способностью под действием температуры и давления плавиться и при охлаждении затвердевать, принимая требуемую форму. Изделия из термопластов могут перерабатываться многократно;

– *термореактивные пластмассы* размягчаются под действием температуры и давления и при дальнейшем нагревании необратимо переходят в неплавкое и нерастворимое состояние, сохраняя приобретенную форму. Термореактивные пластмассы не поддаются вторичной переработке;

4) по способу переработки:

- пресспорошки;
- прессматериалы;
- листовые и фасонные слоистые материалы;
- пленочные материалы;

5) по используемым связующим смолам:

- пластмассы на основе кремнийорганических, эпоксидных, фенолформальдегидных, эфирных смол.

3.4.4. Плёночные электроизоляционные материалы

Плёночными материалами считаются пластмассы, у которых толщина значительно меньше длины.

Свойства плёнок обусловлены свойствами исходных полимеров, поэтому их разделяют на несколько групп.

Неполярные плёнки

Полистирольная плёнка (ПС). Ориентированную плёнку для радиодеталей получают методом выдавливания размягченного при температуре 140...160°C блочного полистирола с одновременным растягиванием в продольном и поперечном направлениях, выпускается толщиной 0,02...0,1 мм и шириной 20...100 мм.

К достоинствам ориентированной полистирольной плёнки относят высокую влагостойкость и малые диэлектрические потери, к недостаткам – сравнительно невысокую температуру размягчения и низкую механическую прочность при нагревании.

Применяют для изготовления высокочастотных конденсаторов и кабелей.

Полиэтиленовая плёнка (ПЭ) – ориентированная толщиной 0,03...0,2 мм получают выдавливанием с одновременным растягиванием сжатым воздухом.

Полиэтиленовые плёнки обладают следующими свойствами:

- высокая морозостойкость, сохраняет основные свойства до температуры 60°C ниже нуля;
- низкая влагопроницаемость, что позволяет применять полиэтиленовую плёнку для влагозащиты соединений;

- при нагревании до температуры выше 110°C дают усадку, что обеспечивает дополнительное уплотнение изоляции обмоток;
- подвержены воздействию нефтяного масла и при достаточно высокой температуре растворяются в нем, что ограничивает их применение в конденсаторах, кабелях и монтажных проводах;
- наиболее дешевые.

Для повышения температуры размягчения и увеличения прочности на разрыв полиэтиленовые плёнки облучают электронами или α -лучами, что не вызывает изменения электрических свойств, химической стойкости и влагостойкости. Облученные (иррадированные) плёнки кратковременно выдерживают нагревание до температуры 250°C .

Полипропиленовая плёнка (ПП) выпускается толщиной от 5 мкм, ориентирована в двух направлениях. По свойствам она во многом схожа с полиэтиленовой, что объясняется сходством исходных полимеров, обладает более высокой, чем у полиэтиленовой плёнки, рабочей температурой (до $110... 130^{\circ}\text{C}$), низкой паро- и газопроницаемостью.

Применяют для изготовления высоковольтных конденсаторов в качестве комбинированной бумажно-пленочной изоляции.

Политетрафторэтиленовая плёнка (ПТФЭ) или плёнка из фторопласта-4 толщиной $0,005...0,2$ мм. Плёнку получают снятием с заготовки стружки-ленты на токарном станке. Полученная неориентированная плёнка по физико-механическим свойствам не отличается от фторопласта-4. В процессе прокатки плёнка приобретает ориентацию. При этом степень ориентации зависит от толщины плёнки. Ориентированная плёнка обладает следующими свойствами: механическая и электрическая прочность выше, чем у фторопласта-4, даёт усадку при нагревании, высокая морозо- и нагревостойкость на высоких частотах, высокая стоимость.

Фторопластовые плёнки выпускают нескольких видов. Плёнка электроизоляционная применяется для изоляции проводов, работающих при температурах от -60 до $+250^{\circ}\text{C}$. Плёнка изоляционная применяется для межслойной изоляции в устройствах, работающих при температуре от -60 до $+230^{\circ}\text{C}$. Плёнка конденсаторная ориентированная применяется для изготовления конденсаторов, работающих при температуре от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$.

Полярные пленки

Чаще всего применяется:

1) Полиэтилентерефталевая (лавсановая) пленка нашла широкое распространение в электротехнике и радиопромышленности благодаря высокой прочности на разрыв и надрыв, хорошим электрическим свойствам, химической стойкости, устойчивости к действию органических растворителей, повышенной нагревостойкости, влагостойкости.

Недостатком лавсановой пленки является излишняя жесткость и упругость. Применяют для изготовления конденсаторов и кабелей, а также для изоляции обмоток низковольтных электрических приборов.

2) Поливинилхлоридная пленка (ПВХ), ее обычно получают из хлорированного поливинилхлорида. Она обладает невысокими электрическими свойствами и низкой нагревостойкостью, что ограничивает ее применение.

3) Винипластовая пленка неориентированная и ориентированная выпускается толщиной 0,02...0,7 мм; каландрированная (обработка материалов на каландре - машине, состоящей из системы валов, между которыми пропускают материал для придания ему гладкости, лоска или глянца) - толщиной 0,3... 1,0 мм.

Применяют как влагостойкий и химически стойкий материал для изоляции водопогруженных электродвигателей.

4) Полиамидная пленка (ПАМ) выпускают толщиной 0,05...0,12 мм и шириной 1200... 1300 мм.

Она обладает высокой механической прочностью; невысокими электрическими параметрами, которые существенно ухудшаются при нагревании и воздействии влаги; малой газопроницаемостью; высокой стоимостью.

Применяют как бензо- и маслостойкий герметизирующий материал в основном в кабельной технике для изоляции проводов с наружным покрытием из поливинилхлорида или полиэтилена.

5) Поликарбонатная пленка (ПК) применяется преимущественно при изготовлении конденсаторов низкого напряжения, а также для высоковольтной изоляции.

6) Пленка из эфиров целлюлозы является наиболее ранним типом полимерных изоляционных пленок. Ее применяют для изготовления малогабаритных намоточных конденсаторов низкого напряжения.

3.4.5. Слоисто-волоконистые электроизоляционные пластмассы

Слоистые пластмассы – это материалы, в которых наполнителем служат листовые материалы: *бумага* или *ткани*, создающие слоистую структуру. Связующим веществом в них являются терморезистивные фенолформальдегидные и другие смолы. Из слоистых пластмасс наиболее широкое применение получили гетинакс, текстолит и стеклотекстолит.

Таблица 3.3 – Состав слоистого пластика

Наименование	Наполнитель	Связующее
Гетинакс	Пропиточная бумага толщиной 0,1 мм	Фенолформальдегидная смола (ФФС)
Текстолит	Хлопчатобумажная и синтетическая ткани (саржа, бязь, шифон, бельтинг, лавсан)	ФФС
Стеклотекстолит	Стеклоткани из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла	Совмещенная, эпоксидная и ФФС – совмещенная эпоксидно-кремнийорганическая смола

Гетинакс – листовой слоистый материал, в котором наполнителем являются листы пропиточной бумаги, собранные в пакеты и спрессованные. Гетинакс обладает высокими диэлектрическими свойствами, находит широкое применение в бытовой радиоаппаратуре. Гетинакс получается путем горячей прессовки бумаги, пропитанной бакелитом. Выпускается гетинакс на основе ацетилированной бумаги, обладающей повышенной влагостойкостью и способной заменить стеклотекстолиты. Его недостатком традиционно считается повышенное влагопоглощение (1,5...2,5%) через слои бумаги или из открытых их торцевых срезов, а также через полимерное связующее.

Листовой гетинакс применяется в виде щитов, панелей, изоляционных перегородок в устройствах низкого напряжения. Существует специальная марка гетинакса, предназначенная для работы в маслозаполненной аппаратуре высокого напряжения. Электрическая проч-

ность гетинакса составляет примерно 20...40 кВ/мм. Слоистая структура гетинакса приводит к заметной анизотропии свойств материала. Электрическая прочность вдоль слоев наполнителя в 5-8 раз ниже, чем поперёк слоев.

Используется для изготовления различного рода плоских электроизоляционных деталей и оснований.

Текстолит отличается от гетинакса тем, что наполнителем в нем является хлопчатобумажная ткань. Он выпускается марок А, Б и Г – на основе бязи и на шифоне. Текстолит обладает более высокой прочностью при сжатии и ударной вязкостью и поэтому используется также в качестве конструкционного материала, и его выпускают не только в виде листов, но и плит толщиной до 50 мм

Стеклотекстолиты благодаря ценным свойствам наполнителя обладают наиболее высокой механической прочностью, теплостойкостью и минимальным влагопоглощением. Они имеют лучшую стабильность размеров, а электрические свойства остаются высокими и во влажной среде. Вследствие необычной твердости поверхности стеклотекстолиты износоустойчивы.

Выпускается несколько десятков марок стеклотекстолитов, предназначенных для разных целей, в том числе повышенной нагревостойкости, тропикостойкости, гальваностойкости, огнестойкости, с металлической сеткой. Обычные марки *фольгированного стеклотекстолита* облицованы медной фольгой толщиной 35...50 мкм, для полуваддитивной технологии выпускается теплостойкая модификация с фольгой толщиной 5 мкм. Для той же технологии можно применять листовый нефольгированный стеклотекстолит с адгезионным слоем, обладающим неограниченной жизнестойкостью.

Для изготовления печатных плат по аддитивной технологии требуются диэлектрики с металлическими включениями, образующими центры кристаллизации при химическом меднении. Для этой цели выпускается слоистый пластик – диэлектрик, содержащий мелкодисперсные частицы металлов, Ag или V.

Качество печатных плат характеризуется следующими свойствами.

1. Прочность является одним из основных свойств, поскольку печатные платы выполняют роль не только диэлектрического основания, но и несущей конструкции. Часто требуется вибропрочность, ко-

торой, особенно при больших размерах плат, стеклотекстолит не обладает. Следует иметь в виду, что удельная прочность при толщине, большей, чем 1,5 мм, начинает снижаться, так как затрудняется удаление летучих веществ при отверждении и сказывается градиент температуры, который, как и в случае стекла, проявляется в виде микротрещин на поверхности. Это служит еще одним примером размерного эффекта прочности.

2. Нагревостойкость фольгированных слоистых пластиков определяется по отсутствию вздутий, расслаивания и отклеивания фольги, возникающих при пайке. Критерием является время, в секундах, в течение которого разрушения не наблюдаются при нагреве до 533 К (260°C). Минимальная нагревостойкость – 5 с, у лучших марок – 20 с.

3. Стабильность размеров — изменение длины при смене температур в процессе пайки, когда вся плата перегревается примерно до 393 К (120°C); Температурный коэффициент линейного расширения $T_{\text{КЛР}}$ стеклотекстолита при толщине 1,5 мм составляет $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, т. е. отличается от такого у меди более чем в 2 раза, поэтому при больших размерах плат возможен обрыв или отслоение фольги. Кроме того, при $T \sim 370 \text{ K}$ в эпоксидных смолах наблюдается фазовый переход, выше которого резко возрастает $T_{\text{КЛР}}$ в направлении толщины слоистого пластика, приводящий к обрыву металлизации отверстий. Нестабильность размеров проявляется также в виде неплоскостности – прогиба, коробления, скручивания, которые возникают вследствие механических напряжений.

4. Электрическая прочность стеклотекстолита анизотропна: в продольном направлении она в несколько раз выше, чем в направлении толщины. Причина этому – анизотропия самого материала и наличие микротрещин, уменьшающих эффективную толщину, но не длину и ширину. С увеличением толщины электрическая прочность падает. Так, для плат толщиной 0,5 и 1,0 мм значение электрической прочности соответственно 30 и 10 кВ/мм.

Недостатки фольгированных стеклотекстолитов являются следствием их неоднородной структуры и особенностей используемых материалов. Это – коробление, нестабильность размеров, растрескивание, отслаивание, воспламеняемость. Наконец, стеклотекстолит из-за высокого $\text{tg } \delta$ непригоден для СВЧ-техники.

Волокнистые материалы состоят преимущественно из частиц удлиненной формы – волокон, промежутки между которыми заполнены воздухом у непропитанных материалов и природными или синтетическими смолами у пропитанных. Преимуществами многих волокнистых материалов являются невысокая стоимость, довольно большая механическая прочность, гибкость и удобство обработки. Недостатки – невысокие электрическая прочность и теплопроводность, более высокая, чем у массивных материалов того же состава, гигроскопичность. Пропитка улучшает свойства волокнистых материалов.

Текстильные электроизоляционные материалы (пряжа, ткани, ленты и др.) широко применяются в качестве электроизоляционных. Это натуральные волокна растительного и животного происхождения, а также различные синтетические и искусственные волокна. Применение в электротехнике имеют текстильные изделия из стеклянного волокна и асбеста, капроновые волокна, хлопчатобумажные и шелковые ткани.

Непропитанные волокнистые материалы по виду исходного сырья можно подразделить на материалы из:

- растительных волокон;
- бумаги, картона, хлопчатобумажной пряжи и ткани;
- животных волокон (натуральный шелк);
- искусственных и синтетических волокон (ацетатный шелк, капрон и др.);
- неорганических волокон (стекловолокно, асбест).

К материалам из растительных волокон одним из первых можно отнести *дерево*, получившее широкое применение в электротехнике из-за его дешевизна и легкости механической обработки. Основой дерева, как и всякого растительного волокна, является органическое вещество – *целлюлоза*, представляющая собой полимерный углеводород, молекулы которого имеют вид длинных цепей с числом звеньев до двух тысяч. В каждом элементарном звене молекулы содержится по три гидроксильных группы ОН, обуславливающих полярность целлюлозы. Эти группы смещаются в электрическом поле по отношению ко всей молекулярной цепи, что создает эффект дипольно-релаксационной поляризации. Поэтому целлюлоза имеет относительно большую диэлектрическую проницаемость, $\epsilon = 6,5 \dots 7$.

Более тяжелые породы деревьев имеют большую механическую прочность, чем легкие. Прочность поперек волокон у дерева меньше, чем вдоль.

К недостаткам дерева относятся высокая гигроскопичность, нестандартность свойств, низкая нагревостойкость. При пропитке дерева льняным маслом или различными смолами свойства улучшаются.

В электротехнике дерево применяется для изготовления деревянных опор линий электропередачи, крепежных деталей трансформаторов высокого и низкого напряжения, пазовых клиньев электрических машин и т.п.

Бумага и картон – листовые или рулонные материалы коротковолокнистого строения, состоят в основном из целлюлозы. Важным преимуществом этих материалов является то, что они производятся из возобновляемого сырья, а именно из древесной массы. Для удаления примесей, содержащихся в древесине, целлюлозу обрабатывают химическими реагентами. Для писчей бумаги древесину обрабатывают сернистой кислотой H_2SO_3 , а для приготовления бумаг для электрической изоляции, упаковочных бумаг используют щелочную обработку. Щелочная целлюлоза не отбеливается, сохраняет желтоватый цвет, обусловленный красящими веществами древесины.

Щелочная целлюлоза дороже сульфитной, однако в ней исходная целлюлоза сохраняет большую молекулярную массу и длину молекул, поэтому щелочная бумага имеет более высокую механическую прочность, и более стойкая к тепловому старению. Прочность бумаги сильно зависит от влажности и переувлажненная, так же как и пересушенная бумага, имеют пониженную механическую прочность.

Чем выше плотность бумаги, тем выше как механическая, так и электрическая прочность бумаги. Самые тонкие и прочные бумаги используются для изготовления конденсаторов. Достаточно отметить, что плотность конденсаторных бумаг достигает 1.6 т/м^3 , т.е. более, чем в 1.5 раза превышает плотность воды. При этом электрическая прочность бумаги толщиной 10 мкм, пропитанной трансформаторным маслом, составляет до 10 КВ/мм.

В качестве диэлектрика *конденсаторную бумагу* обычно используют в несколько слоев с применением различных пропиточных масс, которыми могут быть различные неполярные, полярные, жидкие, полужидкие и твёрдые пропиточные массы. Применение не-

скольких слоев обеспечивает перекрытие сквозных отверстий и проводящих включений в отдельных листах. Однако бумага не является высокочастотным диэлектриком. На переменном токе она используется до частоты 10 кГц.

Кабельная бумага обозначается символами *K* – кабельная, *M* – многослойная, *B* – высоковольтная, *У* – уплотненная и цифрами от 015 до 240, что обозначает толщину бумаги в микрометрах.

Бумаги марок *K* и *KM* применяются в силовых кабелях до 35кВ, *KB* и *KBU* 35 кВ и выше, *KBM* и *KBMU* – 110 кВ и выше.

В бумажной изоляции силового кабеля слабыми местами – очагами развития пробоя являются зазоры между отдельными лентами бумаги.

Пропиточная бумага употребляется для изготовления листового гетинакса.

Картон отличается от бумаги большей толщиной. Выделяют два типа картонов: *воздушные* (более плотные) и *масляные* (более рыхлые) предназначенные для работы в маслonaполненных агрегатах.

Электротехнический картон используется в качестве диэлектрических дистанцирующих прокладок, шайб, распорок, в качестве изоляции магнитопроводов, пазовой изоляции вращающихся машин и т.п. Это связано с его низкой стоимостью и хорошими технологическими свойствами. В сочетании с высокой стабильностью и механической прочностью при пропитке электрокартона трансформаторным маслом можно получить изоляцию с высокими электрическими параметрами. Электрическая прочность пропитанного картона достигает 40...50 кВ/мм. Поскольку она выше прочности трансформаторного масла, для увеличения электрической прочности трансформаторов зачастую устраивают в среде масла специальные барьеры из картона. Маслoбарьерная изоляция обычно имеет прочность $E_{пр}=30...40$ кВ/мм. Недостатком картона является гигроскопичность, в результате попадания влаги уменьшается механическая прочность и, резко уменьшается электрическая прочность (в 4 и более раз)

В качестве конструкционного и изоляционного материала широко применяется *листовая и трубчатая фибра*. Она изготавливается из тонкой бумаги, пропускаемой через раствор хлористого цинка. После намотки на стальной барабан и получения слоя нужной толщины,

в котором отдельные слои бумаги прилипают друг к другу, фибра срезается с барабана, тщательно промывается водой и прессуется.

Фибра неустойчива к воздействию влаги, поэтому она не применяется для деталей, требующих сохранения точных размеров, так как при поглощении влаги фибра меняет свои размеры. При нагревании до температуры 180°C фибра медленно обугливается и при температуре примерно 300°C воспламеняется.

Пропитанные волокнистые материалы – это лакоткани, лакобумаги и электроизоляционные ленты, которые представляют собой гибкие электроизоляционные материалы, пропитанные электроизоляционным лаком. Основа пропитанных материалов – ткань или бумага – обеспечивает высокую механическую прочность, гибкость и определенную эластичность. Электроизоляционные лаки, заполняя при пропитке поры ткани, образуют на поверхности после высыхания прочную пленку, которая обеспечивает хорошие электрические свойства и стойкость к действию влаги.

Лакоткани изготавливают на основе хлопчатобумажных, шелковых и стеклянных тканей из синтетических волокон. Они находят применение в электрических машинах, аппаратах, кабельных изделиях в виде различных лент, прокладок, оберток и др.

В зависимости от типа пропитывающего лака лакоткани подразделяются на:

– *светлые* (желтые), изготавливаемые на масляных лаках, имеют высокие электрические характеристики, устойчивы к воздействию нефтяных масел, бензина, воды, но имеют повышенную склонность к тепловому старению, в процессе которого возрастает жесткость при нагревании;

– *чёрные* – на масляно-битумных лаках; обладают более высокими, чем светлые, электрическими характеристиками, влагостойкостью и меньшим тепловым старением, но не стойки к воздействию масел и бензина.

Лакоткани, в которых в качестве основы используется капроновая ткань, превосходят по своей эластичности шелковые, но они менее устойчивы к резкому повышению температуры, например при пайке изолированных проводников.

Лакоткани на основе стеклотканей с различными типами пропитывающих составов (масляных, кремнийорганических, фторопласто-

вых) отличаются высокой устойчивостью к воздействию температуры, влажной среды и других факторов.

Для электроизоляционной техники используются различные типы волокон, в том числе асбестовые волокна, получаемые из минерала асбест сложного состава.

3.4.6. Электроизоляционные резины

Резины широко применяют в производстве электрических проводов и кабелей, где они выполняют роль электроизоляционных материалов или защитных покровов (шланговые резины). Назначение шланговых резин – защищать изоляцию кабеля от возможных механических и химических воздействий, а также от проникновения в нее влаги. Основным сырьем для изготовления всех резин являются натуральные и синтетические каучуки. Каучук обладает высокой пластичностью (растяжимостью) и принадлежит к группе материалов, называемых эластомерами. Пластичность каучука является свойством, необходимым для производства резин, так как способствует лучшей смешиваемости каучука с вулканизаторами, наполнителями, пластификаторами. На каучук действуют растворители: бензин, бензол, минеральные масла, в которых, он сначала набухает, затем постепенно растворяется. Из физико-химических характеристик наиболее важными являются: сопротивление старению, стойкость к действию различных жидкостей, теплостойкость, морозостойкость и водопоглощение.

Каучуки бывают натуральные и искусственные (синтетические).

Натуральный каучук (НК) получают из млечного сока (латекса) тропических растений гевеи, каучуконосных кустарников коксагыз и др.

В естественном состоянии каучук – аморфное вещество, а в растянутом состоянии имеет упорядоченное расположение молекул, характерное для кристаллических тел. После снятия растягивающего усилия каучук снова приобретает аморфное состояние. Натуральный каучук неполярен. Он легко растворяется в эфире, бензине, минеральных маслах; не растворяется в воде; при нагревании до температуры 90°C размягчается, а при температуре ниже нуля становится твердым и хрупким.

Сырьем для *синтетических каучуков (СК)* служат спирт, попутные продукты нефтедобычи, природного газа и нефтепереработки. Наиболее близкими по свойствам к натуральному каучуку являются синтетические каучуки углеводородного состава.

Бутадиеновый каучук (СКБ) применяют для изготовления эбонитовых изделий и оболочек кабелей. Его получают полимеризацией бутадиена в присутствии катализатора (металлического натрия). Он является каучуком общего назначения. Недостатком является малая клейкость, что препятствует изготовлению из него электроизоляционной резины.

Бутадиенстирольный каучук (СКС) имеет хорошие диэлектрические свойства, хорошо сопротивляется тепловому старению и действию многократных деформаций. Его получают эмульсионной полимеризацией стирола и бутадиена при температуре 50°C.

Бутилкаучук применяют для изготовления электроизоляционных резин. Его получают при совместной полимеризации изобутилена и изопрена. Он обладает высокой механической прочностью, хорошей химической стойкостью, газонепроницаемостью, стойкостью к тепловому старению, озоностойкостью.

В промышленности также синтезируют:

– *изопреновый каучук (СКИ)* – обладает более высокой механической прочностью и эластичностью, чем остальные синтетические каучуки, но меньшей клейкостью и эластичностью, чем натуральный. Его получают полимеризацией изопрена в присутствии катализатора (лития или его соединений). Является заменителем натурального каучука и относится к группе каучуков общего назначения;

– *полихлоропреновый каучук* применяют для защитных оболочек кабелей, которые по влагостойкости не уступают свинцовым. Обладает следующими свойствами: высокая механическая прочность, близкая к натуральному каучуку; повышенная стойкость к действию нефтяных масел и технических растворителей; высокая стойкость к воздействию света и озоностойкость; по электрическим свойствам уступает другим синтетическим каучукам;

– *полисилоксановый каучук* применяют для изготовления прокладок и изоляции. Получают на основе кремнийорганических соединений. Он имеет хорошие диэлектрические свойства, высокие термо- и морозостойкость; светостойкость и озоностойкость; растворяется в углеродах, концентрированных кислотах и щелочах.

Синтетические каучуки подразделяются на каучуки общего назначения (универсальные) и специального назначения (теплостойкие, морозостойкие, маслостойкие, кислотоупорные и др.).

Натуральный и синтетический каучуки в чистом виде как электротехнический материал не используются, так как имеют ряд недостатков, к которым относятся малая стойкость к действию повышенных и пониженных температур и растворителей, малая прочность при растяжении, большое водопоглощение.

Для устранения этих недостатков каучук подвергают вулканизации, которая состоит в нагревании каучука с предварительно введенными вулканизирующими веществами (сера, металлический натрий, перекись бензола и др.). Под влиянием повышенной температуры в каучуке происходит частичный разрыв двойных связей цепочных молекул и их «сшивание» через атомы серы. В зависимости от количества введенной серы получают различные продукты. При содержании серы 1...3% получают мягкую эластичную резину, а при 30...35% – пластмассы на основе каучука (твёрдую резину).

Резине свойственны хорошая вибростойкость, высокая эластичность, повышенная химическая стойкость, достаточная механическая прочность, хорошие электроизоляционные характеристики, устойчивость к износу. Она хорошо сочетается в эксплуатации с такими материалами, как ткань, асбест.

К недостаткам резины относятся: низкая нагревостойкость (при повышении температуры и влажности ухудшаются диэлектрические и механические свойства резины, она высыхает и растрескивается); плохая стойкость к действию нефтяных масел и других неполярных жидкостей (бензина, бензола и др.); неустойчивость к воздействию света, особенно ультрафиолетового; в присутствии озона быстро стареет и трескается.

Резины применяют для изоляции проводов и кабелей, изготовления прокладок, шайб, изолирующих трубок, диэлектрических перчаток, электроизоляционных ковриков.

К основным пластмассам на основе каучука относят следующие твёрдые резины.

Эбонит – твёрдая резина, которую получают при вулканизации натурального каучука, синтетического бутадиенового каучука или синтетического бутадиенстирольного каучука, в который добавляют 25...30% серы и наполнители (эбонитовую пыль, тальк и др.).

Эбонит имеет сравнительно высокие электроизоляционные свойства; он устойчив к действию кислот и щелочей, не растворяется в органических растворителях, также имеет высокую дугостойкость и стойкость к ударным нагрузкам. Незначительное удлинение при разрыве, всего 2...6%. Эбонит хорошо обрабатывается резанием и полируется.

К недостаткам эбонита относятся низкая теплостойкость (сохраняет свои свойства в интервале температур 50...80°C), склонность к холодной текучести; он стареет под действием тепла и света.

Эбонит выпускается в виде пластин толщиной 0,5...32 мм, стержней диаметром 5...75 мм и трубок с внутренним диаметром 3...50 мм.

Эскапон получают полимеризацией синтетического бутадиенового каучука при повышенном давлении и температуре 250...270°C в пресс-формах. Он не содержит серы.

По механическим и химическим свойствам близок к эбониту, однако по сравнению с эбонитом обладает меньшими диэлектрическими потерями, повышенной нагревостойкостью; не подвержен старению.

Выпускается в виде плит толщиной до 20 мм, стержней, трубок.

Применяется для изготовления изделий, работающих на высоких частотах, и эскапоновых лакотканей.

Асбодин представляет собой композицию на основе каучука, асбестового волокна и железного сурика с вулканизирующими добавками. Он имеет повышенные нагревостойкость и дугостойкость, устойчив к воздействию плесневых грибков, надежно работает в тропических условиях, имеет также пониженную текучесть и длительность термообработки в пресс-формах (примерно 16 ч). Применяют в качестве низковольтного изоляционного материала.

Хлоркаучук получают при хлорировании каучука. Он обладает хорошими электроизоляционными свойствами, стойкостью к действию кислот, щелочей, хлора, но растворяется в ароматических углеводородах; не горюч и имеет низкую нагревостойкость.

Изомеризованный каучук получают при обработке каучука в присутствии кислого катализатора – серной кислоты. Он обладает электроизоляционными свойствами и водостойкостью выше, чем у хлоркаучука, устойчив к действию кислот, щелочей и растворителей.

3.4.7. Лаки, эмали, компаунды

Лаки применяют в качестве пропиточных, покровных и клеящих электроизоляционных материалов. Их электрические свойства:

- $\varepsilon = 2,5 \dots 4$;
- $\rho = 10^9 \dots 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- $\text{tg}\delta = (10 \dots 100) \cdot 10^{-4}$;
- $E_{\text{пр}} = 10 \dots 20 \text{ МВ/м}$.

В зависимости от материала плёнкообразователя различают лаки масляные, смоляные, нитроцеллюлозные (нитролаки).

Лаки – это коллоидные растворы пленкообразующих веществ в соответствующих летучих растворителях. Пленкообразующими называются вещества, которые в результате испарения растворителя и процессов отвердевания способны образовать твердую пленку

Основными составляющими лака являются:

- *пленкообразующие* вещества, способные давать пленку (растительные высыхающие масла, смолы, битумы, эфиры целлюлозы, полиэфирные и кремнийорганические соединения);
- *растворители* (бензол, толуол, спирт, сероуглерод, ацетон и др.);
- *пластификаторы* – вещества, придающие пленке пластичность (касторовое масло);
- *сиккативы* (от лат. *высушивающий*) – твердые или жидкие вещества, которые вводятся в некоторые лаки для ускорения высыхания;
- *красители*;
- *разжижители*, добавляемые в лак для получения консистенции в соответствии с требованиями технических условий (лаковый керосин, бензин, скипидар).

При сушке лака растворитель улетучивается, а пленкообразователь в результате химических реакций переходит в твердое состояние, образуя лаковую пленку.

По назначению *электроизоляционные лаки* делят на пропиточные, покровные и клеящие. Один и тот же лак может использоваться в качестве пропиточного, покровного и клеящего.

Пропиточные лаки служат для пропитки пористой и волокнистой изоляции. Их изготавливают холодного и горячего отверждения.

Пропиточные лаки должны иметь необходимые изоляционные свойства, хорошие пропитывающую и цементирующую способности, быстро отвердевать и нормально функционировать в диапазоне рабочих температур.

В процессе пропитки воздух вытесняется из пор и заполняется лаком, который после высыхания имеет более высокие электрическую прочность и теплопроводность, чем воздух, что важно для отвода тепла. Кроме того, после пропитки у изоляции повышается пробивное напряжение; уменьшается гигроскопичность; улучшаются механические свойства.

К пропиточным лакам относят:

– кремнийорганические лаки, их применяют для пропитки стекловолоконной обмотки проводов кабелей и изготовления стеклотекстолита;

– битумно-масляные лаки, состоят из смеси чёрных и масляных лаков. В состав *чёрных лаков* входят битумы, которые определяют чёрный цвет жидкого лака и лаковой пленки. Битумы бывают природными (ископаемые), которые называют асфальтами, и искусственными (нефтяные), которые представляют собой тяжелые продукты перегонки нефти. Чёрные лаки дешевле масляных, образуют менее гигроскопичные пленки, но они менее эластичны и более подвержены действию растворителей, а при нагревании склонны к размягчению. Поэтому, в качестве электроизоляционных используют битумно-масляные лаки. В качестве растворителей для этих лаков используют ароматические углеводороды (бензол, толуол и др.), а также скипидар. Битумно-масляный лак также применяют для изготовления лако-тканей.

– масляно-алкидные лаки получают взаимодействием многоосновных карбоновых кислот с многоатомными спиртами.

Покрывные лаки служат для защиты изделий от воздействия атмосферной влаги и паров агрессивных веществ. К ним предъявляются следующие требования: высокие электроизоляционные свойства; высокая теплостойкость; высокая радиационная стойкость; высокие гидрофобность и плотность, защищающие поверхность от проникновения воды и др. веществ; хорошая адгезия к покрываемым поверхностям.

К покрываемым лакам относят:

– кремнийорганические лаки, их используют для изготовления нагревостойких обмоточных проводов со стекловолоконистой изоляцией; для защиты *p-n*-переходов, печатных плат, изоляционных деталей из гетинакса, стеклотекстолита;

– лаки на поливинилацетатной и полиуретановой основе, их используют для изготовления медных эмалированных проводов;

– масляные лаки, их используют для изготовления обмоточных проводов;

– полиамидные лаки, их используют для повышения нагревостойкости изоляции обмоточных проводов, работающих при температуре 200...220°C;

– полиимидные лаки используют для межслойной изоляции тонких пленок в гибридных интегральных схемах и для изготовления фольгированных диэлектриков;

– целлюлозные лаки представляют собой растворы термопластичных эфиров целлюлозы, которые в большинстве случаев сохнут при комнатной температуре. Наибольшее распространение получили нитроцеллюлозные лаки (нитролаки), которые обладают высокой механической прочностью; хорошей устойчивостью к воздействию воздуха, влаги, масел; хорошим блеском.

Нитролак используют также для пропитки хлопчатобумажных оплеток проводов.

Эмали представляют собой разновидность покрывных лаков, в состав которых вводится неорганический наполнитель – пигмент.

Пигменты повышают твёрдость, теплопроводность, влагостойкость покрытий и придают им соответствующий цвет. В качестве наполнителей используют железный сурик, оксиды цинка, титана и др.

Эмали используют в основном в качестве защитных покрытий поверхностей различных деталей и элементов радиоэлектроники и для декоративной отделки корпусов электрорадиотехнических приборов.

Лаки и эмали маркируют буквенно-цифровыми обозначениями. Буква обозначает химическую основу основного компонента лака, первая цифра указывает назначение лака, а последующие – его порядковый номер в соответствующей группе. Например, обозначение лака ПЭ-993 расшифровывается так: ПЭ – полиэфирный, 9 – электроизоляционный, 93 – порядковый номер в группе полиэфирных лаков.

Клеящие лаки применяют для склеивания между собой твёрдых материалов (фольгированных диэлектриков, листов пакетов трансформаторов, пластинок расщепленной слюды и др.) Общие требования: высокая клеящая способность, хорошие электрические и механические свойства, высокая адгезия к склеиваемым материалам и технологичность.

К клеящим лакам относят:

– полиуретановые клеи – отличаются высокой влагостойкостью и используются для склеивания пластмасс, стёкол, керамики, тканей, резин, металлов. Применяются до температуры 150°C;

– эпоксидные клеи холодного и горячего (при температуре 200°C) отверждения используют для выравнивания коэффициентов линейного расширения клея и соответствующего материала;

– клеи марок БФ используют для приклейки полупроводниковых слитков, пластин и кристаллов;

– карбонильный клей представляет собой вязкую жидкость желтоватого цвета, в которую перед употреблением вводят катализатор (перекись бензола), после чего он может храниться 4...6 ч. Обладает относительно высокой механической прочностью; стоек к воздействию масел, керосина, бензина; недостаточно водостоек. Его применяют для склеивания керамических материалов;

– глифталевый лак представляет собой синтетическую алкидную смолу, модифицированную канифолью и растительным маслом, которая обладает высокой клеящей способностью и высокой прочностью шва. Применяется для приклейки пластин и кристаллов полупроводниковых материалов на подложки.

Компаунды – изоляционный материал из асфальтовых и парафинистых веществ и масел (от англ. *compound* – составной, смешанный), представляют собой механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей. Компаундами в жидком или полужидком состоянии пропитывают, обмазывают, заливают элементы радиоэлектронной аппаратуры, после чего они отвердевают. Компаунды защищают элементы аппаратуры от атмосферной влаги, повышают электрическую и механическую прочность, т.е. обеспечивают высокую надежность. По сравнению с лаками компаунды обеспечивают лучшую влагостойкость и влагонепроницаемость изо-

ляции, так как при охлаждении после пропитки полностью затвердевают без следов испаряющегося растворителя.

В исходном состоянии компаунды могут быть жидкими или твёрдыми.

В *жидкие компаунды* перед употреблением вводят отвердитель, в результате чего они постепенно отвердевают, превращаясь в монолитный твёрдый диэлектрик.

Твёрдый компаунд предварительно нагревают при соответствующей температуре для получения массы с определенной вязкостью.

В зависимости от применяемых смол могут быть:

– термопластичные компаунды, размягчаются при нагревании и отвердевают при охлаждении. При этом температура пропитки не должна вызывать термического разрушения изделия и вытекания компаунда при работе;

– терморезистивные компаунды в исходном состоянии являются жидкостями. Для повышения нагревостойкости, механической прочности и уменьшения склонности к растрескиванию в терморезистивные компаунды вводят наполнители (кварц, фарфоровую муку). Они, как правило, обладают более высокой нагревостойкостью по сравнению с термопластичными, так как при нагревании отвердевают необратимо, т.е. уже не размягчаются. Однако залитые терморезистивным компаундом детали в большинстве случаев не ремонтпригодны и при повреждении залитой детали требуется ее замена.

По назначению компаунды разделяют на:

– пропиточные компаунды, они, как и аналогичные лаки, служат для пропитки пористых и волокнистых материалов;

– заливочные компаунды служат для заполнения сравнительно больших полостей и промежутков в различных деталях, а также для нанесения сравнительно толстых покрытий на детали, узлы и блоки.

Наибольшее распространение получили синтетические компаунды:

– эпоксидные компаунды представляют собой модификации эпоксидных смол с отвердителями, пластификаторами и наполнителями. Применяют в качестве заливочных составов для изготовления трансформаторов, работающих в тяжелых условиях;

– кремнийорганические компаунды представляют собой вязкие жидкости, которые после полимеризации превращаются в упругие

твердые вещества. Применяют для герметизации полупроводниковых приборов и интегральных схем методом прессования и заливки в формы;

– полиэфирные компаунды изготавливают на основе ненасыщенных полиэфиров в сочетании со стиролом и др. мономерами. Применяют для герметизации опытно-электронных приборов и интегральных схем.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите классификацию твёрдых диэлектрических материалов.
2. Какие основные свойства силикатных стёкол.
3. Перечислите особенности кварцевых стёкол.
4. В чём проявляется отличие ситаллов от стёкол?
5. Назовите группы электрокерамических материалов.
6. Какими параметрами отличаются установочная и конденсаторная керамики?
7. Приведите основные свойства активных диэлектриков.
8. Для изготовления каких электротехнических устройств применяются сегнетоэлектрики?
9. Каковы особенности жидкокристаллических веществ?
10. В каких устройствах используется оксидная изоляция?
11. Дайте определение полимеров.
12. Приведите основные электротехнические свойства полимеров.
13. Каково основное применение полиэтилена.
14. Какое основное электротехническое назначение полистирола?
15. Назовите область применения фторопластов.
16. В качестве каких электротехнических материалов используется ПВХ?
17. Назовите особенности электротехнического применения лавсана.
18. Какие смолы получили наибольшее применение в электротехнике?

19. Что такое канифоль?
20. Какие вещества входят в состав электротехнических пластмасс?
21. Приведите основные достоинства и недостатки пластмасс.
22. Как классифицируются пластмассы?
23. Какие вы знаете плёночные электроизоляционные материалы?
24. В чём проявляется отличие полярных и неполярных плёнок?
25. Какой состав у слоисто-волоконистых изоляционных материалов?
26. Какие свойства определяют качество печатных плат из стеклотекстолита?
27. Перечислите области применения электротехнического картона.
28. Каково назначение электроизоляционных резин?
29. Назовите назначение электроизоляционных лаков.
30. Приведите основные свойства компаундов.

Глава 4. ПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Электрические провода чаще всего изготавливаются из меди и алюминия.

Медь:

- малое сопротивление протеканию электрического тока;
- образующаяся в естественных условиях на поверхности проводника, плёнка окиси меди не препятствует протеканию тока через площадь контакта проводников (низкое переходное сопротивление);
- высокая механическая прочность, в том числе – в местах контактных соединений; легко поддаётся пайке, лужению, сварке с применением обычных приспособлений и материалов;
- медные проводники, в отличие от алюминиевых, не требуют смазки при монтаже разборных соединений или при монтаже опрессовкой;
- высокая стоимость производства меди и конечного продукта.

Алюминий:

- алюминий легче меди более чем в три раза;
- электрическая проводимость алюминия почти в два раза ниже, чем у меди;
- плёнка окисла на поверхности алюминиевого проводника имеет худшие показатели проводимости электрического тока;
- сварка металла возможна в среде инертного газа, пайка – с применением специальных флюсов и припоев;
- для обеспечения долговременного надёжного соединения, при монтаже соединений любого типа (кроме сварки), рекомендуется зачистка поверхности проводника и смазка нейтральной смазкой (технический вазелин) зоны контакта;
- стоимость алюминиевых проводов в разы ниже стоимости медных.

4.1. Обмоточные провода

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией

Медные и алюминиевые обмоточные провода применяют для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. Обмоточные провода выпускают с эмалевой, волокнистой, пленочной, а также с эмалево-волокнистой изоляцией.

Эмалевая изоляция имеет наименьшую толщину (0,003...0,065 мм) по сравнению с волокнистой и пленочной изоляцией обмоточных проводов. Это позволяет в том же объеме обмотки заложить большее число проводов и тем самым увеличить мощность электрической машины или аппарата. Поэтому эмалированные провода являются наиболее перспективными среди обмоточных проводов. Эмалевая изоляция на проводе представляет собой гибкое лаковое покрытие, полученное в результате затвердевания слоя лака, нанесенного на провод. Нанесение лака на провод производят на эмалировочных станках.

В таблицах 4.1 и 4.2 приведен основной сортамент медных и алюминиевых проводов с эмалевой изоляцией. Следует заметить, что нагревостойкость эмалевой изоляции на алюминиевых проводах в среднем на 6...8°C выше по сравнению с соответствующими эмалями на медных проводах. Это объясняется меньшим каталитическим воздействием алюминия на органическое эмальлаковое покрытие.

Практический интерес представляют обмоточные провода с высокопрочными эмалевыми покрытиями на основе поливинилацетатной смолы (провода марки ПЭВ-1 и ПЭВ-2) и провода с высокопрочным эмалевым покрытием на основе полиуретановой смолы (провод марки ПЭВТЛ). Последние отличаются повышенной нагревостойкостью (до 120°C) и способностью обслуживаться без предварительной зачистки эмалевой изоляции. Эмалевая изоляция проводов ГЭВТЛ термопластична и плавится при температуре от 160°C и выше. В расплавленном виде эмалевая изоляция на основе полиуретановой смолы является флюсом и способствует пайке провода оловянно-свинцовыми припоями.

Более высокой нагревостойкостью (130°C) и хорошими электроизоляционными свойствами обладают провода марки ПЭТВ, эмалированные лаком на основе лавсана (полиэфирные лаки).

Таблица 4.1 – Медные обмоточные провода с эмалевой изоляцией

Марка провода	Диаметр жилы без изоляции, мм	Характеристика провода	Толщина слоя изоляции (на одну сторону), мм	Области применения
ПЭВ-1	0,02...2,44	Провод, изолированный высокопрочной эмалью винифлекс	0,004-0,025	Обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при температурах, не превышающих 105°С
ПЭВ-2	0,05...2,44	То же, но с утолщенным слоем эмалевой изоляции	0,006-0,035	То же
ПЭВТЛ-1	0,02...1,56	Провод, изолированный высокопрочной эмалью повышенной нагревостойкости	0,003-0,035	Обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при температурах до 120°С. Лужение и пайка провода без зачистки изоляции и без применения флюсов
ПЭВТЛ-2	0,02...1,56	То же, но с утолщенной изоляцией	0,005-0,04	То же
ПЭТВ	0,06...2,44	Провод, изолированный высокопрочной полиэфирной эмалью повышенной нагревостойкости	0,005-0,04	Обмотки электрических машин и аппаратов, работающих при температурах до 130°С
ПНЭТ—ИМИД	0,1...2,44	Провод никелированный, изолированный высокопрочной нагревостойкой полиимидной эмалью	0,012-0,05	Обмотки электрических машин и аппаратов, работающих при температурах до 220°С

Таблица 4.2 – Алюминиевые обмоточные провода с эмалевой изоляцией

Марка провода	Диаметр жилы без изоляции, мм	Характеристика провода	Толщина слоя изоляции (на одну сторону), мм	Области применения
ПЭВА	0,08...2,44	Провод, изолированный высокопрочной эмалью винифлекс	0,01-0,06	Обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при температурах, не превышающих 110°C
ПЭТВА	0,14...2,44	Провод, изолированный высокопрочной полиэфирной эмалью повышенной нагревостойкости	0,02-0,07	Обмотки электрических машин, аппаратов и приборов, работающих при температурах до 130°C
ПЭТА	0,08...2,44	Провод, изолированный высокопрочной нагревостойкой полиимидной эмалью	0,02-0,06	Обмотки электрических машин и аппаратов, работающих при температурах до 220°C

Наиболее высокой нагревостойкостью (220°C) обладают провода, эмалированные высокопрочной эмалью на полиимидной основе (марка ПНЭТ-имид).

Обмотки, выполненные проводами с эмалевой изоляцией, нуждаются в пропитке электроизоляционными лаками, как и обмотки из проводов с волокнистой изоляцией. Дело в том, что в тонком слое эмалевого изоляционного покрытия всегда имеется небольшое количество сквозных отверстий (точечные повреждения), вызванное несовершенством технологии эмалирования проволоки и наличием заусенцев на проволоке. На длине провода в 1 м может быть от 5 до 15 точечных повреждений. Точечных повреждений меньше на проводах большего диаметра.

Важнейшими характеристиками эмалированных проводов являются: эластичность и пробивное напряжение эмалевых покрытий.

Из других характеристик следует отметить: стойкость к тепловому удару, адгезию эмалевого изоляционного слоя, её термопластичность и механическую прочность при истирании. Здесь мы рассмотрим две первые характеристики.

Эластичность эмалевого покрытия у проводов диаметром до 0,35 мм определяется плавным растяжением провода до разрыва его. При этом эмалевая пленка не должна растрескиваться. В случае качественной эмалевого изоляции она не должна растрескиваться или отслаиваться от поверхности провода. Описанное испытание эмалевого изоляционного слоя на эластичность производят при комнатной температуре и при высоких температурах: 125°C и выше – в зависимости от марки провода. Пробивное напряжение эмалевого изоляционного слоя определяется на двух скрученных (свитых) друг с другом отрезках проводов длиной 125 мм. Число скруток на длине 125 мм устанавливается в зависимости от диаметра провода (табл. 4.3). С увеличением диаметра провода число скруток соответственно уменьшается. Скручивание двух отрезков эмалированных проводов производится в специальном станке при натяжении 0,5 кГ/мм² (4,9 Н/мм²) — для алюминиевых проводов и 1 кГ/мм² (9,8 Н/мм²) — для медных проводов.

В табл. 4.3 приведены наименьшие значения пробивного напряжения для двух слоев эмали на скрученных отрезках проводов.

Таблица 4.3 – Пробивное напряжение проводов с эмалевого изоляцией

Диаметр провода (по меди), мм	Число скруток на длине 125 мм	Наименьшее пробивное напряжение скрученные проводов различных марок, В			
		ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПЭВТЛ-1	ПЭТВ
0,06...0,07	40	400	500	350	450
0,08...0,09	40	500	700	400	550
0,10...0,14	33	600	800	500	700
0,15...0,20	33	700	900	600	800
0,27...0,35	23	900	1250	800	1200
0,44...0,53	16	1000	1350	850	1200
0,55...0,83	12	1100	1500	1000	1500
0,86...1,35	8	1300	1800	1200	1800
1,40...1,50	6	1500	2000	1400	2800
1,56...2,10	4	1500	2000	1400	2000

Обмоточные провода с волокнистой и плёночной изоляцией

Обмоточные провода с волокнистой и плёночной изоляцией имеют значительно большую толщину изоляции (0,15...0,60 мм) по сравнению с эмалированными проводами. Основной сортament медных и алюминиевых проводов с волокнистой изоляцией приведен в табл. 4.4 и 4.5.

В качестве волокнистой изоляции применяется пряжа хлопчатобумажная, шелковая, из капроновых, асбестовых, лавсановых и стеклянных волокон.

Таблица 4.4 – Медные обмоточные провода с волокнистой изоляцией

Марка провода	Диаметр провода без изоляции, мм	Характеристика провода	Толщина слоя изоляции (на одну сторону), мм
ПБ	1,0...5,2	Провод, изолированный несколькими слоями кабельной бумаги	0,15-0,17
ПБУ	прямоугольные, a×b a=2,44...5,5 b=6,9...22,0	То же, но с повышенной электрической прочностью	0,18-2,2
ПБД	0,18...5,2	Провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи	0,11-0,16
ПСД	0,31...5,2 и прямоугольные a×b a=0,9...5,5 b=2,1...12,5	Провод, изолированный двумя слоями обмотки из стекловолокна, пропитанной нагревостойким глифталевым лаком	0,11-0,16
ПСДК	0,31...5,2	То же, но пропитка более нагревостойкая кремнийорганическим лаком	0,11-0,16

Таблица 4.5 – Аллюминиевые обмоточные провода с волокнистой изоляцией

Марка провода	Диаметр провода без изоляции, мм	Характеристика провода	Толщина слоя изоляции (на одну сторону), мм
ЛПБ	1,35...8,0	Провод круглого или прямоугольного сечения, изолированный несколькими слоями обмотки из лент кабельной бумаги	0,15-0,90
АПБД	прямоугольные, а×b а=5,5...14,5 b=5,5...14,5	То же, но изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи	0,165-0,222
АПСД	1,62—5,2 и прямоугольные а×b а=2,1...5,5 b=4,1...12,5	Провод круглого и прямоугольного сечения, изолированный двумя слоями обмотки из стекловолкна, пропитанной нагревостойким (глифталевым) лаком	0,12-0,15
АПЛБД	То же, что ЛПБД круглого сечения диаметром 1,35...8,00	Провод круглого или прямоугольного сечения, изолированный обмоткой из лавсанового волокна и одним слоем хлопчатобумажной обмотки	0,3-2,6

Наибольшая нагревостойкость обмоточных проводов достигается применением стеклянной и асбестовой пряжи, подклеиваемой к поверхности провода с помощью глифталевых и кремнийорганических лаков, отличающихся повышенной стойкостью к нагреву.

Для изготовления обмоток трансформаторов с масляной изоляцией находят большое применение провода с изоляцией из бумажных лент, которые хорошо пропитываются минеральным маслом. Этим обеспечивается высокая электрическая прочность изоляции обмоток трансформаторов. Для повышения механической прочности изоляции из бумажных лент сверху ее накладывают спираль из хлопчатобумажной пряжи (провод марки ПББО). Наибольшей электрической

прочностью обладают обмоточные провода с плёночной изоляцией из лавсана (провод марки ППЛБО). Изоляция этих проводов отличается повышенной механической прочностью и нагревостойкостью до 120°С.

Обмоточные провода с эмалево-волокнутой изоляцией

Кроме перечисленных, выпускают также обмоточные провода с эмалево-волокнутой изоляцией. У этих проводов поверх слоя эмали наносится обмотка из хлопчатобумажной, шелковой, капроновой, лавсановой или стеклянной пряжи. Такого рода обмоточные провода применяют для более тяжелых условий работы в тяговых, шахтных электродвигателях и в других электрических машинах и аппаратах, где для эмалевой изоляции требуется защитное покрытие из волокнустых материалов. Наибольшей механической прочностью обладает обмотка из лавсановых волокон. Повышенной нагревостойкостью отличается обмотка из стеклянной пряжи.

В таблице 4.6 приведен основной сортамент обмоточных проводов с эмалево-волокнутой изоляцией. Основные требования, предъявляемые к обмоточным проводам с волокнутой изоляцией, состоят в следующем. У проводов с волокнутой изоляцией не должно наблюдаться просветов между нитями обмотки, наложенной на провод. Не должно быть разрывов нитей при навивании провода на стальной стержень диаметром, равным пятикратному диаметру (но не менее 3 мм) провода с волокнутой изоляцией в два слоя (провода марок ПБД и др.), или при навивании провода с однослойной изоляцией (провода марок ПБО и др.) на стержень диаметром, равным десятикратному диаметру провода (но не менее 6 мм).

Электроизоляционные свойства обмоточных проводов с волокнутой изоляцией относительно невысоки, так как все виды волокнутой изоляции гигроскопичны, т. е. поглощают влагу из воздуха. Гигроскопичность стеклянных и капроновых волокон несколько меньше гигроскопичности хлопчатобумажных и шелковых волокон.

Обмотки, выполненные из проводов с волокнутой изоляцией, нуждаются в тщательной сушке и пропитке изоляционными лаками или в компаундировании (пропитка изоляционными составами без растворителей).

Таблица 4.6 – Медные обмоточные провода с эмалево-волокнистой изоляцией

Марка провода	Диаметр провода без изоляции, мм	Толщина слоя изоляции (на одну сторону), мм	Характеристика провода
ПЭЛБО	0,38...2,1	0,08-0,10	Провод, изолированный масляной эмалью и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи
ПЭЛБД	0,72...2,1	0,14-0,16	Провод, изолированный масляной эмалью и двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи
ПЭЛШО	0,05...2,1	0,035-0,078	То же, но на слой масляной эмали наложен слой обмотки из натурального шелка
ПЭТСО	0,31...2,10	0,10-0,12	Провод, изолированный высокопрочной эмалью винифлекс и одним слоем обмотки из стеклянной пряжи
ПЭТКСОТ	0,33...1,56 и прямоугольные $a \times b$ $a=0,83...4,5$ $b=2,1...4,7$	0,07-0,10	То же, но применена нагревостойкая кремнийорганическая эмаль

Приведённые конструкции проводов применяются для изготовления обмоток электрических машин.

Электрическая прочность проводов с волокнистой изоляцией определяется электрической прочностью воздуха, заключенного между волокнами, а также электрической прочностью эмалевого изоляционного слоя – у проводов с эмалево-волокнистой изоляцией (ПЭЛБО, ПЭЛШО и др.). Пробивное напряжение слоя волокнистой изоляции проводов ПБД находится в пределах 450...600 В, а проводов ПЭЛБО и ПЭЛШО – 700...1000 В. Приблизительно такое же пробивное напряжение наблюдается у проводов и со стеклянной изоляцией, пропитанной нагревостойкими лаками (провода ПСД, ПСДК).

Кроме медных и алюминиевых проводов с эмалевой, волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией, выпускают также обмоточные провода из сплавов высокого сопротивления (манганин, константан и нихром с такими же видами изоляции).

4.2. Монтажные провода

Для монтажа радиодеталей и радиокомпонентов, узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры, монтажа электрических аппаратов и приборов применяются монтажные провода различного конструктивного исполнения. Токопроводящими жилами монтажных проводов служат луженые медные проволоки различного сечения, допускающие соединения пайкой низкотемпературными припоями.

Многожильные гибкие провода обеспечивают гибкость монтажа и надежную защиту от внешних воздействий. Материалом изоляции служат стеклянные и капроновые нити, ленты из триацетатной пленки, применяемые в диапазоне температур $-60...+105^{\circ}\text{C}$, поливинилхлоридная и полиэтиленовая изоляция с дополнительной защитной оболочкой из капрона, стойкая к влаге, маслам и грибковой плесени. Для повышения механической прочности к медным жилам добавляют стальные луженые проволоки.

В условных обозначениях монтажных проводов используют буквы, соответствующие конструктивным особенностям и характеристикам изоляции:

М – монтажный провод;

Л – лакированный;

Г – многопроволочная жила (отсутствие этой буквы указывает на то, что жила однопроволочная);

С – обмотка и оплетка из стекловолокна;

Ш – изоляция из полиамидного шелка,

Д – двойная обмотка

Ц – изоляция пленочная;

О – оплетка из полиамидного шелка;

В – поливинилхлоридная изоляция;

У – усиленный стальной проволокой;

П – изоляция из полиэтилена;

Э – экранированный, если буква *Э* стоит вслед за буквой *М*, то значит, что провод эмалированный.

Основные характеристики монтажных проводов приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Марка и основные характеристики монтажных проводов

Марка провода	Характеристика монтажного провода и изоляции	Сечение проводящей жилы, мм ²	Номинальное напряжение, В	Интервал рабочих температур, °С
1	2	3	4	5
<i>МГВ</i>	Многопроволочный, с поливинилхлоридной изоляцией	0,1...1,0	220	-40...+70
<i>МГВЭ</i>	Многопроволочный, с поливинилхлоридной изоляцией экранированный	0,75...1,0	220	-40...+70
<i>МГСП</i>	Многопроволочный, с обмоткой из стеклянных нитей в сплошной изоляции из полиэтилена	0,2...1,5	220	-60...+70
<i>МГСПЭ</i>	Многопроволочный, с обмоткой из стеклянных нитей в сплошной изоляции из полиэтилена с гибким проволочным экраном	0,2...1,5	220	-60...+70
<i>МГСЛ</i>	Многопроволочный, в обмотке и оплетке из стекловолокна, лакированный	0,2...1,5	127	-60...+105
<i>МГСЛЭ</i>	Многопроволочный, в обмотке и оплетке из стекловолокна, лакированный, экранированный	0,2...1,5	127	-60...+105
<i>МГСТ</i>	Многопроволочный, в обмотке из стекловолокна, покрытый кремнийорганическим лаком	0,35...1,5	220	-60...+200
<i>МГТЛ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой и оплеткой из лавсанового волокна, лакированный	0,12...0,2	250	-60...+150

Продолжение табл. 4.7

1	2	3	4	5
<i>МГТЛЭ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой и оплеткой из лавсанового волокна, лакированный, экранированный	0,35...1,5	250	-60...+150
<i>МГТФ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой из фторопластового волокна	0,07...0,14	250	-60...+220
<i>МГТФЭ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой из фторопластового волокна, экранированный	0,07...0,2	250	-60...+220
<i>МГЦСЛ</i>	Многопроволочный, с пленочной изоляцией, в обмотке и оплетке из стекловолокна, лакированный	0,35...4,0	220	-60...+70
<i>МГЦСЛЭ</i>	Многопроволочный, с пленочной изоляцией, в обмотке и оплетке из стекловолокна, лакированный, экранированный	0,35...4,0	220	-60...+70
<i>МГШ</i>	Многопроволочный, изолированный одним слоем оплетки из искусственного шелка	0,05...0,1	24	-60...+105
<i>МГШВ</i>	Многопроволочный, изолированный двойной обмоткой из искусственного шелка и полихлорвинилом	0,14...0,35	500	-50...+70
<i>МГШВЭ</i>	Многопроволочный, изолированный двойной обмоткой из искусственного шелка и полихлорвинилом, экранированный	2·0,35... ...2·0,7 3·0,35... ...3·0,75	500	-50...+70
<i>МГШВЭЛ</i>	Многопроволочный, изолированный двойной обмоткой из искусственного шелка и полихлорвинилом, экранированный, лакированный	0,5	1000	-60.. +90

Продолжение табл. 4.7

1	2	3	4	5
<i>МГШВЭВ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой из триацетатного шелка в сплошной изоляции из поливинилхлоридного пластика, экранированный	0,5	1000	-60...+90
<i>МГШД</i>	Многопроволочный, изолированный двумя слоями оплетки из искусственного шелка	0,05...0,5	60	-60...+90
<i>МГШДЛ</i>	Многопроволочный, изолированный двумя слоями оплетки из искусственного шелка, лакированный	0,05...0,5	250	-60...+105
<i>МГШДО</i>	Многопроволочный, изолированный двойной обмоткой и оплеткой из искусственного шелка	0,05...2,5	127	-60...+105
<i>МГШДО II</i>	Многопроволочный, изолированный двойной обмоткой и оплеткой из искусственного шелка с подклеенной оплеткой из полиамидного шелка	0,05...2,5	127	-60...+105
<i>МГШП</i>	Многопроволочный, изолированный двойной обмоткой из искусственного шелка и полихлорвинилом, гибкий	0,14...0,35	500	-50...+105
<i>МГШПЭ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой из шелка и полиэтиленом, экранированный	2·0,35... ...2·1,0 3·0,5... ...3·1,0	500	-60...+ 105
<i>МГШПЭВ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой из шелка и полиэтиленом, экранированный, изолированный полихлорвинилом	0,12...0,35	500	-60...+105

Продолжение табл. 4.7

1	2	3	4	5
<i>МГЦШП</i>	Многопроволочный, с пленочной изоляцией, с двойной обмоткой и подклеенной оплеткой из полиамидного шелка	0,05...2,5	100	-60...+90
<i>МКПМУ</i>	Многопроволочный, с капроновой оплеткой, полиэтиленовой изоляцией, усиленный стальной жилой	0,05...2,5	100	-60...+90
<i>МКПМУЭ</i>	Многопроволочный, с капроновой оплеткой, полиэтиленовой изоляцией, усиленный стальной жилой, экранированный	0,05...2,5	100	-60...+90
<i>МОГ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой из х/б пряжи, лентами из лакошелка, обмоткой и оплеткой из шелка и капрона	0,3...0,5	1000	-50...+60
<i>МПКМ</i>	Многопроволочный, со сплошной полиэтиленовой изоляцией и дополнительной защитной капроновой оболочкой	0,12...1,5	1000	-50...+60
<i>МПКМЭ</i>	Многопроволочный, со сплошной полиэтиленовой изоляцией и дополнительной защитной капроновой оболочкой, экранированный	0,12...1,5	1000	-50...+60
<i>МПМ</i>	Многопроволочный со сплошной полиэтиленовой изоляцией	0,12...1,5	250	-50...+70
<i>МПМЭ</i>	Многопроволочный со сплошной полиэтиленовой изоляцией, экранированный	0,12...0,5	250	-50...+70
<i>МПМУ</i>	Многопроволочный со сплошной полиэтиленовой изоляцией, усиленный луженой стальной жилой	0,2...0,5	250	-50...+70

Продолжение табл. 4.7

1	2	3	4	5
<i>МПМУЭ</i>	Многопроволочный, со сплошной полиэтиленовой изоляцией, усиленный луженой стальной жилой, экранированный	0,2...0,5	250	-50...+70
<i>МШВ</i>	Однопроволочный, с обмоткой из триацетатного шелка в сплошной изоляции из поливинилхлоридного пластиката	0,08...1,5	1000	-50...+70
<i>МШП</i>	Однопроволочный, изолированный двойной обмоткой шелка в сплошной изоляции из полиэтилена	0,08... 1,5	1000	-50...+70
<i>МШДЛ</i>	Однопроволочный, с двойной обмоткой из полиамидного шелка, лакированный	0,1...0,75	220	-60...+105
<i>МЭШДЛ</i>	Однопроволочный, эмалированный с двойной обмоткой из полиамидного шелка, лакированный	0,1...0,75	220	-60...+105
<i>ПВ-500</i>	Однопроволочный, с гибкой изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, стойкого к влаге, маслам и грибковой плесени	0,08...2,5	500	-50...+70
<i>ПВ-1000</i>	Однопроволочный, с гибкой изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, стойкого к влаге, маслам и грибковой плесени	0,08...2,5	1000	-50...+70
<i>ПВЭ-500</i>	С одной, двумя или тремя изолированными медными жилами с гибкой изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, стойкого к влаге, маслам и грибковой плесени, экранированный	0,08...2,5	500	-50...+70

Продолжение табл. 4.7

1	2	3	4	5
<i>ПВЭ-1000</i>	С одной, двумя или тремя изолированными медными жилами, с гибкой изоляцией из поливинилхлоридного пластика, стойкого к влаге, маслам и грибковой плесени, экранированный	0,08...2,5	1000	-50...+70
<i>ПВК-500</i>	Однопроволочный, с гибкой изоляцией из поливинилхлоридного пластика и с защитной оболочкой из капрона, стойкий к влаге, маслам и грибковой плесени	0,08...2,5	500	-50...+70
<i>ПВХ-1000</i>	Однопроволочный, с гибкой изоляцией из поливинилхлоридного пластика и с защитной оболочкой из капрона, стойкий к влаге, маслам и грибковой плесени	0,08...2,5	1000	-50...+70
<i>ПВКЭ-500</i>	С одной, двумя или тремя изолированными медными жилами с гибкой изоляцией из поливинилхлоридного пластика с защитной оболочкой из капрона, стойкий к влаге, маслам и грибковой плесени, экранированный	0,08..25	500	-50 .+70
<i>ПВКЭ-1000</i>	С одной, двумя или тремя изолированными медными жилами с гибкой изоляцией из поливинилхлоридного пластика с защитной оболочкой из капрона, стойкий к влаге, маслам и грибковой плесени, экранированный	0,08...2,5	1000	-50...+70
<i>ПП-500</i>	Однопроволочный, с гибкой полиэтиленовой изоляцией, стойкий к влаге, маслам и грибковой плесени	0,08...2,5	500	-50 .+70

Окончание табл. 4.7

1	2	3	4	5
<i>ППЭ-500</i>	С одной, двумя или тремя изолированными медными жилами с гибкой полиэтиленовой изоляцией, стойкий к влаге, маслам и грибковой плесени, экранированный	0,08...2,5	500	-50.. +70
<i>ППК-500</i>	Однопроволочный, с гибкой полиэтиленовой изоляцией и с защитной оболочкой из капрона, стойкий к влаге, маслам и грибковой плесени	0,08...2,5	500	-50.. +70
<i>ППКЭ-500</i>	С одной, двумя или тремя изолированными медными жилами с гибкой полиэтиленовой изоляцией, с защитной оболочкой из капрона, стойкий к влаге маслам и грибковой плесени, экранированный	0,08...2,5	500	-50...+70
<i>ПМВ</i>	Однопроволочный, изолированный полихлорвинилом	0,2...0,75	380	-60...+70
<i>ПМВГ</i>	Многопроволочный, изолированный обмоткой из х/б пряжи, стекловолокна и полихлорвинилом	0,2...0,75	250	-50...+ 100
<i>ПМВЭ</i>	Однопроволочный, изолированный полиэтиленом, экранированный	0,1...0,2	500	-60 .+70
<i>ПМП</i>	Однопроволочный, изолированный полиэтиленом	0,2...0,5	380	-60...+70
<i>ПМОВ</i>	Однопроволочный, изолированный обмоткой из х/б пряжи, стекловолокна и полихлорвинилом	0,2...0,75	380	-60...+70

Марки и основные характеристики монтажных кабелей приведены в таблице 4.8, в таблице 4.9 представлены монтажные провода с волокнисто-пластмассовой изоляцией, в таблицах 4.10 – 4.13 – монтажные многожильные провода, в таблице 4.14 – монтажные кабели.

Таблица 4.8 – Марка и основные характеристики монтажных кабелей

Марка кабеля	Характеристика монтажного кабеля и изоляции	Сечение проводящей жилы, мм ²	Номинальное напряжение, В	Интервал рабочих температур, °С
<i>МКШ</i>	Монтажный многожильный кабель с изоляцией жил и общей оболочкой из поливинилхлоридного пластика	0,35...0,75	500	-40...+60
<i>МКШЭ</i>	Монтажный многожильный кабель с изоляцией жил и общей оболочкой из поливинилхлоридного пластика, экранированный	0,35...0,75	500	-40...+60
<i>МПКШ</i>	Монтажный многожильный кабель с изоляцией жил из полиэтилена и общей оболочкой из поливинилхлоридного пластика	0,35...0,75	500	-40...+60
<i>МПКШЭ</i>	Монтажный многожильный кабель с изоляцией жил из полиэтилена и общей оболочкой из поливинилхлоридного пластика, экранированный	0,35...0,75	500	-40...+60

Таблица 4.9 – Монтажные провода с волокнисто-пластмассовой изоляцией

Число жил и их сечение, мм ²	Наружный диаметр проводов (не более), мм					
	МШВ, МШП	МГШВ, МГШП	МГСП	МГШВЭ, МГШПЭ	МГСПЭ	МГШВЭВ
1x0,08	1,0	-	-	-	-	-
1x0,12	-	1,3	1,45	1,9	-	2,9
1x0,14	-	1,4	-	2	-	3
1x0,2	1,6	1,6	1,8	2,2	2,4	-
1x0,35	1,9	1,9	2	2,5	2,6	3,5
1x0,5	2	2,2	2,1	2,8	-	-
1x0,75	2,3	2,5	2,4	3,3	3	-
1x1	2,6	2,8	-	-	-	-
1x1,5	2,7	3	-	-	-	-
2x0,35	-	-	-	4,6	4,6	-
2x0,5	-	-	-	5,2	-	-
2x0,75	-	-	-	5,8	-	-
3x0,35	-	-	-	4,9	4,9	-
3x0,5	-	-	-	5,4	5,1	-
3x0,75	-	-	-	6,8	-	-

Таблица 4.10 – Многожильные монтажные провода

Сечение жилы, мм ²	Число и диаметр проводов в жиле	Толщина изоляции (не менее), мм	Наружный диаметр проводов (не более), мм			
			МПМ	МПМЭ	МПКМ	МПКМЭ
0,12	7x0,15	0,2	1	1,5	1,2	1,7
0,2	7x0,2	0,2	1,15	1,7	1,35	1,9
0,35	7x0,26	0,2	1,4	1,9	1,6	2,1
0,5	19x0,18	0,2	1,5	2	1,7	2,2
0,75	19x0,23	0,25	1,9	2,4	2,1	2,6
1	19x0,26	0,25	2,1	2,6	2,3	2,8
1,5	19x0,32	0,25	2,4	2,9	2,6	3,1

Таблица 4.11 – Многожильные монтажные провода,
усиленные стальной проволокой

Сече- ние жилы, мм ²	Число и диа- метр проволок в жиле		Тол- щина изоля- ции (не менее), мм	Наружный диаметр проводов (не более), мм			
	медных	сталь- ных		МПМУ	ЛШМУЭ	МКПМУ	МКПМУЭ
0,12	6x0,15	1x0,15	0,2	1	1,5	1,2	1,7
0,2	6x0,2	1x0,2	0,2	1,15	1,7	1,35	1,9
0,35	6x0,25	1x0,25	0,2	1,4	1,9	1,6	2,1

Таблица 4.12 – Монтажные провода на напряжение 500 В

Сечение жилы, мм ²	Наружные диаметры проводов (не более), мм							
	ПВ-500, ПП-500	ПВЭ-500, ППЭ- 500			ПВК-500, ППК-500	ПВКЭ-500, ППКЭ-500 1		
		число жил				число жил		
		1	2	3		1	2	3
0,08	1,2	-	-	1,5	-	-	-	-
0,12	1,3	1,8	3,2	3,4	1,6	2,1	3,8	4,1
0,2	1,5	2	3,6	3,8	1,8	2,3	4,2	4,1
0,35	1,6	2,2	3,8	4,1	1,9	2,5	4,4	4,7
0,5	1,8	2,3	4,2	4,5	2,1	2,7	4,8	5,1
0,75	2,1	2,7	4,8	5,1	2,3	2,9	5,2	5,6
1	2,2	2,8	5	5,3	2,4	3	5,4	5,8
1,5	2,5	3,1	-	-	2,8	3,4	-	-
2,5	3,2	3,8	-	-	3,4	4	-	-

Таблица 4.13 – Монтажные провода на напряжение 1000 В

Сечение жилы, мм ²	Наружные диаметры проводов (не более), мм							
	ПВ-1000	ПВЭ-1000			ПВК-1000	ПВКЭ-1000		
		число жил				число жил		
		1	2	3		1	2	3
0,08	1,4	-	-	-	1,7	-	-	-
0,12	1,5	2	3,6	3,8	1,8	2,3	4,2	4,5
0,2	1,7	2,2	4	4,3	1,9	2,4	4,4	4,7
0,35	1,8	2,4	4,2	4,5	2,1	2,7	4,8	5,1
0,5	2	2,5	4,6	4,9	2,2	2,8	5	5,3
0,75	2,3	2,9	5,2	5,6	2,5	3,1	5,6	6
1	2,4	3	5,4	5,8	2,6	3,2	5,8	6,2
1,5	2,7	3,3	-	-	3	3,6	-	-
2,5	3,4	4	-	-	3,6	4,2	-	-

Таблица 4.14 – Монтажные кабели

Число жил и их сечение, мм ²	Наружный диаметр кабелей (не более), мм			
	МКШ	МКШЭ	МПКШ	МПКШЭ
1	2	3	4	5
2x0,35	6,7	7,5	6,1	6,9
3x0,35	6,9	7,7	6,4	7,2
5x0,35	8,2	9,0	7,6	8,4
7x0,35	8,8	9,6	8,2	9
10x0,35	11,6	12,4	10,8	11,6
14x0,35	12,4	13,2	11,6	12,4
2x0,5	7	7,8	6,6	7,4
3x0,5	7,2	8	6,7	7,5
5x0,5	8,5	9,5	8	8,8
7x0,5	9,2	10	8,6	9,1
10x0,5	12,2	13	11,4	12,2
14x0,5	13,1	13	12,2	13
2x0,75	7,5	8,3	7,1	7,9

1	2	3	4	5
3x0,75	7,7	85	7,3	8,1
5x0,75	9,2	10	8,7	9,5
7x0,75	10	10,8	9,4	10,2
10x0,75	13,2	14	12,4	13,2
14x0,75	14,2	15	13,3	14,1

4.3. Установочные провода

Для силовых и осветительных сетей применяются как медные, так и алюминиевые установочные провода, которые имеют резиновую, поливинилхлоридную или полиэтиленовую изоляцию. Провода с резиновой изоляцией применяются в диапазоне температур от -50 до +50°C, с относительной влажностью 98% при 20°C и при 40°C (провода с пластмассовой изоляцией).

В условных обозначениях марки провода используются буквы, обозначающие материал токоведущей жилы, материал изоляции и конструктивное исполнение провода.

Обычно первая буква обозначает материал токоведущей жилы (*A* – алюминий). Отсутствие в марке провода буквы *A* означает, что токоведущая жила из меди.

Вторая буква – *П* обозначает провод (для медного провода это первая буква).

Третья буква (для медного провода – вторая буква) обозначает материал изоляции:

R – резина;

B – полихлорвинил или поливинилхлорид,

П – полиэтилен.

В обозначении проводов могут быть буквы, характеризующие элементы конструктивного выполнения:

G – гибкий;

П – плоский с разделительным основанием;

O – оплётка;

C – без разделительного основания;

T – для прокладки в трубах.

Для электропроводки в сухих помещениях используются как медные, так и алюминиевые провода в зависимости от величины потребляемого тока. При этом следует знать, что провода с медными жилами допускают в 1,5 раза большую плотность тока, чем алюминиевые, да и механическая прочность медных проводов в 2...3 раза выше алюминиевых, они не «текут» в контактных зажимах и более устойчивы к коррозии.

Марки и основные характеристики установочных проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией приведены в таблицах 4.15, 4.16.

Таблица 4.15 – Провода с резиновой изоляцией

Марка провода	Площадь сечения жилы, мм ²	Материал токопроводящей жилы и характеристика изоляции	Назначение провода и область применения
1	2	3	4
<i>ПР</i>	0,75...100	Провод с медной однопроволочной жилой с резиновой изоляцией в пропитанной хлопчатобумажной оплетке, не распространяющей горение	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений в сетях с напряжением 660 В или до 3000 В (ПР-3000)
<i>ПРВ</i>	1...10	Провод с медной однопроволочной жилой с резиновой изоляцией в оболочке из полихлоридного пластика	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений в сетях с напряжением 660 В или до 3000 В (ПРВ-3000) в помещениях с повышенной влажностью
<i>ПРГ</i>	0,75...240	Провод с медной многопроволочной жилой с резиновой изоляцией в пропитанной хлопчатобумажной оплетке, не распространяющей горение	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений в сетях с напряжением 660 В или до 3000 В (ПРГ-3000)

Продолжение табл. 4.15

1	2	3	4
<i>ПРГВ</i>	1...6	Провод с медной многопроволочной жилой с резиновой изоляцией и в оболочке из поливинилхлоридного пластика	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений (на роликах и изоляторах)
<i>ПРГЛ</i>	0,75...70	Провод с медной многопроволочной жилой с резиновой изоляцией и в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, покрытой лаком	Для прокладки во зоричных цепях, где требуется гибкость провода с напряжением 660 и 1000 В в зависимости от толщины изоляции
<i>ПРД</i>	0,75...6	Провод двужильный, витой, каждая многопроволочная жила изолирована резиной и оплеткой из хлопчатобумажной пряжи	Для прокладки на роликах и в сухих помещениях в установках с переменным напряжением до 380 В
<i>ПРДШ</i>	0,75...6	Провод двужильный, витой, каждая многопроволочная жила изолирована резиной и в оплетке из лавсанового шелка	Для прокладки на роликах и в сухих помещениях в установках с переменным напряжением до 380 В
<i>ПРЛ</i>	0,75...6	Провод с медной однопроволочной жилой с резиновой изоляцией и в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, покрытой лаком	Для прокладки во зоричных цепях с напряжением 660 и 1000 В в зависимости от толщины изоляции
<i>ПРИ</i>	1...95	Провод с одной, двумя или тремя медными многопроволочными жилами с резиновой изоляцией в общем гибком панцире из оцинкованных стальных проволок	Для неподвижной прокладки в устройствах, требующих экранировки и механической защиты с напряжением 660 и 1000 В

1	2	3	4
<i>ПРПП</i>	1...95	Провод с одной, двумя или тремя медными многопроволочными жилами с резиновой изоляцией в общем гибком панцире из оцинкованных стальных проволок в общем резиновом шланге	Для неподвижной прокладки в устройствах, требующих экранировки и механической защиты с напряжением 660 и 1000 В в тяжелых условиях эксплуатации
<i>ПРТО</i>	2,5...120	Провод, состоящий из одной или нескольких многопроволочных медных жил с резиновой изоляцией в общей пропитанной хлопчатобумажной оплетке	Для неподвижной прокладки в металлических трубах и рукавах в устройствах с напряжением 660 и 2000 В
<i>ПРФ</i>	1...10	Провод с одной, двумя или тремя медными многопроволочными жилами с резиновой изоляцией в обмотке из прорезиненной ткани в общей тонкостенной фальцованной металлической оболочке	Для неподвижной прокладки в устройствах, требующих экранировки и механической защиты с напряжением 660 и 1000 В в случае защиты от легких механических повреждений
<i>АПР</i>	2,5...120	Провод с алюминиевой жилой и резиновой изоляцией, в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений
<i>АППР</i>	2,5...10	Провод с алюминиевой жилой и резиновой изоляцией, в пропитанной хлопчатобумажной оплетке, не распространяющей горение	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений (на роликах и изоляторах)
<i>АПРВ</i>	2,5...10	Провод с алюминиевой жилой и резиновой изоляцией, с наружной оболочкой из поливинилхлоридного пластика	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений (на роликах и изоляторах)

1	2	3	4
<i>АПРН</i>	2,5...120	Провод с алюминиевой жилой и резиновой изоляцией, с наружной оболочкой из резины, не распространяющей горение	Для неподвижной прокладки внутри и вне помещений
<i>АПРТО</i>	2,5...120	Провод, состоящий из одной или нескольких многопроволочных алюминиевых жил с резиновой изоляцией в общей пропитанной хлопчатобумажной оплетке	Для неподвижной прокладки в металлических трубах и рукавах в устройствах с напряжением 660 и 2000 В

Таблица 4.16 – Провода с пластмассовой изоляцией

Марка провода	Площадь сечения жилы, мм ²	Материал токопроводящей жилы и характеристика изоляции	Назначение провода и область применения
1	2	3	4
<i>ПВ</i>	0,5...95	Провод с медной однопроволочной жилой в гибкой изоляции из поливинилхлоридного пластиката	Для прокладки в трубах и каналах несгораемых строительных конструкций и неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях 380 В, 660 В в зависимости от толщины изоляции
<i>ПВЭ</i>	0,5...95	Провод с медной однопроволочной жилой в гибкой изоляции из поливинилхлоридного пластиката, экранированный	Для прокладки в трубах и каналах несгораемых строительных конструкций и неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях 380 В, 660 В в зависимости от толщины изоляции

Продолжение табл. 4.16

1	2	3	4
<i>ПГВ</i>	0,5...95	Провод с медной многопроволочной жилой в гибкой изоляции из поливинилхлоридного пластика	Для прокладки вторичных цепей и для соединений в скрытой и открытой проводке
<i>АПЕ</i>	2,5...120	Провод с алюминиевой однопроволочной жилой в поливинилхлоридной изоляции	Для неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях 380 В, 660 В в зависимости от толщины изоляции
<i>ПП</i>	0,5...95	Провод с медной однопроволочной жилой в полиэтиленовой изоляции	Для неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях 380 В
<i>АПП</i>	2,5...120	Провод с алюминиевой однопроволочной жилой в полиэтиленовой изоляции	Для неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях
<i>ППВ</i>	0,75...4	Провод плоский с двумя или тремя медными однопроволочными жилами, расположенными параллельно, в поливинилхлоридной изоляции	Для неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях
<i>АППВ</i>	2,5...6	Провод плоский с двумя или тремя алюминиевыми однопроволочными жилами, расположенными параллельно, в поливинилхлоридной изоляции	Для неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях
<i>ППП</i>	0,75...4	Провод плоский с двумя или тремя медными однопроволочными жилами, расположенными параллельно, в полиэтиленовой изоляции с разделительным основанием	Для неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях

1	2	3	4
<i>АППП</i>	2,5...6	Провод плоский с двумя или тремя алюминиевыми однопроволочными жилами, расположенными параллельно, в полиэтиленовой изоляции с разделительным основанием	Для неподвижной прокладки в силовых и осветительных сетях
<i>ППВС</i>	0,75...4	Провод с двумя однопроволочными медными жилами, расположенными параллельно в поливинилхлоридной изоляции без разделительного основания	Для неподвижной скрытой проводки под штукатурку, а также в трубах и каналах несгораемых строительных конструкций
<i>АППВС</i>	2,5...6	Провод с двумя однопроволочными алюминиевыми жилами, расположенными параллельно. в поливинилхлоридной изоляции без разделительного основания	Для неподвижной скрытой проводки под штукатурку, а также в трубах и каналах несгораемых строительных конструкций
<i>ПППС</i>	0,75...4	Провод плоский с двумя или тремя медными однопроволочными жилами, расположенными параллельно, в полиэтиленовой изоляции без разделительного основания	Для неподвижной скрытой проводки под штукатурку, а также в трубах и каналах несгораемых строительных конструкций
<i>АПППС</i>	2,5...6	Провод плоский с двумя или тремя алюминиевыми однопроволочными жилами, расположенными параллельно, в полиэтиленовой изоляции без разделительного основания	Для неподвижной скрытой проводки под штукатурку, а также в трубах и каналах несгораемых строительных конструкций

Длительно допустимая величина тока для проводов с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией с медными и алюминиевыми жилами представлена в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Допустимая величина тока

Площадь сечения жилы, мм ²	Допустимая величина тока, А							
	Провода, проложенные открыто		Провода, проложенные в одной трубе					
			Два одно- жильных		Три одно- жильных		Четыре одно- жильных	
	Медь	Алюм.	Медь	Алюм.	Медь	Алюм.	Медь	Алюм.
1,0	17	-	16	-	15	-	14	-
1,5	22	18	20	16	19	15	19	15
2,0	26	21	24	19	22	18	22	15
2,5	30	24	27	20	25	19	25	19
3,0	33	27	30	25	27	24	27	24
4,0	41	32	38	28	35	28	30	23
6,0	50	39	46	36	42	32	40	30
10	80	55	70	50	60	47	50	39
16	100	75	85	60	80	60	75	55
25	140	105	115	65	100	80	90	70

Выбор сечения жилы провода определяется длительным значением максимального тока, нагревающего изоляцию, и механическими нагрузками на провод, в том числе в контактных зажимах оконечных устройств электропроводки.

При комнатной температуре +25°С допустимый перегрев изоляции не должен быть больше 40...45°С.

Для относительно малых токов сечение жил определяется механической прочностью проводника, особенно в винтовых контактных зажимах. Исходя из этого, площадь сечения медной жилы не должна быть меньше 1 мм², а алюминиевой жилы – 2 мм².

4.4. Алюмомедный провод

Алюмомедные провода, кабели в системе электропитания дешевы, весят значительно меньше медных, находят применение практически везде, где применимы проводные изделия из алюминия. Кроме того, они широко применяются в автомобилестроении, так как обеспечивают существенное, до сорока процентов, снижение веса электрооборудования.

Из алюмомедных проводников изготавливают экраны высокочастотных кабелей, облегчая их и удешевляя производство. На использовании «скин-эффекта» (на частотах выше 5 мегагерц, электрический ток распространяется по поверхностным слоям проводника) основывается применение алюмомедного провода в коаксиальных и сетевых кабелях при построении низших сегментов локальных сетей.

Сравнение параметров медного и алюмомедного проводов представлено в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Сравнительная таблица токовых нагрузок и веса провода

Сечение, мм ²	Медь			Алюмомедь		
	Токовая нагрузка, А	Вес кабеля, кг/км	Электрическое сопротивление 1 км жилы, Ом, не более	Токовая нагрузка, А	Вес кабеля, кг/км	Электрическое сопротивление 1 км жилы, Ом, не более
1x2,5	60	66	7,98	48	52	12,47
1x4,0	80	90	4,95	64	68	7,73
1x6,0	100	120	3,30	80	86	5,16
1x10	135	180	1,91	108	124	2,98
1x16	175	250	1,21	140	168	1,89
1x25	220	370	0,78	176	236	1,22
1x35	270	490	0,554	216	296	0,87
1x50	330	660	0,386	264	412	0,603

Токопроводящие жилы кабелей *КГ (АМ)*, *КГ-ХЛ (АМ)* выполнены из биметаллической (медь-алюминий) проволоки и являются электрическим проводником с малым весом, сочетающим в себе превосходные характеристики меди, включая устойчивость к коррозии и хорошую проводимость алюминия, а также небольшой вес. В то время как проводимость жилы из биметаллической проволоки составляет 64% от проводимости меди, её масса составляет лишь 37% от массы меди, поэтому даже увеличение сечения алюмомедных проводников с целью достижения такой же проводимости, как и у медных, они име-

ют вес приблизительно на 40% меньше. Их поверхность не подвержена окислению, которое возможно при соединениях медных проводников с алюминиевыми.

Применение алюмомедных проволок в токопроводящей жиле кабеля не ухудшает гибкость и стойкость к многократным изгибам на угол $\pm \pi/2$ рад, которая составляет не менее 9000 циклов для кабелей с сечением основных жил 6...16 мм, 6000 циклов с сечением основных жил 25...50 мм, 4000 циклов с сечением основных жил 70...120 мм, 3500 циклов с сечением основных жил 150...185 мм.

4.5. Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией

Силовые кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией (таблица 4.19) применяются для передачи и распределения электрической энергии в установках напряжением 660 В переменного тока и до 1000 В постоянного тока. Кабели с резиновой изоляцией могут прокладываться на трассах с неограниченной разностью уровней прокладки. Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией выпускаются одно-, двух- и трёхжильными с сечением жил от 1 до 500 мм². Жилы состоят из проволок, изготовленных из отожженной меди (ММ), и имеют круглую форму. Каждая жила изолирована электроизоляционной резиной и прорезиненной тканью (фазовая изоляция).

Толщина резиновой изоляции составляет 1...5 мм.

В многожильных кабелях изолированные жилы скручены (свиты) друг с другом и заключены в общую защитную оболочку, которая изготавливается из свинца, полихлорвинилового пластиката или из специальной светостойкой резины.

Промежутки между скрученными изолированными жилами внутри кабеля заполняют кабельной пряжей (междуфазное заполнение), пропитанной противогнилостным составом. С целью повышения электрической прочности кабелей на постоянное напряжение 3000...10000 В на их скрученные изолированные жилы накладывают общую поясную изоляцию из резины. Поверх неё накладывается защитная оболочка из свинца, полихлорвинилового пластиката или из специальной резины.

Радиальная толщина свинцовой оболочки колеблется в пределах от 1,05 до 2,0 мм, а толщина полихлорвиниловой и резиновой оболочки находится в пределах от 2 до 4 мм. Чем больше диаметр кабеля под оболочкой, тем больше толщина защитной оболочки.

Для защиты кабелей они снабжаются ещё броневым покровом из стальных лент или из плоских стальных проволок.

Броневого покрова накладывают на защитную оболочку из свинца, полихлорвинилового пластиката или специальной резины.

Между защитной оболочкой и броневым покровом прокладывают слой из пропитанной кабельной бумаги или пряжи. Этот промежуточный слой (нижняя подушка) предохраняет защитную оболочку от возможных повреждений её броневым покровом. Для защиты стальных броневых покровов от коррозии (ржавление) поверх них накладывают слой грубой пряжи (верхняя подушка), пропитанной водостойким битуминозным составом, в который введен антисептик (нафтенат меди). Последний обеспечивает устойчивость джутовой пряжи против разрушающего действия микроорганизмов при прокладке кабелей в земле.

В двухжильных небронированных кабелях при сечении жил до 6 мм² включительно последние располагаются параллельно друг другу. Толщина резиновой изоляции на жилах в кабелях составляет 1...5 мм. Чем больше сечение жилы и чем выше номинальное напряжение кабеля, тем больше толщина резиновой изоляции.

Широкое применение получили кабели с алюминиевыми жилами с резиновой изоляцией жил (марки этих кабелей: *АСРГ*; *АСРБГ*; *АСРБ*; *АВРГ*; *АВРБГ*; *АВРБ* и др.). Конструкции этих кабелей аналогичны конструкциям кабелей с медными жилами.

Кроме кабелей с резиновой изоляцией жил, выпускаются кабели с пластмассовой изоляцией: полиэтиленовой или из полихлорвинилового пластиката. Кабели с пластмассовой изоляцией жил изготавливаются на напряжения от 660 до 35 000 В (35 кВ). У всех кабелей на напряжение от 6000 В и выше на каждую изолированную жилу накладывают экран – оболочку из полупроводящей резины, полупроводящая бумаги, наполненной ламповой сажой или из медной фольги.

Толщина пластмассовой изоляции жил кабелей напряжением до 1 кВ составляет 1,6...2,0 мм, на 6 и 10 кВ – 3,5...5,5 мм; на 20 кВ – 7 мм и 35 кВ – 12 мм.

Таблица 4.19 – Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией

Марка кабеля		Особенности конструкции кабеля	Область применения
медные жилы	алюминиевые жилы		
<i>СРГ</i>	<i>АСРГ</i>	В свинцовой оболочке, небронированный и без покровов из пряжи	Для прокладки в сухих помещениях при отсутствии механических воздействий на кабель
<i>СРБ</i>	<i>АСРБ</i>	В свинцовой оболочке, бронированный двумя стальными лентами с наружным покровом из пропитанной пряжи	Для прокладки в земле и вне зданий при необходимости защиты кабеля от механических воздействий
<i>СРБГ</i>	<i>АСРБГ</i>	В свинцовой оболочке, бронированный двумя стальными лентами без наружного покрова из пряжи	Для прокладки в сухих и сырых помещениях при необходимости защиты кабеля от механических воздействий
<i>ВРГ</i>	<i>АВРГ</i>	В поливинилхлоридной оболочке, небронированный и без покровов из пряжи	Для прокладки в сырых и особо сырых помещениях при отсутствии механических воздействий на кабель
<i>ВРБ</i>	<i>АВРБ</i>	В поливинилхлоридной оболочке, бронированный двумя стальными лентами с наружным покровом из пропитанной пряжи	Для прокладки в земле и вне зданий при необходимости защиты кабеля от механических воздействий
<i>ВРБГ</i>	<i>АВРБГ</i>	В поливинилхлоридной оболочке, бронированный двумя стальными лентами без наружного защитного покрова из пряжи	Для прокладки в сухих и сырых помещениях при необходимости защиты кабеля от механических воздействий

Кабели на напряжение 10, 20 и 35 кВ, кроме полупроводящего или проводящего (медная фольга) экрана, наложенного на изоляцию жилы, имеют ещё экран, наложенный непосредственно на жилу кабеля. Это направлено на выравнивание напряженностей электрического поля в слое изоляции каждой жилы, а следовательно, к повышению электрической прочности изоляции кабеля.

Жилы кабелей с пластмассовой изоляцией (полиэтилен ВД или полихлорвиниловой пластикат), скрученные друг с другом, заключены в оболочку из полихлорвинилового пластиката, полиэтилена, алюминия или в оболочку из стальной гофрированной ленты. На оболочки некоторых конструкций кабелей накладываются еще броневые покрытия из стальных лент. Они предназначены для защиты кабелей от возможных механических повреждений (прокладка кабелей в земле и по стенам зданий). Кабели с пластмассовой изоляцией могут использоваться при температуре окружающей среды: от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$, а длительно допускаемая температура самого кабеля $+70^{\circ}\text{C}$. Кратковременная максимально допустимая температура жил кабелей с полиэтиленовой изоляцией $+120^{\circ}\text{C}$, а жил с полихлорвиниловой изоляцией $+150^{\circ}\text{C}$.

Кабели с пластмассовой изоляцией жил, как и кабели с резиновой изоляцией, предназначены для стационарной прокладки на трассах с неограниченной разностью уровней, так как в них отсутствует какая-либо пропиточная жидкость, склонная к перетеканию.

4.6. Кабели с бумажной изоляцией

Наибольшее применение получили кабели с бумажной пропитанной изоляцией как наиболее дешевой и обеспечивающей высокую электрическую прочность.

Силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией выпускают на напряжения 1, 3, 6, 10, 20, 35 кВ и выше.

Токопроводящие жилы кабелей изготавливают из мягкой медной проволоки (марки ММ), а также из алюминиевой мягкой или твердой проволоки (марки АМ и АПТ). Как и в кабелях с резиновой изоляцией, токопроводящие жилы сечением до 16 мм^2 включительно (медные) и до 50 мм^2 (алюминиевые) изготавливают однопроволочными, большим сечением – многопроволочными.

Это необходимо для обеспечения определенной гибкости кабелей.

Сечения токопроводящих жил могут иметь круглую, сегментную или секторную формы.

В одножильных кабелях применяют жилы круглой формы, в двухжильных – круглые или сегментные, а в трёх- и четырёхжильных кабелях – секторные.

Сегментная и секторная формы жил дают возможность наиболее плотно расположить их в кабеле, что обеспечивает меньший объем кабеля. С этой же целью круглые жилы делают уплотнёнными. Каждая из жил в кабеле имеет изоляцию, состоящую из нескольких слоев кабельной бумаги толщиной 0,125 или 0,175 мм, пропитанной вязким электроизоляционным составом, состоящим из минерального масла и растворенной в нём канифоли. Для крутонаклонных и вертикальных прокладок применяют кабели с бумажной изоляцией жил, но с обедненной пропиткой или пропиткой их вязкими составами. При обедненной пропитке бумажной изоляции кабеля изоляционный пропиточный состав находится только в порах и капиллярах бумаги, а излишки его удаляются. Это исключает стекание изоляционного пропиточного состава при вертикальной или крутонаклонной прокладке кабеля.

Толщина бумажной изоляции жил в многожильных кабелях лежит в пределах от 0,75 до 2,4 мм – для кабелей на напряжение до 1 кВ и от 2 до 2,75 мм – для кабелей на напряжение до 10 кВ с поясной изоляцией. Толщина изоляции жил в одножильных кабелях и в кабелях с отдельно свинцованными жилами находится в пределах от 1,2 до 2,4 мм – для кабелей на напряжение от 1 до 6 кВ и от 3,5 до 7,0 мм – для кабелей на 10 и 20 кВ. У кабелей на напряжение 35 кВ толщина слоя изоляции жилы равна 9...11 мм. Наложение изоляции на жилу производится посредством многократной обмотки жилы бумажными лентами шириной от 6 до 35 мм. В многожильных кабелях верхняя бумажная лента каждой жилы имеет отличительную окраску, что необходимо для распознавания фаз при разделке кабелей.

Изолированная жила одножильного кабеля или скрученные жилы многожильных кабелей заключают в герметическую оболочку из свинца или алюминия. Промежутки между скрученными жилами заполняют жгутами из пропитанной бумаги (междуфазное заполнение).

В кабелях на напряжение до 10 кВ включительно на скрученные друг с другом изолированные жилы накладывают еще поясную изоляцию, поверх которой располагают герметическую оболочку из свинца или алюминия. Для защиты герметических оболочек от возможных механических повреждений на последние накладывают броневой покров из стальных лент или стальных проволок. Броневой покров накладывают не непосредственно на свинцовую или алюминиевую оболочку, а на подушку, состоящую из последовательно наложенных (на герметическую оболочку) слоёв бумаги и кабельной пряжи, пропитанных битумными и другими составами. В кабелях, предназначенных для прокладок в помещениях с химически агрессивными средами (кабели марок *СБв*, *СКв*, *СПв* и др.), подушку под броню изготавливают из последовательно наложенных слоёв пропитанной бумаги и лент полихлорвинилового пластиката.

Для защиты броневого покрова от коррозии на него накладывают защитный покров из грубой кабельной пряжи, пропитанной противогнилостным битуминозным составом. На броневой покров кабелей, предназначенных для прокладки в пожароопасных помещениях и шахтах, защитный покров из пропитанной пряжи не накладывают (кабели марок *СБГ*, *СПГ* и др.). Кабели, предназначенные для прокладки в местах, где механические повреждения исключаются, не снабжаются броневыми покровами (кабели марок *СГТ*, *АСГТ* и др.).

Кабели на напряжение 20 и 35 кВ изготавливают с отдельно освинцованными жилами, т. е. на каждую из трёх изолированных жил круглого сечения накладывают свинцовую оболочку. Освинцованные жилы скручивают друг с другом, а промежутки между ними заполняют пропитанной кабельной пряжей. На три освинцованные скрученные жилы накладывают несколько слоёв пропитанной хлопчатобумажной ленты (нижняя подушка). Затем кабель покрывают броневым покрытием из стальных лент, защищенных от коррозии пропитанной кабельной пряжей (защитный покров).

Свинцовые оболочки, наложенные на каждую из трёх жил кабеля, являются электрическими экранами. Они обеспечивают более равномерное распределение силовых линий электрического поля в изоляции каждой жилы в радиальном направлении и усиливают теплоотвод. Благодаря этому повышается электрическая прочность, а, следовательно, и надёжность работы кабелей.

Сечения жил у одножильных кабелей находятся в пределах от 2,5 до 800 мм², а у многожильных — от 2,5 до 240 мм².

В таблице 4.20 приведены основные кабели с бумажной изоляцией в свинцовой оболочке на напряжение до 35 кВ включительно.

Кроме кабелей в свинцовой оболочке, выпускаются кабели в алюминиевой защитной оболочке (кабели марок *АБ*; *АБГ*; *АПП* и др.).

Таблица 4.20 – Кабели с бумажной пропитанной изоляцией в свинцовой оболочке

Марка кабеля		Особенности конструкции кабеля	Область применения
медные жилы	алюминиевые жилы		
<i>СГ</i>	<i>АСГ</i>	В свинцовой оболочке, небронированный и без защитных покровов	Для прокладки в сухих и сырых помещениях при отсутствии механических воздействий на кабель
<i>СБ</i>	<i>АСБ</i>	В свинцовой оболочке, бронированный стальными лентами с наружным защитным покровом	Для прокладки в земле и по стенам (вне зданий), при необходимости защиты кабеля от механических повреждений
<i>СБВ</i>	<i>АСБВ</i>	Бронированный стальными лентами с наружным защитным покровом, но с обедненной изоляцией жил	Для прокладки в земле и по стенам зданий в крутонаклонном и вертикальном положениях
<i>ОСБ</i>	<i>АОСБ</i>	То же, но с отдельно освинцованными жилами на напряжения 20 и 35 кВ	Для прокладки в земле и по стенам (вне зданий)
<i>ОСБВ</i>	<i>АОСБВ</i>	То же, но с обедненной изоляцией освинцованных жил на напряжения 20 и 35 кВ	То же, но для прокладки в крутонаклонном и вертикальном положениях

Так как алюминий обладает более высокими механическими характеристиками по сравнению со свинцом, то алюминиевые оболочки делают меньшей толщины. Кабели с алюминиевыми оболочками имеют меньший диаметр и вес по сравнению с кабелями в свинцовой оболочке. Для обеспечения коррозионной устойчивости алюминиевых оболочек применяют проводниковые сорта алюминия с содержанием этого металла не менее 99,7%.

Конструкции силовых кабелей для постоянного тока на напряжение до 3 кВ не отличаются от конструкций кабелей на соответствующее напряжение переменного тока.

Кабели на напряжение выше 35 кВ (110 кВ и выше) изготавливают тоже с бумажной изоляцией жил, но пропитанной маловязким, легкоподвижным маслом, которое находится внутри кабеля под повышенным давлением (4..14 атмосфер). Такие кабели называются маслонаполненными. Особенностью этих кабелей является то, что масло внутри может легко перемещаться по центральной полый жиле под давлением, создаваемым подпитывающей аппаратурой, присоединённой к оболочке кабеля. Наличие маловязкого масла, находящегося под давлением, позволяет создать бумажно-масляную изоляцию жил с повышенной электрической прочностью.

Кроме маслонаполненных кабелей, находят применение газонаполненные кабели на напряжение до 220 кВ. Внутри оболочек этих кабелей находится какой-либо инертный газ (азот, фреон и др.) под давлением от 0,7 до 20 атмосфер. Жилы газонаполненных кабелей имеют бумажную изоляцию, пропитанную уменьшенным количеством масла (обедненная изоляция). Внутреннее пространство такого кабеля заполнено газом под давлением, создаваемым специальными установками, присоединёнными к оболочке кабеля. В качестве оболочек газонаполненных кабелей высокого давления (10...15 атмосфер) применяют стальные трубы. Газ, находящийся внутри кабеля под давлением, обеспечивает высокую электрическую прочность изоляции жил кабеля.

Из-за сложности конструкций газонаполненные кабели имеют ограниченное применение.

4.7. Цветовая маркировка проводов

Цветовая маркировка проводов применяется для удобства технических работ, проведения регулярного обслуживания и профилактики электропроводки в оборудовании. Также соблюдение установленных правил маркировки проводов по цветам повышает уровень безопасности лиц, осуществляющих эти работы.

Цветная маркировка внешней оплётки токопроводящих жил регламентируется положениями технических стандартов. Они прописаны в ГОСТ №23594–79 «Монтаж электрический радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Маркировка», Правилами технической эксплуатации электрических установок (ПТЭЭП), Правилами устройства электрических установок (ПУЭ).

ПТЭЭП предписывает, что жилы электропроводки необходимо подключать к источнику электроэнергии соответственно с условным обозначением проводов. Расцветка фаз, как и нуль и провод «земля» имеют свои, индивидуальные цвета. Когда кабель содержит жилы в оплётке одного цвета, то на выходах каждого провода следует поставить буквенное обозначение. Аналогичными обозначениями маркируется и распределительная электрощитовая, к которой подключается питающий кабель:

- каждой линии кабеля должно присваиваться собственное наименование, либо порядковый номер;
- на кабелях, проложенных открытым способом, должны закрепляться номерные бирки;
- на автоматических устройствах аварийного отключения также должна наноситься маркировка подключенной к ним электропроводки.

Схема маркировки проводов по цвету

Необходимость обозначения кабеля и отдельных электрических жил прописывается в основных эксплуатационно-технических нормативах. Соблюдать правильную маркировку фаз и заземления очень важно при монтаже электропроводки, во избежание возможных ошибок при проведении последующих работ.

Обозначаются токопроводящие жилы кабеля, как определено нормами ПУЭ и ГОСТ, двумя основными способами:

– при помощи *цветовой маркировки* проводов, каждая отдельная жила – фаза, нуль, или земля, – имеет свою уникальную расцветку;

– *буквенно-цифровыми обозначениями*, используемыми для монохромной оплётки, и на план-схемах сборки электрических линий.

Окрас полимерной оболочки

Для визуального определения, к какому типу относится конкретная жила проводки – фазе, заземлению или нулю, разработана целая система цветовой идентификации. Согласно ей, электрические жилы фазы имеют самые разные расцветки (варьируются у разных производителей электропроводки) – от чёрной до белой.

Фазный провод бывает самой различной расцветки. Однако, соблюдается обязательное правило: он не может быть синего или голубого цвета, либо двуцветным. Полимерная оплётка нуля, в отличие от фазного провода, имеет только одну гамму: синий, либо голубой цвет разной насыщенности. В этом состоит главное отличие фазы и нуля в цветной маркировке электропроводки.

Заземление в электросетях чаще означает двухцветной окраской. Чаще это жёлтый фон с идущей по нему зелёной или чёрной полоской. Для совмещённых PEN-проводников концы дополнительно маркируются голубыми метками на концах. Как вариант – жёлтые или зелёные метки на общем голубом фоне.

При сборке электрощита на 380 вольт трёхфазной сети стандартно применяется такая цветовая индикация жил кабеля:

Красный или коричневый	–	фаза А.
Чёрный	–	фаза В.
Серый, белый	–	фаза С.
Голубой	–	нулевая жила.
Жёлто-зелёный	–	«земля».

Вышеперечисленные варианты цветов обязательны только для нашей страны. За рубежом могут действовать свои, отличные от наших, стандарты. Так, в ЕС для обозначения нуля могут использо-

ваться чёрный, белый, либо серый цвет. Заземление там часто обозначается однотонным зелёным или жёлтым цветом.

При монтаже электросети с постоянным током, применяются иная цветовая маркировка проводов. Поскольку здесь отсутствует нулевая жила (ток идёт в одном направлении, от «+» к «-»), то возникнуть разночтений «синий провод это фаза или ноль?» не может. В сетях с постоянным током полярность обозначается так:

Положительный полюс – жила в красной оплётке.
Отрицательный – в синей или чёрной изоляции.

Для приборов, использующих электроцепи с несколькими номиналами, стандартного цветного обозначения не имеется. Узнать, какой провод здесь плюсовой, а какой минусовой, можно лишь из сопроводительной технической документации. В постоянных цепях с двуполярной запиткой, ноль выделяется голубой расцветкой.

В автомобильной проводке красным, оранжевым или розовым цветом стандартно обозначается плюсовой провод. Масса же в бортовой сети – всегда провод в чёрной оплётке. Расцветка же остальных проводов может варьироваться в очень широком диапазоне, и зависит от конкретного автопроизводителя.

Буквенное обозначение жилы

Современный порядок буквенного обозначения электрических жил, по большей части, стандартизирован на международном уровне. Этим он выгодно отличается от цветовой маркировки, бывающей индивидуальной для каждой страны. Общепринятые буквенные обозначения для однофазной цепи таковы:

L – жила фазы.

N – ноль.

PE – заземление.

+ – плюсовой провод.

- – минусовой провод.

M – средняя точка в двуполярных цепях постоянного тока

Заземление обозначается на схемах и клеммах особым значком, состоящим из одной вертикальной полосы, и нескольких перпендикулярных ей полос различной длины. Этот символ един для всех миро-

вых производителей электрооборудования, и может дополняться различными значками, в зависимости от типа используемого заземления.

Для трёхфазных устройств буквенные символы имеют дополнительную цифровую кодировку:

I фаза – $L1$,
 II фаза – $L2$,
 III фаза – $L3$.

Иногда в постсоветском пространстве ещё встречается советское обозначение фаз, состоящей из латинских литер A , B , и C . Ещё одним отступлением от международных стандартов является совмещённая буквенная маркировка: LA , LB , LC .

В приведённых ниже таблицах даны цветовые и буквенно-цифровые обозначения фазировки, нуля и заземления в различных электрических цепях.

Таблица 4.21 – Маркировка электрической цепи переменного тока

Тип проводящей жилы	Буквенно-цифровое обозначение	Цвет изоляционной оплётки	Цветовое обозначение на чёрно-белой схеме
Фаза в однофазной цепи	L	Коричневый, чёрный, серый	BN (brown)
I фаза трёхфазной цепи	$L1$	Красный, коричневый	BN (brown)
II фаза трёхфазной цепи	$L2$	Чёрный	BK (black)
III фаза трёхфазной цепи	$L3$	Серый, белый	GY (grey)
Земля в однофазной цепи	LE	Жёлто-зелёный	YG (yellow-green)
Земля в трёхфазной цепи	$LELELE$	Жёлто-зелёный	YG (yellow-green)
Ноль	N	Синий, голубой	BU (blue)

Таблица 4.22 – Маркировка электрической цепи постоянного тока

Положительный полюс	$L+$	Коричневый	BN (<i>brown</i>)
Отрицательный полюс	$L-$	Серый	GY (<i>grey</i>)
Земля положительного полюса	$LE+$		
Земля отрицательного полюса	$LE-$		
Средний проводник	N	Синий, голубой	BU (<i>blue</i>)

4.8. Плоские (ленточные) кабели и провода

История плоского кабеля (шлейфа) началась в 1956 году, когда компания *Sicoil* изобрела новый тип кабеля для компьютеров *IBM*. В течение десятилетий он был предпочтительным вариантом в производственных компьютерах, военной и аэрокосмической технике, робототехнике. Его преимущество перед круглым кабелем объяснялось превосходной гибкостью, малыми помехами и удобством размещения внутри корпуса прибора.

Конструкция круглого кабеля имеет ряд недостатков. Несмотря на применение наполнителя для рассеивания тепла, фрикционный нагрев между проводниками остается проблемой при регулярных циклах движения кабеля. Также существует проблема изменения электрического сопротивления при движении проводников внутри оболочки.

В плоском же кабеле проводники расположены строго параллельно друг другу, их перемещение исключено самой конструкцией. Благодаря этому электрические характеристики, такие как удельное сопротивление, ёмкость, временная задержка прохождения сигнала, остаются неизменными. Да и проводники имеют одинаковую физическую и электрическую длину, поэтому изменения прохождения сигнала и дифференциальные задержки оказываются минимальными. Отсутствие наполнителя, дополнительной изоляции и противоскользких лент делает кабель лёгким и малогабаритным. Следует под-

черкнуть, что плоская конструкция кабеля дает больший объем поверхности и лучше рассеивает тепло, а значит, можно пропускать более высокие токи при меньшем диаметре проводника.

Таким образом, для приложений, где требуется низкий уровень сигнал/шум, гибкость, малый нагрев при высокой плотности размещения элементов, плоский кабель становится лучшим решением.

Благодаря своей высокой гибкости и прочности, они идеально подходят для узких и ограниченных пространств, где экономия места является обязательным условием. Плоский кабель – это оптимальный вариант для электропитания подвижных и разъемных механизмов и их частей. Широко используется в компьютерной технике, автомобильной и авиационной отраслях, мехатронике и робототехнике, обеспечивая соединения различных устройств.

Традиционно шлейф считается кабелем для внутриблочного соединения. Это вызвано тем, что кабель имеет значительные ограничения по рабочей температуре, плохое экранирование и малое расстояние передачи сигнала.

Основные характеристики плоских кабелей:

- материал жилы;
- сечение жилы;
- количество проволок в жиле;
- материал изоляции;
- шаг проводников.

Материал жилы

В большинстве плоских кабелей сечение жилы и количество проволок в ней унифицировано и составляет $7 \times 0,127$. Что касается материала жилы, в 99% случаев весь выпускаемый шлейф имеет жилы из луженой меди. Исключение составляют некоторые серии кабеля с жилой из посеребрённой меди. Выбор такого покрытия обусловлен требованием к снижению потерь на проводимость и эксплуатацией кабеля в широком диапазоне рабочих температур – от -55 до $+200^{\circ}\text{C}$.

Сечение жилы и количество проводников

Чем больше проволок на единицу сечения, тем выше гибкость кабеля. И если стандартный кабель имеет жилу с семью проводника-

ми, то кабель повышенной гибкости имеет жилу из 19 проводников. Гибкость кабеля – ключевой параметр в условиях высокой плотности внутрикорпусной сборки изделия. Как известно, кабель не рекомендуется сгибать более чем на 90°, число сгибов также ограничено. Применение гибкого кабеля позволяет избежать таких ограничений.

Материал изоляции

С одной стороны, изоляция защищает электрические проводники, с другой – придаёт кабелю такие свойства, как гибкость, термостойкость, холодостойкость, пожаробезопасность и т. д. Очевидно, что поливинилхлорид (ПВХ), стандартный материал изоляции, не обладает всеми вышеперечисленными свойствами. Кабели с изоляцией ПВХ предназначены только для использования внутри блоков при комнатной температуре и для передачи данных на небольшие расстояния, поэтому в настоящее время выпускаются шлейфы с различной изоляцией, что позволяет применять их в условиях скрытой проводки, минусовых температур, сверхплотного монтажа или для передачи сигналов на большие расстояния.

Шаг проводников

В аппаратуре самыми распространёнными типами плоского кабеля являются шлейфы с шагом 1 и 1,27 мм. Помимо этих популярных моделей, выпускаются кабели и с меньшим шагом, от 0,635 мм (минимальный шаг – 0,15 мм с ограниченным числом жил).

Кабель с безгалогенной LSZH-изоляцией

В кабельной продукции широко используется ПВХ-оболочка, которая обладает низкой горючестью. К другим критериям относятся дымообразующая способность материала, токсичность продуктов горения, их коррозионная активность. При горении ПВХ-изоляции выделяется черный дым и токсичные продукты горения (включая СО и хлористый водород). Во избежание образования токсичных газов применяются безгалогенные композиции на основе полиолефинов.

Безгалогенные материалы не содержат таких вредных веществ, как фтор, хлор, бром, поэтому кабели в HF (*halogen free*) изоляции законодательно рекомендованы для использования на объектах с большой концентрацией людей и дорогостоящей техники: в транспортной

инфраструктуре (метрополитен и пассажирские составы), в промышленном и жилищном строительстве, в местах массового скопления людей (аэропортах, школах, больницах, универмагах и т. д.), высотных зданиях, в установках аварийного электроснабжения, на предприятиях нефтегазового комплекса и т. д.

Благодаря использованию композиции из полиолефина расширяется и температурный диапазон применения кабеля, составляющий $-40...+105^{\circ}\text{C}$.

Изгибы кабеля

Современное автоматизированное оборудование в мехатронике и робототехнике предназначено для работы на высоких скоростях, имеет интегрированные системы машинного зрения и множество датчиков. Новые рабочие условия могут повредить кабельную разводку, которая использовалась в оборудовании старого поколения, то есть круглый кабель.

В современном оборудовании сгибы кабеля имеют разную форму (рис. 4.1):

Каждый раз, когда кабель сгибается, медные проводники и экран кабеля испытывают повышенную нагрузку. Медь, как материал, имеет плохую стойкость к повторяющимся нагрузкам. У меди также плохие характеристики по напряжению сдвига (касательному напряжению), она деформируется при нагрузках ниже своего пластического предела твердости. Поэтому кабели с медными проводниками имеют малый радиус сгиба и малый диаметр проводника. Ленточные кабели выпускаются с тремя степенями свободы сгиба: стандартный с низкой гибкостью, со средней и высокой гибкостью. Гибкость кабеля характеризуется его способностью выдерживать последовательность сгибов без ломки проводника. Она определяется радиусом изгиба и конструкцией проводника (рис. 2).

Если у стандартного кабеля 7-жильный проводник ($7 \times 0,127$), то сверхгибкий кабель будет уже иметь 19-жильный проводник ($19 \times 0,079$). Для того чтобы проводники не ломались при сгибе, применяется посеребрение меди.

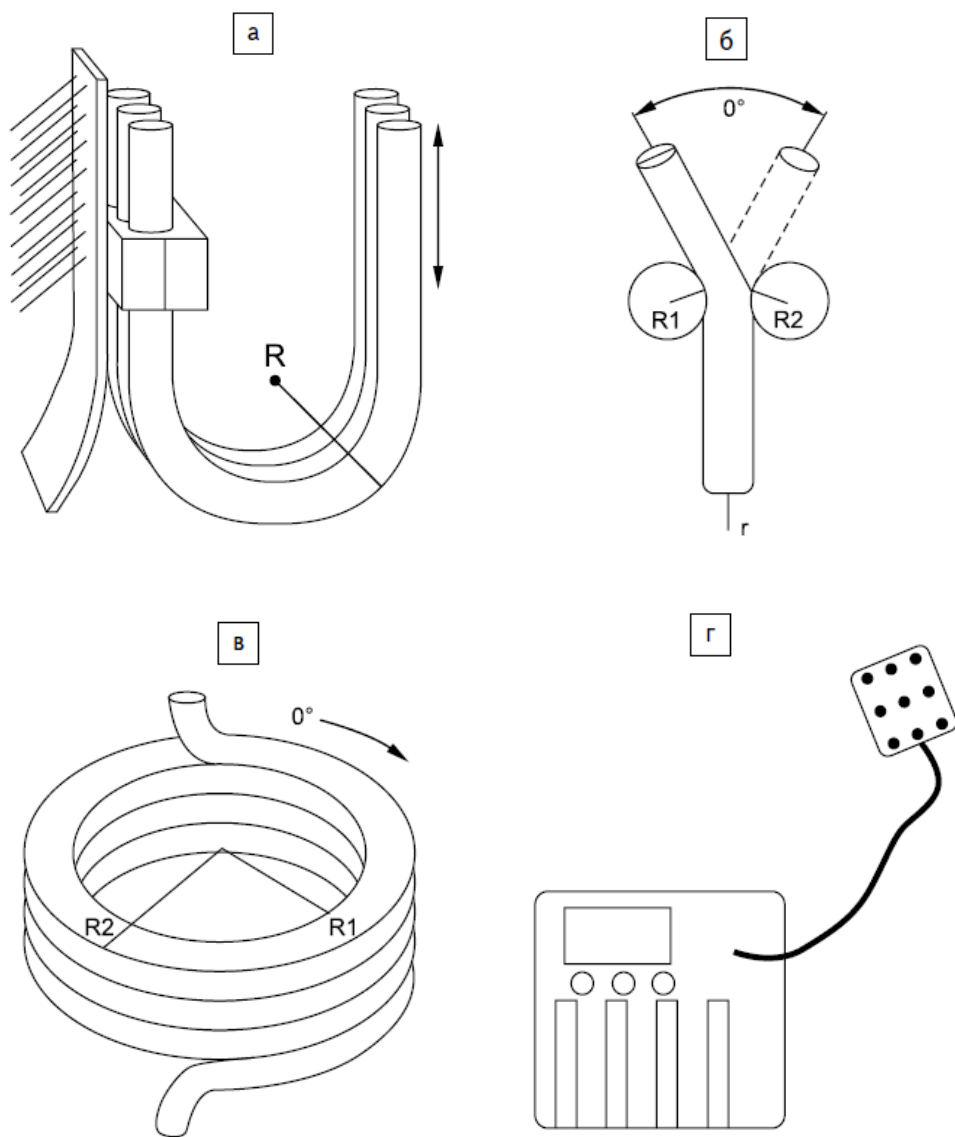


Рис. 4.1. Формы сгиба кабеля:

- а) простой изгиб, б) возвратные угловые изгибы,
 в) торсионные скручивающиеся изгибы, г) самопроизвольные изгибы.

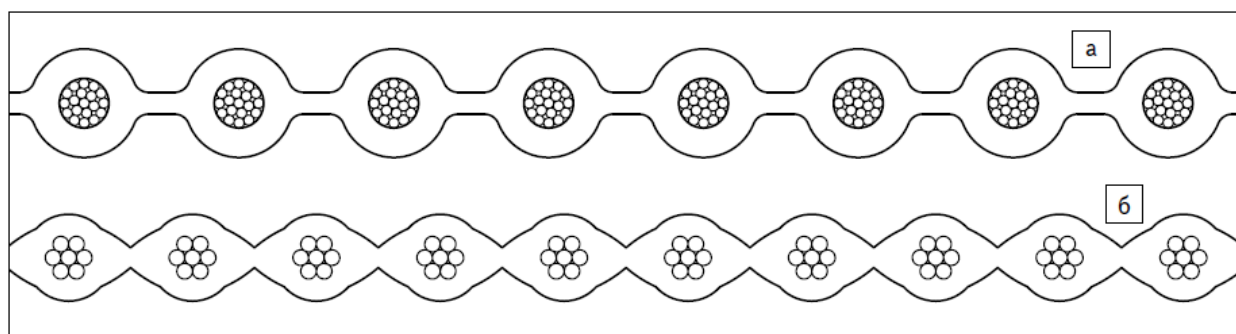


Рис. 4.2. Плоский кабель повышенной (а) и стандартной (б) гибкости

На графике (рис. 4.3) показано сравнение количества сгибов разных моделей плоского кабеля: сверхгибкого (3319 и HF319 компании 3М в безгалогенной изоляции) и средней гибкости (3539). Сверхгибкий кабель допускает до 18 миллионов сгибов радиусом 12,7 мм и до 113 миллионов сгибов радиусом 19 мм. Количество циклов сгиба такого кабеля в 100 раз превышает возможности круглого кабеля, при этом его вес в 4 раза меньше. Для сравнения: низкотемпературный кабель МС26-13 допускает всего 130 сгибов на угол 90°.

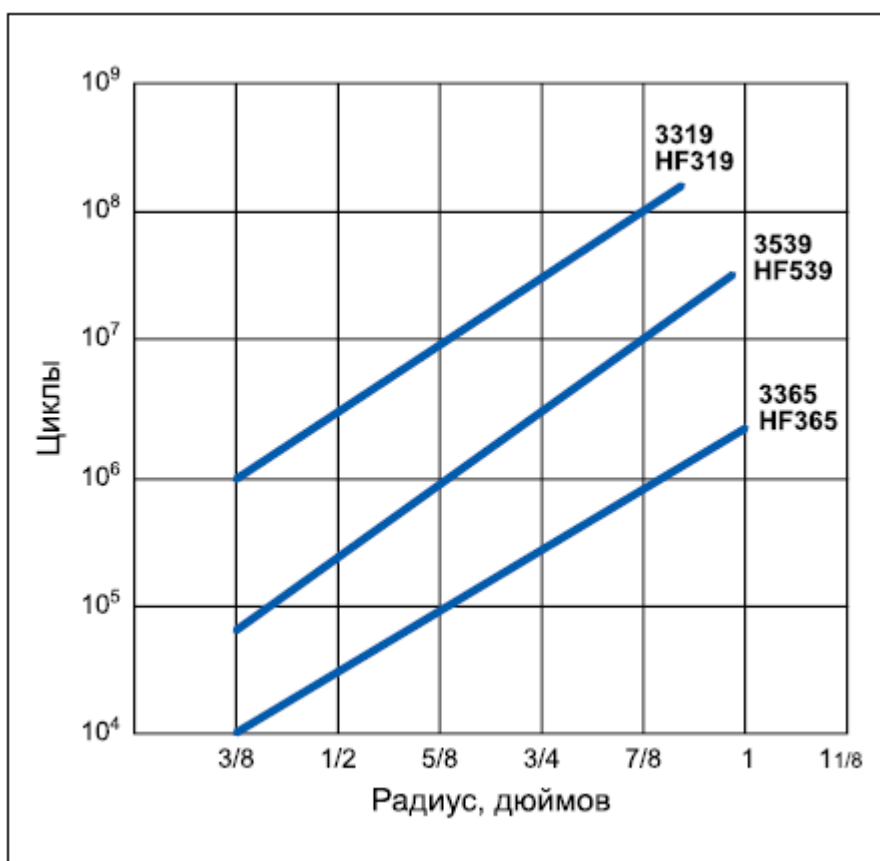


Рис. 4.3. Сравнение количества сгибов сверхгибкого и стандартного плоского кабеля

Возможность частого сгиба кабеля с сотней миллионов циклов даёт возможность применения такого плоского кабеля в станках с ЧПУ, робототехнике, манипуляторах захвата и перемещения и другом высокоскоростном автоматизированном оборудовании. Использование плоского гибкого кабеля уменьшает вес подвижных кабельных сборок, позволяет увеличить скорость перемещения, уменьшить вибрацию и колебания, сократить износ.

Ленточный кабель со скрученными жилами

Идея перекрутить два проводника принадлежит изобретателю телефона А. Беллу и датируется 1881 годом. Взаимная обвивка проводников кабеля обеспечивает защиту от собственных и внешних наводок.

Шумы генерируются в сигнальных линиях магнитным полем. Ток помех в линиях данных является результатом влияния магнитного поля. В плоско расположенных проводниках все токи помех текут в одном направлении, как в обычной обмотке трансформатора. Если проводники скручены друг вокруг друга, на некоторых участках сигнальных линий направление тока помех оказывается противоположным, чем в других частях кабеля (рис. 4.4).

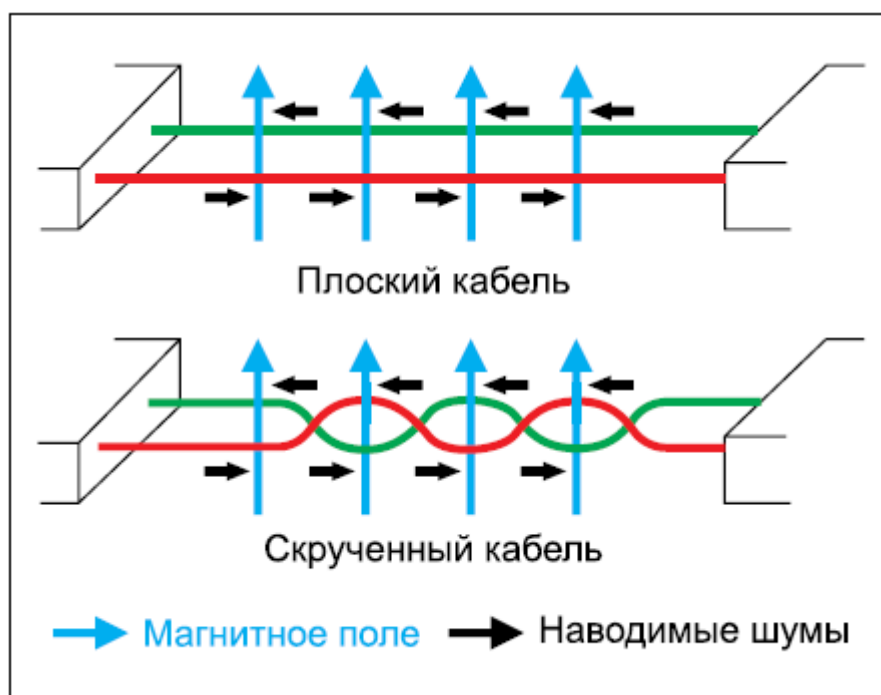


Рис. 4.4. Сравнение наводимых помех в параллельных и скрученных проводниках

Таким образом, обратные токи компенсируют друг друга и оказываются сбалансированы. Благодаря этому суммарные помехи становятся значительно ниже, чем в традиционном плоском кабеле.

Кабели со скрученными проводниками широко распространены в системах дифференциальной передачи данных. При передаче дан-

ных в дифференциальном режиме один электрический сигнал передается в виде двух противофазных сигналов, каждый идет по своему проводнику. Один представляет инвертированный сигнал другого. Приёмник определяет разность потенциалов между инвертированным и неинвертированным сигналами.

Основная сфера применения плоского кабеля со скрученными жилами – подключение силовых модулей для управления электроприводом. Здесь кабель со скрученными жилами обеспечивает защиту от перекрестных помех.

Низкотемпературный кабель

Для производства изоляции кабелей существует множество различных материалов. Однако среди них можно выделить три основные группы: ПВХ (поливинилхлорид), RUP (полиуретан) и TPE (термопластичный эластомер). Каждый материал имеет свои преимущества, такие как влагозащита, износостойкость и гибкость.

ПВХ-изоляция широко известна и популярна. Этот материал отличается хорошей стойкостью к влаге и достаточно низкой стоимостью.

Полиуретановая изоляция применяется, как правило, европейскими и азиатскими производителями. Это безгалогенный материал, стойкий к истиранию, но с ограниченным температурным диапазоном $-40...+80^{\circ}\text{C}$.

TPE – термопластовый эластомер или резина (TPR) – это комбинация пластика и резины. TPE имеет очень прочный состав и хорошо выдерживает температурные колебания. Это позволяет применять кабель в TPE-изоляции при самых неблагоприятных внешних условиях. Кабели в TPE-изоляции имеют втрое лучшую гибкость при низких температурах по сравнению с ПВХ.

Сравнение свойств изоляторов приведено в таблице 4.

Основные сферы применения таких кабельных сборок – контрольные кабели, автомобильная промышленность, робототехника, медицинское оборудование.

Таблица 4.23 – Сравнение свойств изоляторов плоских кабелей

Параметр	ПВХ	PUR	TPE
<i>Окисление</i>	Отлично	Отлично	Превосходно
<i>Нагрев</i>	Хорошо/превосходно	Отлично	Превосходно
<i>Масло</i>	Удовлетворительно	Превосходно	Превосходно
<i>Гибкость при низких температурах</i>	Плохо/хорошо	Отлично	Превосходно
<i>Погода, солнце</i>	Хорошо/отлично	Отлично	Превосходно
<i>Озон</i>	Отлично	Отлично	Отлично
<i>Трение</i>	Удовлетворительно/хорошо	Отлично	Отлично
<i>Электрические свойства</i>	Удовлетворительно/хорошо	Отлично	Отлично
<i>Воспламеняемость</i>	Отлично	Отлично	Превосходно
<i>Ядерная радиация</i>	Хорошо	Отлично	Плохо
<i>Вода</i>	Хорошо/отлично	Хорошо/отлично	Отлично
<i>Кислоты</i>	Хорошо/отлично	Отлично	Отлично
<i>Алкалоиды</i>	Хорошо/отлично	Отлично	Отлично
<i>Топливо</i>	Плохо	Отлично	Отлично
<i>Бензол</i>	Плохо/удовлетворительно	Отлично	Отлично
<i>Обезжиривающие растворители</i>	Плохо/удовлетворительно	Отлично	Отлично
<i>Спирт</i>	Хорошо/отлично	Отлично	Отлично
<i>Сварочный шлак</i>	Удовлетворительно	Отлично	Отлично

Монтажные плоские провода

Провода *ЛПП* и *ЛППЛ* предназначены для работы при переменном напряжении до 250В, 100В – частотой 2 кГц и 3В – до 10 МГц или 400В постоянного тока и температуре от -60 до +70°С. Токопроводящие жилы плещат из круглой медной луженой проволоки (*ЛППЛ*) и медной (*ЛПП*), укладывают параллельно в одной плоскости и изолируют ПЭТФ пленкой. Сопротивление изоляции между соседними жилами проводов не менее 10^8 Ом·м. Провода испытывают переменным напряжением 0,5кВ в течение 1 мин или 800В постоянного тока. Провода *ЛПП* и *ЛППЛ*, свитые в форме бифилярной спирали, устойчивы к воздействию 4500 циклов растяжения при перемещении подвижного конца спирали на 60 % по отношению к исходной длине провода. Параметры проводов представлены в таблицах 4.24, 4.25.

Таблица 4.24 – Конструктивные данные, масса и электрическое сопротивление на длине 1 км проводов ЛПП

$n \times S$, мм ²	d , мм	Габаритные размеры		Расстояние между крайней жилой и краем провода	g , кг/км	R , Ом/км, не более
		Толщина	Ширина			
3×0,08	0,32	0,30	27±0,5	9,4±1,1	3,3	223,1
6×0,08			38,3±0,5			
12×0,08			49,5±0,5			
24×0,08			94,5±0,5			
3×0,12	0,40	0,33	27,1±0,5	9,4±1,1	4,4	129,5
6×0,12			38,4±0,5			
12×0,12			49,6±0,5			
24×0,12			94,6±0,5			
3×0,20	0,50	0,43	27,1±0,5	9,4±1,1	6,5	84,6
6×0,20			38,3±0,5			

Таблица 4.25 – Конструктивные данные проводов ЛППЛ

$n \times S$, мм ²	d , мм	Габаритные размеры		Расстояние между край- ней жилой и краем провода	g , кг/км	R , Ом/км, не более
		Толщина	Ширина			
3×0,03	0,20	0,30	6,3±0,5	1,7±0,7	1,1	611,3
5×0,03			8,7±0,5		1,7	
9×0,03			13,7±0,5		3,0	
10×0,03			14,9±0,5		3,3	
15×0,03			21,2±0,5		4,9	
18×0,03			24,0±0,5		6,0	
20×0,03			27,5±0,5		6,5	
24×0,03			32,5±0,5		7,8	
30×0,03			40,0±0,5		9,7	
4×0,05	0,26	0,30	7,4±0,5	1,55±0,55	2,1	359,7
5×0,05			8,6±0,5		2,6	
7×0,05			11,1±0,5		3,6	
15×0,05			21,1±0,5		7,6	
18×0,05			24,9±0,5		9,1	
20×0,05			27,4±0,5		10,1	
24×0,05			32,4±0,5		12,1	
30×0,05			39,9±0,5		15,1	
3×0,08			0,32		0,30	
4×0,08	14,8±0,5	3,5				
5×0,08	17,3±0,5	4,3				
10×0,08	29,8±0,5	8,3				
15×0,08	42,3±0,5	12,4				
20×0,08	54,8±0,5	16,4				
24×0,08	64,8±0,5	19,6				
30×0,08	79,8±0,5	24,7				
4×0,12	0,40	0,33		15,8±0,5		3,75±1,3
5×0,12			18,3±0,5	6,1		
7×0,12			23,3±0,5	8,4		
9×0,12			28,3±0,5	10,7		
15×0,12			43,3±0,5	17,8		
20×0,12			55,8±0,5	23,6		
24×0,12			65,8±0,5	28,3		
30×0,12			80,8±0,5	35,3		

Провода ПВП, ПВПмс и ПВП-1 (таблица 4.26) предназначены для работы: *ПВП* – до 100В частотой до 1 кГц, 10В частотой до 50 МГц, *ПВПмс* и *ПВП-1* – до 100В переменного тока частотой 1 кГц, до 10В частотой 10 МГц, до 2В частотой до 30 МГц или 150В постоянного тока, при температуре от -60 до +70°С и относительной влажности 98% при 35°С. Токопроводящие жилы – круглую медную (*ПВП, ПВП-1*) или посеребренную проволоку (*ПВПмс*) укладывают параллельно в одной плоскости и продольно накладывают ПЭ изоляцию толщиной, обеспечивающей заданное волновое сопротивление каждой жилы. Сопротивление между рабочей и двумя рядом лежащими заземляющими жилами, а также между каждой жилой и вторым искусственным электродом (водой) при 25±10°С не менее 10¹⁰ Ом·м. Провода выдерживают трехкратный изгиб на угол 180° по радиусу 1,5 мм и по широкой стороне: на угол 90° по радиусу 7 мм не менее 50 изгибов, по радиусу 75 мм не менее 5000 изгибов.

Провод ПЛПБбГ предназначен для работы при переменном напряжении до 127В или 150В постоянного тока и температуре от -60 до +70°С. Токопроводящие жилы – круглая проволока из бериллиевой бронзы – уложены параллельно в одной плоскости с ПЭ изоляцией. Сопротивление изоляции между соседними жилами провода не менее 10⁶ Ом·м. Провода испытывают переменным напряжением 500В в течение 1 мин. Провод *ПЛПБбГ*, свитый в спираль диаметром 14 мм, выдерживает 2,3·10⁶ возвратно-поступательных движений перемещающего конца спирали при относительном её удлинении на 100%.

Провод ПЛВВ (таблица 4.27) предназначен для работы при переменном напряжении 250В частотой до 5,5 МГц или 380В постоянного напряжения при температуре от -40 до +70°С. Токопроводящую жилу сечением 0,20 мм² скручивают из семи луженых медных проволок диаметром 0,20 мм и изолируют ПВХ толщиной 0,35±0,15 мм различного цвета и располагают: в четырёхжильном проводе – белая, красная, зелёная и синяя, а в трёхжильном – красная, зелёная и синяя. На изолированные жилы, расположенные в одной плоскости, с шагом укладки 8,5±0,5 мм накладывают ПВХ оболочку белого или цвета слоновой кости. Провода изготавливают длиной не менее 20 м. Электрическое сопротивление жилы на длине 1 км не более 89 Ом, сопротивление изоляции при 20°С между жилой и экраном (водой) не менее 5·10⁷ Ом·м. Провода испытывают переменным напряжением 1 кВ в

течение 1 мин. Электрическая ёмкость между двумя соседними жилами не более 22 пФ/м. Провода выдерживают не менее 100 перегибов на угол $\pm 90^\circ$ на цилиндр радиусом 6 мм с массой груза 0,5 кг.

Таблица 4.26 – Параметры проводов *ПВП*, *ПВПмс*, *ПВП-1*

Марка	$n \times d$, мм	Размеры провода, мм		Расстояние между центрами жил в тройке, мм, $\pm 0,15$	g , кг/км	R , Ом/км, не более	z , Ом
		Толщина $\pm 0,1$	Ширина				
<i>ПВП</i>	24 × 0,20	0,75	10,5 ± 0,3	0,32	13,2	588	50 ± 5
	48 × 0,20		19,0 ± 0,3		25,1		
	60 × 0,20		23,2 ± 0,7		31,0		
	24 × 0,20	0,75	12,7 ± 0,5	0,47	14,8	588	75 ± 7
	48 × 0,20		23,4 ± 0,7		28,2		
	60 × 0,20		28,8 ± 1,0		32,0		
48 × 0,18	0,75	28,5 ± 1,0	0,63	29,5	726	100 ± ± 10	
60 × 0,18		35,1 ± 1,1		36,4			
<i>ПВПмс</i>	3 × 0,20	0,75	1,6 ± 0,3	0,32	1,9	588	50 ± 5
<i>ПВП-1</i>	60 × 0,20		28,5 ± 0,7		34,3		

Таблица 4.27 – Конструктивные данные и масса проводов *ПЛПБбГ*, *ПЛВВ* (расстояние между центрами жил 0,4 мм)

Марка	$n \times S$, мм ²	d , мм	Размеры провода, мм		g , кг/км
			Толщина	Ширина	
<i>ПЛПБбГ</i>	8 × 0,02	0,15	0,8 ± 0,1	4 ± 0,2	4,5
	9 × 0,02			4,5 ± 0,2	5,0
<i>ПЛВВ</i>	3 × 0,20	7 × 0,20	1,65 ± 0,35	19,5 ± 0,5	32,8
	4 × 0,20			27,5 ± 0,8	41,74

Провод ППР (таблица 4.28) предназначен для работы при напряжении до 300В переменного тока частотой 4 МГц при температуре окружающей среды от -40 до +70°C.

Таблица 4.28 – Конструктивные данные, масса и электрическое сопротивление на длине 1 км проводов ППР (расстояние между центрами жил 1,7 мм)

$n \times S, \text{ мм}^2$	Конструкция жилы, мм	Размеры провода, мм		$g, \text{ кг/км}$	$R, \text{ Ом/км, не более}$
		Толщина	Ширина		
1×1,0	0,1×10	1,1±0,2	11±0,2	18,2	18
1×1,5	0,1×16	1,1±0,2	17±0,2	28,5	12
1×6,0	0,3×0,20	1,3±0,2	21±0,2	73,2	3
10×0,12	0,12×1,0	1,12±0,27	18±0,5	24,7	150

Кабели КППР, КППР(М) и КППРЭ (таблицы 4.29 и 4.30) предназначены для работы при напряжении до 250В частотой до 2 кГц или до 500В постоянного тока при температуре от -60 до +70°С.

Таблица 4.29 – Параметры кабелей КППР, КПВР

$n \times S, \text{ мм}^2$	$n \times d, \text{ мм}$	Размеры кабеля, мм		Расстояние между центрами жил, мм	$g, \text{ кг/км}$		$R, \text{ Ом/км не более}$
		Толщина	Ширина		КППР	КПВР	
4×0,12	7×0,15	1,15±0,2	6,5±0,3	1,3	11,2	-	155,1
4×0,20	7×0,20	1,6±0,2	8,9±0,3	2,1	19,5	23,3	87,2
4×0,35	7×0,26	1,78±0,3	9,6±0,3	2,28	29,7	35,0	51,6
4×0,50	7×0,30	1,9±0,3	10,1±0,3	2,4	36,2	42,11	38,8
12×0,12	7×0,15	1,6±0,2	25,7±0,8	2,1	58,3	-	155,1
12×0,20	7×0,20	1,6±0,2	25,7±0,8	2,1	58,3	69,6	87,2
12×0,35	7×0,26	1,78±0,3	27,9±0,8	2,28	68,5	104,1	51,6
12×0,5	7×0,30	1,9±0,3	29,3±0,8	2,4	108,1	125,6	38,8
15×0,20	7×0,20	1,6±0,2	26,4±0,8	1,7	55	-	87,2
18×0,20	7×0,20	1,4±0,2	59,2±1,5	3,3	113,8	-	87,2
20×0,20	7×0,20	1,15±0,2	65,8±1,5	1,3	52,7	-	87,2
20×0,35	7×0,26	1,78±0,3	46,1±1,5	2,28	147,2	173,1	51,6
20×0,50	7×0,30	1,9±0,3	48,5±1,5	2,4	180,0	209,0	38,8
22×0,12	7×0,15	1,0±0,2	27,4±1,5	1,2	55,7	-	155,1

Токопроводящие жилы кабелей *КППР*, *КППР(М)* и *КППРЭ* состоят из медных луженых проволок, а проводов *ППР* из медной луженой ленты, наложенной продольно в одной плоскости с ПЭ изоляцией. Жилы кабеля *КППРЭ* с ПЭ изоляцией оплетают медной луженой проволокой и накладывают ПЭ оболочку. Сопротивление изоляции между жилами *КППРЭ*, *ППР* и *КППР* сечением 0,35...0,5 мм² не менее 100·10⁶ Ом·м, а кабеля *КППР* и *КППР(М)* сечением 0,12 мм² не менее 10·10⁶ Ом·м. Изолированные жилы экранированных кабелей выдерживают переменное напряжение 3 кВ в течение 0,06 с. Готовые кабели *КППР*, *КППР(М)* и провод *ППР* испытывают переменным напряжением 1,5 кВ в течение 1 мин. Провод *ППР* 1×1,0; 1×1,5 и 10×0,12 мм² выдерживает 10000 односторонних изгибов на угол 180° на цилиндр диаметром 30 мм, а кабели *КППР* и *КППР(М)* – не менее 300 изгибов на угол ±90° на цилиндр диаметром 10 мм.

Таблица 4.30 – Конструктивные данные, масса и электрическое сопротивление кабелей *КППР(М)*, *КППРО*

$n \times S$, мм ²	$n \times d$, мм	Размеры кабеля, мм		Рас- стоя- ние между цен- трами жил, мм	g, кг/км		R, Ом/км , не более
		Толщина	Ширина		<i>КППР(М)</i>	<i>КППРО</i>	
4×0,20	7×0,20	1,0±0,2	27,4±1,5	1,2	-	19,5	87,2
18×0,20	7×0,20	1,4±0,2	59,2±1,5	3,3	113,8	-	87,2
20×0,20	7×0,20	1,4±0,2	65,8±1,5	3,3	126,6	-	87,2
20×0,12	7×0,15	1,15±0,17	27,2±1,0	1,3	-	52,7	155,1
22×0,12	7×0,15	1,0±0,2	27,3±1,5	1,2±0,1	-	55,7	155,1

Кабель *КППРЭО* (таблица 4.31) предназначен для работы при переменном напряжении до 250В частотой 2 кГц или постоянном напряжении до 500В, а *КППРО* – при напряжении до 100В частотой 2 кГц и 30В частотой до 10 МГц, температуре от -60 до +100°С и относительной влажности 98 % при 35°С. Токопроводящие жилы скручивают из медных луженых проволок. На параллельно уложенные жилы в одной плоскости накладывают ПЭ изоляцию и подвергают

облучению. Жилы *КППРЭО* оплетают медной луженой проволокой и накладывают ПЭ оболочку, и её облучают. Кабели изготавливают длиной не менее 7 м. Сопротивление изоляции кабелей *КППРЭО* между двумя соседними жилами и между жилой и экраном при 20°C не менее $100 \cdot 10^6$ Ом·м; *КППРО* – $10 \cdot 10^6$ Ом·м. Кабели испытывают переменным напряжением 1,5 кВ в течение 1 мин. Жилы кабеля *КППРЭО* испытывают переменным напряжением 3 кВ. Кабели *КППРО* выдерживают не менее 300 знакопеременных изгибов на угол $\pm 90^\circ$ на цилиндр диаметром 10 мм, а *КППРЭО* – 250 изгибов на цилиндр диаметром 20 мм.

Кабели *КПВР* и *КПВРЭ* (таблица 4.31) предназначены для работы при переменном напряжении до 250В частотой 2 кГц или постоянном напряжении до 500В при температуре от -50 до +70°C. Токопроводящие жилы кабелей скручивают из медной луженой проволоки, укладывают параллельно в одной плоскости и на них накладывают ПВХ изоляцию. Изолированные жилы кабеля *КПВРЭ* оплетают медной луженой проволокой и на параллельно уложенные жилы накладывают ПВХ оболочку. Сопротивление изоляции при 20°C не менее $10 \cdot 10^6$ Ом·м. Кабели *КПВР* выдерживают не менее 300 знакопеременных изгибов на угол $\pm 90^\circ$ на цилиндр 10 мм, а *КПВРЭ* – не менее 250 изгибов на цилиндр диаметром 20 мм.

Таблица 4.31 – Конструктивные данные, масса и электрическое сопротивление кабелей *КППРЭ*, *КППРЭО*, *КПВРЭ*

$n \times S,$ мм ²	$n \times d,$ мм	Размеры кабеля, мм		Рас- стоя- ние между цен- трами жил, мм	g, кг/км		R, Ом/км , не более
		Толщина	Ширина		<i>КППРЭ</i> , <i>КППРЭО</i>	<i>КПВРЭ</i>	
4×0,20	7×0,20	3,1±0,4	14,2±1,0	3,7	57,4	72,5	87,2
4×0,35	7×0,26	3,3±0,4	15,3±1,0	4,0	69,9	87,1	51,6
4×0,50	7×0,30	3,4±0,4	15,5±1,0	4,3	76,9	91,3	38,8
8×0,20	7×0,20	3,1±0,4	29,0±1,0	3,7	114,8	146,6	87,2
8×0,35	7×0,26	3,3±0,4	31,3±1,0	4,0	140,3	176,7	51,6

Провода унифицированной серии *ЛСВ-2*, *ЛСВ-4*, *ЛСП-2* и *ЛСП-4* предназначены для внутриприборного и межприборного монтажа электрических устройств при температуре эксплуатации от -60 до $+70^{\circ}\text{C}$ с изоляцией – из ПЭ и при температуре от -40 до $+60^{\circ}\text{C}$ с изоляцией из ПВХ пластиката, при постоянном напряжении до 500В и переменном напряжении до 250В частотой 50 Гц и 115В частотой 1000 Гц . Токопроводящие жилы проводов *ЛСВ-2* и *ЛСП-2* изготавливают из круглых медных луженых проволок, а проводов *ЛСВ-4* и *ЛСП-4* – из медных никелированных проволок. На параллельно уложенные в одной плоскости жилы накладывают ПЭ изоляцию в проводах *ЛПС-2* и *ЛПС-4* и ПВХ изоляцию в проводах *ЛСВ-2* и *ЛСВ-4* (таблица 4.32).

Сопротивление изоляции проводов *ЛСП-2* и *ЛСП-4* при 20°C не менее $5 \cdot 10^6\text{ Ом}\cdot\text{м}$ для *ЛСП-2* и *ЛСП-4*, а для *ЛСВ-2* и *ЛСВ-4* – $10^5\text{ Ом}\cdot\text{м}$. Провода испытывают переменным напряжением 1500 В в течение 1 мин , выдерживают не менее 300 знакопеременных изгибов на угол $\pm 90^{\circ}$ на цилиндр 10 мм и 10 односторонних монтажных перегибов на угол $\pm 180^{\circ}$ радиусом не менее двух толщин провода.

Таблица 4.32 – Конструктивные данные, масса и электрическое сопротивление проводов *ЛСВ-2*, *ЛСВ-4*, *ЛСП-2* и *ЛСП-4*

$n \times S$, мм ²	d , мм	Шаг укладки жил, мм	Габаритные размеры, мм		g , кг/км		R , Ом/км, не более
			Толщина, $\pm 0,2$	Ширина, $\pm 0,5$	ПВХ	ПЭ	
16×0,12	0,45	1,25	1,0	19,7	26,7	19,81	110,3
20×0,12				24,7	33,8	25,08	
24×0,12				29,7	40,5	30,05	
30×0,12				37,2	51,0	37,84	
16×0,20	0,6	1,25	1,3	19,5	31,9	23,67	91,7
20×0,20				24,75	40,0	29,63	
24×0,20				29,75	48,3	35,84	
30×0,20				37,35	61,0	45,26	

Провода *ЛПВ* и *ЛППВ* предназначены для работы в условиях подвижного монтажа при напряжении 100В частотой 20 кГц при температуре от -40 до $+70^{\circ}\text{C}$. На токопроводящую медную жилу провода

ЛПВ накладывают изоляцию из ПВХ толщиной 0,15...0,3 мм и провода *ЛППВ* – из ПЭ толщиной 0,05...0,17 мм. На изолированные жилы провода *ЛПВ*, уложенные параллельно в одной плоскости, накладывают слой из ПВХ толщиной 0,15...0,5 мм, а провода *ЛППВ* – 0,1...0,25 мм.

Конструктивные данные проводов приведены в таблице 4.33. Между парами жил оболочка имеет перемычку толщиной, позволяющей производить разделку пар проводов в оболочке без нарушения целостности оболочки в месте разрыва. Сопротивление изоляции 1 м провода между каждой жилой и водой не менее: при 20°C – 10^8 Ом, при относительной влажности 98 % при 35°C – 10^7 Ом. провода испытывают переменным напряжением 500В частотой 50 Гц в течение 1 мин. Провода выдерживают не менее 50 циклов изгибов на угол 90°.

Таблица 4.33 – Конструктивные данные, масса, электрическое сопротивление жил проводов ЛПВ и ЛППВ

Марка	$n \times S$, мм ²	Шаг укладки жил, мм		Максимальные габаритные размеры, мм		g, кг/км	R, Ом/км, не более
		рядом расположенных	расположенных парами	Толщина	Ширина		
ЛПВ	4×0,08	1,0	1,6	2,4	6,6	19,02	247,5
ЛППВ	4×0,08			1,3	4,1	7,26	

Провода *ЛЛПСВ-100*, *ЛЛПСВ-120* и *ЛЛПСВ-150* предназначены для работы при переменном напряжении до 50В частотой до 100 МГц или 75 В постоянного напряжения при температуре от -50 до +50°C. Токопроводящая однопроволочная жила из посеребрённой медной проволоки, для которой нормируется волновое сопротивление (100, 120 и 150 Ом), образована одним четным проводником (считая от любого крайнего) и двумя нечетными проводниками (таблица 4.34). Поверх проводников, расположенных в один ряд с шагом укладки указанным в таблице, накладывают изоляцию из двухслойной пленки ПЭТФ-ПЭ. Сопротивление изоляции провода в нормальных условиях 100 МОм·м, при влажности 98 % и 35°C – 1,0 МОм·м.

Волновое сопротивление *ЛЛПСВ-100* на частоте 100 МГц 100 ± 10 Ом, *ЛЛПСВ-120* – 120 ± 12 Ом, *ЛЛПСВ-150* – 150 ± 15 Ом. Коэффициент затухания на частоте 100 МГц не более 0,6 дБ/м. Провода испытывают напряжением 200В частотой 50 Гц в течение 1 мин.

Таблица 4.34 – Конструктивные данные, масса проводов *ЛЛПСВ-100*, *ЛЛПСВ6-150*, *ЛЛПСВ-120* и *ЛЛПСВ-150*

Марка	$n \times d$, мм		Шаг укладки, мм	Наружные размеры не более, мм		g, кг/км
	прямых	обратных		Ширина	Толщина	
ЛЛПСВ-100	20×0,20	22×0,26	0,625±0,05	20	0,45	25,0
ЛЛПСВ-120	20×0,18	22×0,18	0,625±0,05	29,8	0,40	8,0
ЛЛПСВ-150	20×0,26	22×0,26	1,25±0,1	55,5	0,45	36,0
ЛЛПСВ6-150	10×0,12	11×0,12	0,625±0,5	16,62	0,25	4,84
ЛЛПСВ6-150	20×0,12	22×0,12	0,625±0,5	29,75	0,25	9,27

Провод ЛЛПСА изготавливают 16-жильным, предназначенным для работы при переменном напряжении 50В частотой 5 кГц и постоянном напряжении 75 В при температуре от -50 до +70°С. Токопроводящая жила однопроволочная из алюминиевой проволоки диаметром 0,30 мм. Поверх токопроводящих жил, уложенных в один ряд, с шагом $1,25\pm 0,1$ мм наложена двухслойная сварная изоляция из ПЭТФ+ПЭ пленки. Толщина проводов не более 0,51 мм, ширина не более 23 мм, расчётная масса 11,5 кг/км. Электрическое сопротивление на длине 1 км не более 470 Ом. Сопротивление изоляции провода в нормальных условиях не менее $1 \cdot 10^2$ МОм·м, при относительной влажности 98 % и температуре 35°С – не менее 1,0 МОм·м. Провод испытывают напряжением 300В частотой 50 Гц в течение 1 мин. Линейная усадка изоляции от кратковременного нагрева до 300 ± 10 °С не более 2 мм.

Провод ПЛВВ предназначен для работы при напряжении 380В постоянного или 250В переменного напряжения частотой от 0 до 5,5 МГц и температуре от -40 до +60°С. Токопроводящая жила проводов изготовлена из семи медных луженых проволок диаметром не бо-

лее 0,21 мм, с числом жил 3, 4. Токопроводящая жила изолирована ПВХ пластикатом толщиной $0,35 \pm 0,15$ мм, имеет диаметр $1,3 \pm 0,15$ мм. На изолированные жилы, уложенные параллельно в одной плоскости с шагом $8,5 \pm 0,5$ мм, наложена ПВХ оболочка толщиной $0,35 \pm 0,2$ мм. Толщина соединительной перемычки между изолированными жилами 0,3...1,0 мм. Толщина провода $1,65 \pm 0,35$ мм, ширина 3-жильного провода $19,5 \pm 0,35$ мм, а 4-жильного – $27,5 \pm 0,8$ мм. Масса 3-жильного провода 32,8 кг/км, 4-жильного – 41,74 кг/км. электрическое сопротивление изоляции провода между каждой жилой и водой при 20°C не менее $5 \cdot 10^7$ Ом·м, а при относительной влажности 98 % при 35°C – $5 \cdot 10^6$ Ом·м. электрическая ёмкость между соседними жилами не более 22 пФ/м. Провода выдерживают не менее 100 перегибов на угол 90°.

Провод ПЛМ предназначен для фиксированного монтажа схемных плат микроконтроллеров при напряжении до 50В постоянного или до 30В переменного тока частотой 50 Гц, при температуре от -60 до +70°C. Провод, состоящий из 13, 19 или 21 токопроводящей жилы из медной луженой проволоки диаметром 0,42 мм, которые уложены в одной плоскости с расстоянием между центрами $2,5 \pm 0,1$ мм, изолирован двухслойной ПЭТФ+ПЭ или ПЭТФ ламинированной пленками. Ширина боковой кромки не менее 1 мм. Толщина проводов $0,55 \pm 0,1$ мм. Ширина 13-жильного провода $36 \pm 0,5$ мм, масса 19,8 кг/км. Ширина 19-жильного составляет $50 \pm 0,5$ мм, 21-жильного – $55 \pm 0,5$ мм; масса проводов 31,3 кг/км. Сопротивление жил на длине 1 км не более 136 Ом, электрическое сопротивление изоляции провода между соседними жилами при нормальных условиях не менее 10^8 Ом·м. Провода испытывают переменным напряжением 100В частотой 50 Гц между жилами в течение 1 мин. Провод выдерживает не менее 10 изгибов по широкой стороне на угол 90° при радиусе изгиба 1,5 мм.

Провода ленточные термоэлектродные ПЛТТхк, ПЛТТмк, ПЛТВхк и ПЛТВмк предназначены для фиксированного монтажа при напряжении 50В постоянного тока, температуре от -50 до +70°C. Токопроводящие жилы изготавливают из сплавов копель (к), хромель (х), константан (к) и из проволок из меди диаметром 0,3 и 0,4 мм. То-

копроводящие жилы, расположенные параллельно в одной плоскости с шагом 1,25 мм, изолированы ПЭ или ПВХ пластикатом толщиной 0,3 мм. Рядом расположенные жилы составляют рабочую пару и изготовляют из чередующихся пар: металл-сплав (м+к) и сплавов (х+к). Каждой паре присваивается обозначение: медь-константан (м+к), хромель-копель (х-к). Электрическое сопротивление изоляции между двумя соседними жилами, а также между жилой и водой при температуре 20°С не менее: проводов с ПЭ изоляцией – 1000·МОм·м, с ПВХ – не менее 100 МОм·м. Провода испытывают переменным напряжением 100В частотой 50 Гц между жилами в течение 1 мин. Провода выдерживают не менее 40 знакопеременных изгибов на радиус 30 и 40 мм на угол 90°. Параметры проводов представлены в таблице 4.35.

Таблица 4.35 – Конструктивные данные, масса проводов ПЛТПхк, ПЛТПмк, ПЛТВхк, ПЛТВмк

$n \times d$, мм	Номинальные размеры провода, мм		g , кг/км			
	Ширина	Толщина	ПЛТПхк	ПЛТВхк	ПЛТПмк	ПЛТВмк
1×0,3	2,2-0,2	0,9-0,1	2,9	3,5	2,9	3,5
2×0,3	4,6-0,2	0,9-0,1	6,1	7,1	6,1	7,1
3×0,3	7,2-0,3	0,9-0,1	9,3	11,2	9,3	11,2
5×0,3	12,2-0,5	0,9-0,1	15,6	18,9	15,6	18,9
10×0,3	24,6-0,8	0,9-0,1	31,5	38,2	31,6	38,2
1×0,4	2,2-0,2	1,0-0,1	4,4	4,7	4,2	4,7
2×0,4	4,8-0,3	1,0-0,1	8,3	9,7	8,3	9,6
3×0,4	7,2-0,3	1,0-0,1	12,6	14,9	12,5	14,6
5×0,4	12,2-0,5	1,0-0,1	21,2	24,7	21,0	24,6
10×0,4	24,8-0,8	1,0-0,1	42,6	49,7	42,3	49,4

Провод ПЛПМО (таблица 4.36) предназначен для электрической связи между подвижными и неподвижными частями устройств при напряжении до 100В переменного тока частотой до 1000 Гц или 120В постоянного тока при температуре от -60 до +100°С. Токопроводящая жила скручена из 7 медных луженых проволок диаметром 0,12 мм, они уложены параллельно в одной плоскости, изолированы ПЭ, их подвергают облучению. Сопротивление изоляции между двумя со-

седними жилами, а также между каждой жилой и водой при нормальных условиях – 10^8 Ом·м, при относительной влажности 98 % при 35°C – 10^7 Ом·м. Провод испытывают напряжением 500 В частотой 50 Гц в течение 1 мин и выдерживают не менее 4000 знакопеременных изгибов на угол 90° .

Таблица 4.36 – Конструктивные данные, масса, электрическое сопротивление жил проводов ПЛПМО

$n \times S$, мм ²	Расстояние между центрами жил, мм	Номинальная толщина изоляции, мм	Наружные размеры, мм		g, кг/км	R, Ом/км, не более
			Ширина	Толщина		
4×0,08	0,95	0,17±0,05	3,5±0,3	0,7±0,05	5,0	244,0
17×0,08	0,95	0,17±0,05	15,6±1,5	0,7±0,05	22,0	244,0
19×0,05	0,85	0,15±0,05	15,5±1,5	0,6±0,1	21,0	360,0

Вопросы для самопроверки

1. Какие основные электротехнические материалы используются для изготовления электрических проводов?
2. Какое назначение у обмоточных проводов?
3. Какими параметрами различаются медные и алюминиевые провода с эмалевой изоляцией?
4. Что такое эластичность эмалевого покрытия провода?
5. Приведите основные характеристики эмалированных проводов.
6. Какие материалы используются в качестве волокнистой изоляции?
7. Какой материал обеспечивает наибольшую нагревостойкость обмоточных проводов с волокнистой изоляцией?
8. Для каких условий работы выпускаются обмоточные провода с эмалево-волокнистой изоляцией?
9. Какие провода применяются для изготовления обмоток электрических машин?

10. Как определяется электрическая прочность проводов с волокнистой изоляцией
11. Что такое монтажный провод?
12. В чём отличие монтажного кабеля?
13. Для каких целей применяются установочные провода?
14. Какие свойства алюмомедных проводов вы знаете?
15. В каких условиях эксплуатации применяются силовые кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией?
16. Назовите основную область применения кабелей с бумажной пропитанной изоляцией.
17. Для чего используется свинцовая оболочка кабеля?
18. Что такое маслonaполненный кабель?
19. Приведите порядок цветной маркировки проводов в цепях переменного тока.
20. Приведите схему цветной маркировки проводов в цепях постоянного тока.
21. Дайте определение плоского (ленточного) кабеля.
22. Назовите основные области применения плоских кабелей в мехатронике.
23. Какой материал используется в изоляции плоских кабелей?
24. Где применяется кабель с безгалогенной LSZH-изоляцией?
25. Какие варианты изгиба кабеля используются при прокладке его между блоками аппаратуры?
26. В чём проявляется особенность ленточного кабеля со скрученными жилами?
27. Выполните сравнительный анализ монтажных плоских проводов по сфере их применения.
28. Для чего используется серебрение медной проволоки в плоских кабелях?

Глава 5. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СОЕДИНЕНИЙ

5.1. Электроизоляционная лента

Электроизоляционная лента (изоленга) – это расходный материал, предназначенный для изоляции жил проводов и кабелей при проведении различных электромонтажных и ремонтных работ.

В первой половине XX века разработчики американской компании «Minnesota Mining and Manufacturing» решили разработать электроизоляционную ленту, которая была бы не просто лентой, а самоклеящейся лентой.

Сначала было решено создать такую ленту на основе ПВХ, но выяснилось, что трикрезилфосфат (в основе пластификатора) делает поверхность ленты очень маслянистой и приводит к разрушению любых адгезивов, которые на нее наносятся. Позже химики компании нашли новый подход – они стали изготавливать ленту на основе каучука и без содержания серы.

Эти первые самоклеющиеся ленты имели белый и жёлтый цвета. Белая лента быстро ушла в прошлое из-за неустойчивости к ультрафиолету, её заменили на чёрную.

Современные изоленги эластичны, обладают отличными диэлектрическими характеристиками, обладают высокой адгезией, стойки к высокой влажности, к температурным перепадам и действию химикатов.

Прорезиненная тканевая изоленга (ГОСТ 2162-97) – хлопчатобумажное полотно, пропитанное резиной. При нагреве не плавится, а обугливается. Со временем высыхает, теряя клейкость. Не обеспечивает герметичной сплошной изоляции, резиновая пропитка не сплошная и содержит поры. Итогом служит способность накапливать и удерживать влагу, электрическая стойкость слоя изоленги эквивалентна такому же слою воздуха. В помещениях с повышенной влажностью, а также на улице её использовать нельзя. Кроме того, хлопчатобумажная ткань не растягивается и может выдержать напряжение на пробой не более 1000В. Она сохраняет свои эксплуатационные свойства при температуре $-30 + 30^{\circ}\text{C}$.

Тканевые изоленты

Прорезиненную ХБ ленту, упомянутую выше, не стоит путать с современными тканевыми изолентами. Такие ленты используются не для электрической изоляции, а для крепления и организации проводов.

Представляют собой ткань или нетканое полотно с нанесённым слоем клея. Высокая гибкость этой ленты позволяет сохранить высокую гибкость жгута, избегая заломов и пузырей.

Другой разновидностью тканевой ленты является рыхлая тканевая лента для жгутования проводов в автомобилях и мобильной робототехнике, она обеспечивает целостность жгута, и, в отличие от ПВХ изоленты, при вибрации не «гремит», ткань хорошо гасит звуки от соприкосновений.

ПВХ изоленты

Самый распространенный тип изолент. Лента из пластифицированного ПВХ с клеевым слоем. Не боится влаги, соединение, заизолированное такой лентой, не боится изгибов. Единственная изолента с широкой палитрой цветов: чёрная, зелёная, красная, коричневая, серая, белая и др. Также есть полосатая жёлто-зелёная. Изоляционная лента эластична и способна выдержать электрическое напряжение на пробой до 5000В. Но эта лента имеет основной и весьма значимый недостаток – отсутствие термической устойчивости, при высокой температуре начинается процесс плавления. Основываясь на технических характеристиках этого изоляционного материала, максимальная допустимая температура должна быть не более 70°C согласно ГОСТ 16214-86. Кроме этого, изолента ПВХ при температуре ниже нуля становится очень ломкой и теряет свою клейкую способность. Стандартная ширина изоленты в бобине составляет 14...19 мм. Липкая поверхность состоит из акрилового и каучукового клея, которые абсолютно безопасны для человеческого организма, так как совсем не токсичны.

Резиновые самовулканизирующиеся изоленты

Иногда называются самослипающимися изолентами. Представляют собой толстую (0,5...1 мм) резиновую ленту с защитным слоем. При изоляции соединения удаляется защитная лента, изолента с натягом наматывается внахлест. От контакта с воздухом места нахлеста самосвариваются, образуя монолитный слой. Такую намотку потом не размотать, только разрезать.

Силиконовые самослипающиеся ленты

Аналогичны резиновым, но из силиконового полимера. Это отечественные ленты ЛЭТСАР (РЭТСАР – с армирующим слоем из стеклоткани). После намотки внахлест за пару дней крепко слипаются. Силиконы, в отличие от резины, более термостойки, стойки к химическим воздействиям, на морозе сохраняют эластичность.

Полиимидная лента

Известна также как «термоскотч», «каптон–лента». Жёлтая прозрачная термостойкая лента, часто можно увидеть внутри электронной и компьютерной техники, ноутбуках – ей закрепляются шлейфы, провода. Термостойкая (не плавится паяльником), не тянется, на морозе не дубеет как ПВХ. За пределами электронной техники встречается редко. Используется при ремонте аппаратуры, при пайке феном такой лентой можно заклеить элементы, не подлежащие пайке, чтобы не сдуть их случайно. Отменная термостойкость (до 260°C) позволяет применять такие ленты вместо слюды для изоляции нагревательных элементов от корпуса.

Полиэфирная лента

Изоляционная лента из плёнки полиэтилентерефталата (ПЭТ, он же лавсан, он же майлар). Часто используется как изоляционная лента в трансформаторах бытового назначения (часто имеет жёлтый цвет).

Такая лента практически не растягивается, имеет термостойкость большую, чем у ПВХ (130°C, против 70°C у ПВХ). Для увеличения прочности может армироваться стекловолокном

Стеклотканевая лента с фторопластовой пропиткой

Обладает отличной термостойкостью (до 260°C), благодаря покрытию из фторопласта отлично скользит, к её поверхности ничего не прилипает, устойчива к агрессивным реагентам. Применяется для покрытия нагревательных поверхностей упаковочных машин, изоляции там, где важна химическая устойчивость.

Мастичные ленты

Представляют собой ленту из толстого слоя смолы (мастики), применяются для изоляции, набивки, выравнивания изоляции. Толстый слой липкой пластичной мастики позволяет заполнить большие зазоры меньшим количеством слоёв изоляции, при этом мастика хорошо слипается и обеспечивает герметичное соединение без нагрева. Так как мастика не высыхает, то такая изоляция не склонна к образованию трещин и щелей.

Канцелярская липкая лента «скотч»

«Scotch» – это торговая марка, но как и термос, ксерокс, аква-ланг и другие марки, стала именем нарицательным для прозрачной клейкой ленты. Такая липкая лента не используется в электротехнике.

Изготавливается чаще всего из БОПП – Биаксиально Ориентированного ПолиПропилена. Скотч прозрачен, достаточно прочен и является хорошим диэлектриком. К сожалению, такая клейкая лента склонна к «эффекту расстегивающейся молнии» и наличие порезов позволяет ленте разорваться с минимальным усилием. Один слой скотча выдерживает напряжение порядка 1000В переменного тока, так что, если необходимо заизолировать соединение, а под рукой вообще ничего другого нет, то это можно сделать скотчем, хотя качество и надёжность такой изоляции будет низкой

Duct tape

Очень популярная за рубежом липкая лента, набирающая популярность у нас. Представляет собой полиэтиленовую плёнку, покрытую толстым слоем клея и армированную тканью. Отлично липнет, легко рвется руками поперёк, не боится воды, благодаря армированию тканью не растягивается и обладает хорошей прочностью на разрыв. Чаще всего применяется для экстренного ремонта вещей, может применяться и для временной электрической изоляции, но в установках невысокого напряжения – алюминиевая пудра, придающая серый цвет ленте делает электроизоляционные свойства ленты невысокими. Неплохо горит, что для электрической изоляции крайне нежелательно.

5.2. Изоляционные трубки

Иногда использование в качестве диэлектрика трубок предпочтительнее изолянт – в силу трудоёмкости использования при массовой сборке аппаратуры, для гарантированной герметичности, при трудностях в доступности соединения для намотки изолянты.

Трубка из ПВХ

Трубка из ПВХ («кембрик») была широко распространена в СССР для изоляции соединений проводов к клеммам, соединений проводов между собой. В маркировочных целях активно применялась в автомобильной проводке и релейных схемах, в распределительных щитах. На ней хорошо держались надписи маркером или фломасте-

ром. Обладает малой эластичностью, поэтому нужно принимать меры, чтобы трубка не соскочила и не скользила по проводу.

Фторопластовая трубка

Используется как термостойкая изоляция, особенно в паре с проводом МГТФ. Так же, как и фторопласт, не любит длительные механические нагрузки, но зато держит довольно высокую температуру. Скользящая и не эластичная. В механизмах подачи пластика 3D-принтеров, в качестве термобарьера используется фторопластовая трубка для пневмосистем (диаметр наружный 4 мм, внутренний – 2 мм). При подаче филамента пластика через такую трубку в экструдер важную роль играет скользкость фторопласта.

Армированные трубки

Существуют нескольких видов, в зависимости от материала армирования.

Трубка из хлопчатобумажного чулка, пропитанного лаком, носит названия «линоксиновая трубка», «трубка изоляционная ТЛВ», «трубка изоляционная лаковая», и имеет характерный жёлтый цвет с видимой текстурой плетения. Используется для изоляции мест соединений обмоток электрических машин с многожильными проводами.

Там, где есть постоянный нагрев – электронагреватели, теплоventильаторы, термопоты, ТЭНы и т. д. используется более термостойкий вариант – «стеклоармированная изоляционная трубка». Представляет собой силиконовую трубку, покрытую снаружи стеклотканевым чулком, или сам чулок, пропитанный силиконом. Силикон сам по себе термостоек и достаточен для изоляции, но стеклоткань добавляет прочности и препятствует прилипанию. Стоит отметить, что при использовании таких трубок необходимо принимать во внимание их фиксацию на месте, при неудачном расположении такая трубка может «съехать» по проводу и оголить соединение.

Термоусадочная трубка

Широко используется для изоляции соединений и практически полностью вытеснила со своих позиций ПВХ-кембрик, так как удобна в работе. Представляет собой полимерную трубку с памятью формы – трубка после изготовления растягивается в холодном состоянии, что создает внутренние напряжения. При нагреве до температуры размягчения, (но не плавления) полимер стремится восстановить свою форму и трубка уменьшается в диаметре весьма значительно. Термоуса-

дочная трубка плотно обхватывает соединения, гарантируя, что трубка не соскочит и не съедет.

Для производства термоусадок применяют следующие материалы:

- поливинилхлорид;
- фторкаучук;
- полимеры полиолефинового состава;
- полиэтилен;
- поливинилиден;
- полиэстер;
- полиэтилентерефталат.

Главные требования и свойства к трубкам из термоусадки:

- устойчивость к повышенному нагреву;
- легкое изменение формы;
- способность к удлинению при разрыве в 300%;
- стойкость к горению;
- прочность растяжения более 15 МПа;
- химическая стойкость к щелочи и кислоте;
- эластичность.

Термоусадочные трубки могут работать в диапазоне температур $-55+120^{\circ}\text{C}$. Специальные трубки выдерживают до $+270^{\circ}\text{C}$.

Принцип действия и применение

Трубка из термоусадочного материала применяется для полной изоляции открытого места, требующего защиты изоляционным материалом. Трубка при нагревании может изменять свою форму и сжиматься. Надев трубку на изолируемый предмет, воздействуя на нее высокой температурой, можно добиться того, чтобы трубка взяла форму предмета, обжала его и создала изоляционный слой.

Область применения термоусаживаемой трубки выше, чем у изоляционной ленты, применяющейся для таких же целей. Трубку чаще применяют для изоляции проводов, контактов или клемм.

Сферы применения трубки из термоусаживаемого материала:

- производство кабелей;
- при изоляции проводов;
- в качестве герметика в электрооборудовании;

- монтаж и ремонт муфт для соединения кабелей;
- маркировка проводки разными цветами трубки;
- при прокладке телекоммуникационных кабелей, их монтажа;
- в атомной энергетике как вспомогательный элемент;
- для агрегатов и механизмов, эксплуатирующихся в различных отраслях промышленности для защиты от щелочей, кислот, воды, высоких температур;
- для ремонта повреждений и восстановления электропроводки, защиты проводов от коррозии.

Достоинства применения:

- защищает электроприборы от температурных и механических воздействий;
- подбор трубки из термоусаживаемого материала по различным цветам, сочетающимся с цветом прибора;
- простота и надежность установки;
- позволяет соединять элементы друг с другом;
- заполнение углублений и неровностей, качественная заглушка;
- невысокая цена;
- экологическая чистота.

Виды трубок

Трубки из термоусаживаемого материала можно разделить на виды по типу материала и методу действия:

Трубка клеевая термоусаживаемая, широко применяется во многих местах и для разных работ. Они оснащены слоем клея внутри, при нагреве герметизирует стык. Трубка при облепании крепко закрепляется к предмету, обеспечивает защиту высокого уровня от попадания воды и влаги. Степень усаживания трубок выше 300%. Трубка со слоем клея применяется для изолирования предметов, имеющих размер меньше внутреннего диаметра трубки на значительную величину.

Трубка с толстой стенкой производится из специального материала – полиолефина. Они распространены больше, чем клеевые трубки, так как легки в применении и низкой стоимости, имеют

большое разнообразие цветов. Толстостенные трубки из термоусаживаемого материала можно разделить на типы: с подавлением горения и без подавления горения. В первом случае трубка обуславливает затухание самостоятельно, если нет открытого огня, из-за применения негорючих веществ при производстве трубок. Они применяются как изоляторы на производствах с опасностью взрыва, предприятиях по выпуску электротехники или на военных заводах при разработке специальной военной техники.

Термоусаживаемые трубки специального назначения применяются для обеспечения изоляции на предприятиях специального назначения. Среди них можно выделить некоторые виды трубок:

- трубки флуоресцентного вида, используются в местах с плохой освещенностью, накапливают в себе световую энергию днем, когда светло, в темноте излучают свет;

- термоусадки со свойствами защиты от высокого напряжения, применяют для сетей высоковольтного питания;

- трубки из тефлона, для работы при высоких температурах среды, или в агрессивной обстановке;

- трубки с рифлением для покрытия поверхности рукояток электрических приборов и инструмента.

По коэффициенту усадки трубки «сокращаются» в диаметре от 2-х до 6-ти раз. Усадка указывается в виде дроби: B/A , где B – это диаметр до усадки, а A – диаметр после усадки.

Для герметизации сложных соединений, например, при разделке силового кабеля, выпускаются *термоусадочные муфты* («термоусаживаемая перчатка»). Такая муфта не позволяет влаге попадать в зазор между наружной и внутренней изоляцией кабеля.

5.3. Гофрированная труба для электропроводки

Гофрированная труба (гофра) является защитой электропроводов от факторов повреждений. Она не даёт распространиться огню при возгорании проводов. Гофра обеспечивает вспомогательную изоляцию кабеля. Это защищает человека от удара током при неисправной изоляции кабеля.

Гофрированная труба – это труба с поперечным сечением переменного значения. Участки небольшой длины малым диаметром с

тонкими стенками чередуются участками с большим диаметром и толстыми стенками. Участки с толстыми стенками придают жесткость в направлении поперечного усилия. Тонкие участки дают гибкость и растяжимость, особенно тонкоразмерная.

Гофрированная труба электротехническая

Разрез электротехнической гофры показывает нам прямоугольный профиль. Она сделана из поливинилхлорида – жесткого материала. Электрогофра слаборастяжимая, но с повышенной гибкостью.

Материал гофры:

- полиамид – надежно защищает от влаги;
- полиэтилен повышенного давления – для 2-слойной гофры;
- поливинилхлорид – негорючее вещество;
- полипропилен – для монолитного строительства;
- полиэтилен пониженного давления – высокая гибкость.

По исполнению гофра делится на классы:

- легкие – тонкостенные, гибкие. для установки кабелей под обшивкой;
- усиленные – толстостенные, тяжелые, прочные, для уличной проводки, под землей, в бетоне.

Особенностью гофры для электропроводки является наличие стальной проволоки внутри трубки по всей длине. Проволока нужна для удобства протягивания проводов и жгутов в трубку. Цветовая гамма электротехнической гофры очень широка. Производители выпускают её в самых различных цветах. Основные цвета: серый, черный и красный.

Независимо от конструкции, модификации и материала гофры она должна обладать свойствами:

- защита от влаги и воды;
- стойкость на деформацию и разрыв;
- материал из диэлектрика;
- малый вес;
- легко вскрывается для замены проводов;
- химическая стойкость;
- защищает от перепадов температур;

- простой монтаж;
- экологическая безопасность;
- защита от внешней среды;
- защищенность от повреждений;
- долговечность, более 50 лет;
- негорючесть;
- стойкость к коррозии и гниению.

Металлорукав для электропроводки

Часто электрическая проводка нуждается во вспомогательной защите, которую может обеспечить металлорукав для кабеля. Он предохраняет электрическую проводку от механических повреждений, уменьшает степень влияния внешних электромагнитных излучений, защищает провода и кабели от влаги, химических реагентов, не позволяет повредить провод во время установки. Такой гибкий кабель-канал уменьшает вероятность возгорания при коротком замыкании. При сильном нагревании электропроводки, находящейся в металлическом рукаве, распространение пламени по нему невозможно.

Основной сферой применения являются места с опасностью возгорания и внешних воздействий на электрическую проводку. Это могут быть уличные сети освещения, производственные цеха, общественные здания, склады. Проведение электрической проводки в деревянных домах в металлическом рукаве запрещается. Это связано с большим риском возгорания при перегреве проводов, а также возможном повреждении рукава.

Сегодня изготовители электротехнической продукции предлагают несколько видов металлического гофрированного рукава.

Оцинкованный. Негерметичный металлорукав, производимый из стальной оцинкованной ленты. Для обеспечения герметичности стыков применяется хлопчатобумажная ткань.

Из луженой жести. Негерметичный металлический рукав, изготовленный из жести, которая перед скруткой в гофру обрабатывается электролитическим лужением, с применением оловянного напыления. Этот защитный слой предохраняет гофру от коррозии, что увеличивает срок его службы. Между стыками в качестве изоляции применяется полипропиленовая пленка, которая способна защитить рукав от про-

никновения влаги. Поэтому такой металлорукав применяется для монтажа электрической проводки в помещениях с высокой влажностью.

В поливинилхлоридной изоляции. Такая конструкция обладает герметичными свойствами, и при монтаже обеспечивает герметичность стыка. Она защищает провода и кабели от солнечного света, проникновения влаги и воды, химического и механического воздействия. Металлические гофры в ПВХ изоляции могут применяться для скрытой и открытой электропроводки, как в помещении, так и снаружи.

Из нержавеющей стали. Эта разновидность металлической гофры для электропроводки производится из нержавеющей стали, имеет высокую стоимость, но обладает высокими эксплуатационными параметрами, длительным сроком службы.

Вопросы для самопроверки

1. Какие материалы применяются для изоляции соединений?
2. Что такое электроизоляционная лента?
3. Проведите сравнительный анализ различных типов изолянт.
4. В каких случаях для изоляции соединений применяются диэлектрические трубки?
5. Каков принцип действия термоусадочной трубки?
6. Для герметизации каких соединений выпускаются термоусадочные муфты?
7. Какой материал используют для дополнительной защиты электропроводов от повреждений?
8. Какими свойствами обладает электротехническая гофра?
9. В каких случаях применяется металлорукав для электрических проводов?

Глава 6. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В МЕХАТРОНИКЕ

Технология моделирования трёхмерных объектов методом наплавления обеспечивает широкую универсальность, высокую точность и позволяет трансформировать 3D-файлы из CAD в реальные прочные детали. Изделия, полученные методом 3D-печати, обладают надлежащей прочностью, жесткостью и комплексом физико-механических свойств, актуальных для использования изготавливаемых из них изделий в качестве концептуальных моделей будущих роботов или мехатронных модулей, их функциональных прототипов, производственного инструмента и ответственных деталей.

Для производства изделий используются как наиболее распространенные термопластики общего и инженерного назначения (ABS, ASA, PC и их смеси, NYLON), так и уникальные конструкционные материалы – ULTEM, PPSF, NYLON CF, PEKK, имеющие важное значения для аэрокосмической отрасли, медицины, автомобильной промышленности, мехатроники и робототехники, производства электроники и иных специализированных сфер применения. Перечень основных материалов приведён в таблицах 6.1, 6.2, 6.3.

Таблица 6.1 – Стандартные материалы

Материал	Физические свойства (максимум – 4)		
	Прочность	Гибкость	Долговечность
<i>PLA</i>	2	1	2
<i>ABS</i>	2	2	3
<i>PETG (PET, PETT)</i>	2	2	3
<i>Nylon</i>	3	3	4
<i>TPE, TPU, TPC</i>	1	4	3
<i>PC</i>	4	2	4

Таблица 6.2 – Профессиональные материалы

Материал	Физические свойства (максимум – 4)			Особенные свойства
	Прочность	Гибкость	Долговечность	
<i>Carbon Fiber</i>	3	1	3	
<i>PC-ABS</i>	3	2	3	
<i>HIPS</i>				Материал суппортов
<i>PVA</i>				Материал суппортов
<i>Wax (MOLDLAY)</i>				Восковой
<i>ASA</i>	2	2	3	Атмосферостойкий
<i>PP</i>	2	3	2	
<i>Acetal (POM)</i>	2	1	2	
<i>PMMA (Acrylic)</i>	2	2	3	Прозрачный
<i>Cleaning</i>				Очищает печатную головку
<i>FPE</i>	1	4	3	Очень гибкий
<i>Ceramic (Clay)</i>	1	1	1	Печать керамикой

Таблица 6.3 – Специальные материалы

Материал	Легко использовать	Особенные свойства
<i>Wood</i>	Да	Похож на дерево
<i>Metal</i>	Да	Похож на металл
<i>Biodegradable (bioFila)</i>	Да	Биоразлагаемый
<i>Conductive</i>	Да	Токопроводящий
<i>Glow-in-the-Dark</i>	Да	Светится в темноте
<i>Magnetic</i>	Нет	Ферромагнитный
<i>Color-Changing</i>	Да	Меняет цвет в зависимости от температуры

6.1. Технические характеристики и параметры стандартных материалов

PLA (полилактид)

Биоразлагаемый пластик, в основе которого находится молочная кислота. Производится из сахарного тростника или кукурузы. Может также производиться из других натуральных продуктов, таких как картофельный крахмал или целлюлоза.

Параметры печати:

- температура экструзии – 190...230°C;
- температура стола – 20...60°C;
- обдув – желателен;
- межслойная адгезия – хорошая;
- адгезия к столу – хорошая.

Технические характеристики:

- температура плавления – 175...180°C;

- температура размягчения – 50°C;
- температура эксплуатации изделий – -20+40°C;
- твердость (по Роквеллу) – R70...R90;
- относительное удлинение при разрыве – 3,8%;
- прочность на изгиб – 55,3 МПа;
- прочность на разрыв – 57,8 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 3,3 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 2,3 ГПа;
- температура стеклования – 60...65°C;
- плотность – 1,23...1,25 г/см³;
- минимальная толщина стенок – 1 мм;
- точность печати – ± 0,1%;
- усадка при изготовлении изделий – нет;
- влагопоглощение – 0,2...0,4%;
- прочность – высокая;
- эластичность – низкая;
- долговечность – средняя;
- сложность применения – низкая;
- растворимость – не растворим;
- пищевая безопасность – зависит от производителя, необходимо изучить инструкцию определенного бренда.

Данный пластик нетоксичен и представлен разными производителями в широкой цветовой гамме.

Является одним из самых популярных пластиков для 3D-печати. Причиной данной популярности являются следующие характеристики:

Плюсы:

- не даёт усадки при печати, что позволяет получить точное соответствие размеров напечатанного изделия смоделированному;
- не требует подогреваемого стола;
- не токсичен, во время печати приятно и не сильно пахнет;
- твердый, прочный и скользкий, широкий диапазон применений;
- производится из натуральных компонентов, может использоваться для контакта с пищевыми продуктами;

- биоразлагаемый, вещи из данного пластика не наносят вреда окружающей среде при утилизации.

Минусы:

- под воздействием воздуха и ультрафиолета, как и любой натуральный материал, со временем становится более хрупким, вследствие чего не рекомендуется для долговременного применения при больших физических нагрузках или использования без защитного покрытия на открытом воздухе;
- низкая температура размягчения (50°C) – в салоне машины, оставленной на солнце в жаркий день, легко размягчается и теряет форму;
- узкий температурный диапазон для использования материала – от -20 до +40°C;
- высокая твердость пластика затрудняет его механическую обработку.

Применение:

- крупногабаритные изделия;
- изделия с точными размерами;
- декоративные элементы мебели;
- элементы интерьерного декора;
- изделия под покраску;
- прототипы корпусов и механических изделий.

ABS (акрилонитрилбутадиенстирол)

Ударопрочный пластик, очень популярен в промышленности и 3D-печати. Изделия из ABS достаточно прочны, поэтому его часто используют для печати функциональных объектов, имеющих практическое применение.

Параметры печати:

- температура экструзии – 210...245°C;
- температура стола – 90...120°C;
- обдув – нежелателен;
- межслойная адгезия – средняя;
- адгезия к столу – средняя.

Технические характеристики

- Температура плавления – 175...210°C;
- Температура размягчения – 100°C;
- Температура эксплуатации – -40+80°C;
- Твердость (по Роквеллу) – R105...R110;
- Относительное удлинение при разрыве – 6%;
- Прочность на изгиб – 41 МПа;
- Прочность на разрыв – 22 МПа;
- Модуль упругости при растяжении – 1,6 ГПа;
- Модуль упругости при изгибе – 2,1 ГПа;
- Температура стеклования – 105°C;
- Плотность – 1,1 г/см³;
- Точность печати – ± 1%;
- Усадка при изготовлении изделий – до 0,8%;
- Влагопоглощение – 0,45%;
- долговечность – высокая;
- сложность применения – средняя;
- растворимость – растворим в эфирах, кетонах, ацетоне;
- пищевая безопасность – не опасен.

Выпускается различными производителями в широком ассортименте цветовых оттенков. Некоторые производители, для снижения стоимости, выпускают его без катушек.

Из-за невысокой стоимости сырья, является одним из самых доступных по цене пластиков.

Плюсы:

- хорошее сочетание прочности и упругости позволяет использовать его для изготовления механических изделий, рассчитанных на долгий срок эксплуатации;
- широкий диапазон используемых температур позволяет эксплуатировать изделия из него в технических целях;
- простота механической обработки, в комплексе с химическим сглаживанием поверхности недорогими растворителями типа ацетона, позволяют делать декоративные изделия или корпуса с высоким качеством поверхности.

Минусы:

- плохо переносит воздействие ультрафиолетового излучения, желтеет на солнечном свете, что ограничивает применение неокрашенных поверхностей на улице;
- не любит сквозняков при печати, что ограничивает применение дешевых принтеров с открытым корпусом;
- из-за относительно высокой усадки склонен к деламации (расслоению), требует наличия подогреваемого стола, без него возникают проблемы с прилипанием к столу первого слоя;
- в процессе печати может образовываться неприятный запах, печатать лучше в проветриваемом помещении.

Применение:

- декоративные изделия с последующей обработкой;
- механические изделия;
- корпуса и комплектующие;
- концептуальные модели;
- функциональные прототипы;
- зажимы и приспособления.

Биосовместимый ABS

Отличительные свойства:

- прочный ударостойкий и долговечный пластик;
- биосовместимый, имеет медицинский сертификат;
- стерилизуется в гамма-излучении или окиси этилена;
- размерная стабильность и чистота поверхности;
- цвет слоновой кости.

Применение:

- компоненты медицинской техники;
- медицинский инструмент, зажимы;
- медицинские шаблоны, макеты;
- стерилизуемые детали;
- фармацевтическая упаковка;
- функциональные медицинские прототипы;
- конечные детали и запчасти.

Антистатический ABS

Отличительные свойства:

- специализированный антистатический пластик;
- предотвращает образование статического электричества;
- рассеивает статический заряд с целевым поверхностным сопротивлением 10^7 Ом (стандартный диапазон $10^6 \dots 10^9$ Ом);
- хорошая размерная стабильность;
- чёрный цвет.

Применение:

- функциональные прототипы;
- инструмент для сборки электроники;
- антистатическая упаковка;
- корпуса и чехлы электроприборов;
- устройства хранения, подачи топлива;
- конечные детали и запчасти.

PETG (полиэтилентерефталатгликоль)

Относительно новый, по сравнению с тем же ABS, материал, но уже завоевавший заслуженное признание у 3D-печатников. Пластик достаточно ударопрочный, а спекаемость слоев получается такой, что при нагрузке изделие часто ломается против слоёв, а не вдоль.

Параметры печати:

- температура экструзии – $215 \dots 245^\circ\text{C}$;
- температура стола – $20 \dots 80^\circ\text{C}$;
- обдув – 20%;
- межслойная адгезия – очень высокая;
- адгезия к столу – средняя.

Технические характеристики

- температура плавления – $222 \dots 225^\circ\text{C}$;
- температура размягчения – 80°C ;
- температура эксплуатации – $-40 \dots +70^\circ\text{C}$;
- твердость (по Роквеллу) – R106;
- относительное удлинение при разрыве – 50%;
- прочность на изгиб – 76,1 МПа;
- прочность на разрыв – 36,5 МПа;

- модуль упругости при растяжении – 2,6 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 1,12 ГПа;
- температура стеклования – 80°C;
- плотность – 1,3 г/см³;
- точность печати – ± 0,1%;
- усадка при изготовлении изделий – нет;
- влагопоглощение – 0,12%;
- долговечность – высокая;
- сложность применения – низкая;
- растворимость – не растворим;
- пищевая безопасность – рекомендуется изучить инструкцию производителя.

По ассортименту доступных цветов PETG не уступает ABS.

Плюсы:

- отсутствие запаха при печати – позволяет печатать, не используя дополнительную вытяжку;
- отсутствие усадки обеспечивает высокую точность размеров принтов;
- очень сильное спекание между слоями – можно печатать тонкостенные изделия с высокой прочностью;
- стойкость к ультрафиолету – напечатанные модели можно использовать вне помещений;
- широкий температурный диапазон эксплуатации;
- при печати не требуется закрытая камера;
- хорошее скольжение и ударопрочность – можно печатать шестерни, втулки и другие детали механизмов;
- не токсичен, можно печатать изделия, предназначенные для контакта с пищей.

Минусы:

- высокая текучесть требует тщательной настройки ретрактов;
- высокая температура печати;
- прочность и температура размягчения ниже, чем у ABS.

Применение:

- формы для вырубki печенья;
- не сильно нагруженные кинематические пары;

- элементы мебельного и интерьерного декора;
- сувениры;
- изделия, эксплуатирующихся в уличных условиях.

Nylon

Nylon (нейлон – синтетический материал из семейства полиамидов) – очень стоек к истиранию, отсюда и основное применение – трущиеся узлы кинематических пар (шестеренки, втулки и т.д.).

Параметры печати:

- температура экструзии – 235...260°C;
- температура стола – 100...120°C;
- обдув – нежелателен;
- адгезия слоев – высокая;
- адгезия к столу – низкая;

Технические характеристики:

- температура плавления – 215...220°C;
- температура размягчения – 120°C;
- температура эксплуатации – -30+120°C;
- твердость (по Роквеллу) – R70...R90;
- относительное удлинение при разрыве – 300%;
- прочность на изгиб – 70 МПа;
- прочность на разрыв – 66-83 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 2,7 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 2,6 ГПа;
- температура стеклования – 50...70°C;
- плотность – 1,13 г/см³;
- минимальная толщина стенок – 1 мм;
- точность печати – ± 3%;
- усадка при изготовлении изделий – 1%;
- влагопоглощение – 3,1%;
- эластичность – высокая;
- долговечность – высокая;
- сложность применения – средняя;
- растворимость – не растворим;
- пищевая безопасность – рекомендуется изучить инструкцию производителя.

Используется в основном в технических целях, выпускается обычно белого, реже чёрного цвета.

Его устойчивость к высоким температурам, хорошее скольжение и стойкость к истиранию делают нейлон незаменимым материалом для разнообразных шестеренок и конструкционных деталей. Нивелируется это очень высокой усадкой, необходимостью закрытой камеры для печати и невозможностью печати больших изделий.

Плюсы:

- прочность;
- упругость;
- высокое скольжение;
- термостойкость;
- химическая стойкость;
- имеется углеродонаполненный вариант.

Минусы:

- сложность печати;
- высокая усадка, при моделировании необходимо обязательно корректировать размеры с учетом усадки.

Применение:

- прочные функциональные прототипы;
- вставки для прессования, оснастка;
- крепежные элементы, защёлки, ручки;
- шестерни, элементы передач;
- специальный инструмент;
- износостойкие высокопрочные детали.

Flex

Flex (полиуретан) – мягкий резиноподобный материал. Используется там, где нужна гибкость и эластичность готовых изделий.

Параметры печати:

- температура экструзии – 220...240°C;
- температура стола – 90...110°C;
- обдув – нежелателен;
- адгезия слоев – хорошая;
- адгезия к столу – средняя.

Технические характеристики:

- температура плавления – 200...210°C;
- температура размягчения – 110°C;
- температура эксплуатации – -100+100°C;
- твердость (по Шору) – D40;
- относительное удлинение при разрыве – 600%;
- прочность на изгиб – 5,3 МПа;
- прочность на разрыв – 17,5 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 0,06 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 0,07 ГПа;
- плотность – 1,1 г/см³;
- точность печати – ± 1%;
- усадка при изготовлении изделий – 0,35...0,8%;
- влагопоглощение – 0,04%;
- эластичность – очень высокая;
- долговечность – очень высокая;
- сложность применения – средняя (ТРЕ,ТРС), низкая для ТРУ;
- пищевая безопасность – не безопасен.

Разнообразие цветов небольшое – обычно это белый, чёрный или серый материал.

Плюсы:

- гибкость – основное свойство, которое обуславливает применение;
- масло- и бензостойкость – может использоваться при прямом контакте с этими жидкостями;
- широкий температурный диапазон применения – можно использовать в технических изделиях, в условиях повышенных температур.

Минусы:

- сложность печати – зачастую требуется доработка экструдера для печати гибкими материалами;
- не всегда возможна печать с ретрактами – возможно возникновение подтёков на модели.

Применение:

- прокладки и ремни для технических изделий;

- подошва для обуви или обувь;
- любое изделие, где требуется высокая гибкость.

РС

РС (поликарбонат) – один из самых крепких материалов. Устойчив к физическому и тепловому воздействию. Выдерживает температуру до 110°C. Прозрачный.

В промышленности используется для изготовления бронестекол и масок для аквалангов, остекления парников. В бытовой 3D-печати применяется редко. Причина – высокие гигроскопичность, температура печати и усадка.

Параметры печати:

- температура экструзии – 270...310°C;
- температура стола – 90...110°C;
- обдув – нежелателен;
- межслойная адгезия – высокая;
- адгезия к столу – низкая.

Технические характеристики

- температура плавления – 300°C;
- температура размягчения – 127°C;
- температура эксплуатации – -40+120°C;
- твердость (по Роквеллу) – D82;
- относительное удлинение при разрыве – 4,8%;
- прочность на изгиб – 89 МПа;
- прочность на разрыв – 57 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 1,95 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 1,8 ГПа;
- температура стеклования – 161°C;
- плотность – 1,2 г/см³;
- точность печати – ± 6%;
- усадка при изготовлении изделий – 3%;
- влагопоглощение – 0,2%;
- долговечность – очень высокая;
- сложность применения – средняя;
- растворимость – не растворим;
- пищевая безопасность – не безопасен.

Отличительные свойства:

- высокопрочный пластик;
- биосовместимый, имеет медицинскую сертификацию;
- стерилизуется в гамма-излучении или окиси этилена;
- применяется для ответственных инженерных задач;
- обеспечивает высокую термостойкость и долговечность;
- гарантирует точность и стабильность размеров;
- белый цвет.

Применение:

- прототипы для ответственных задач;
- инструменты, крепежные элементы;
- детали медицинского оборудования;
- медицинский инструмент, зажимы;
- упаковка лекарственных препаратов;
- техоснастка для выкладки композитов;
- оснастка для вакуумной формовки;
- зажимы и приспособления;
- шаблоны для гибки металлов;
- оснастка для вакуумной формовки;
- детали пищевой промышленности;
- долговечные конечные детали;
- биосовместимый PC.

PC/ABS

PC/ABS (поликарбонат + акрилонитрилбутадиенстирол) – как уже отмечалось выше, поликарбонат является очень прочным материалом, но им сложно печатать. Для облегчения печати используется его смесь с ABS.

Параметры печати:

- температура экструзии – 250...260°C;
- температура стола – 120...130°C;
- обдув – нежелателен;
- адгезия слоев – хорошая;
- адгезия к столу – плохая.

Технические характеристики

- температура плавления – 230...240°C;

- температура размягчения – 135°C;
- температура эксплуатации – -30+120°C;
- твердость (по Роквеллу) – R116;
- относительное удлинение при разрыве – 10%;
- прочность на изгиб – 80 МПа;
- прочность на разрыв – 55 МПа;
- модуль упругости при изгибе – 2,3 ГПа;
- температура стеклования – 105°C;
- плотность – 1,11 г/см³;
- точность печати – ± 1,5%;
- усадка при изготовлении изделий – 0,7%;
- влагопоглощение – 0,3%.

Данный пластик обладает высокой ударопрочностью даже при низких температурах, термической стойкостью, высокой жесткостью и хорошей обрабатываемостью.

Это позволяет печатать из него как прочные инженерные изделия, так и декоративные поделки.

Плюсы:

- ударопрочность;
- термостойкость;
- жесткость;
- простота постобработки.

Минусы:

сложность печати.

Применение:

- функциональные прототипы;
- детали и аксессуары автомобилей;
- электроника и телекоммуникации;
- производственные инструменты;
- технические приспособления, зажимы;
- конечные детали и запчасти;

SBS

SBS (стиролбутадиенстирол) – еще один из относительно новых пластиков для 3D-печати. Характеризуется низкой токсичностью и усадкой, а также высокой прочностью. Основное его преимущество в

его прозрачности. Изделия, напечатанные этим пластиком и обработанные сольвентом, приобретают прозрачность окрашенного стекла.

Параметры печати:

- температура экструзии – 220...240°C;
- температура стола – 70...90°C;
- обдув – 20%;
- межслойная адгезия – низкая;
- адгезия к столу – средняя.

Технические характеристики

- температура плавления – 190...210°C;
- температура размягчения – 76°C;
- температура эксплуатации – -80+65°C;
- твердость (по Роквеллу) – R118;
- относительное удлинение при разрыве – 250%;
- прочность на изгиб – 36 МПа;
- прочность на разрыв – 34 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 1,35 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 1,45 ГПа;
- температура стеклования – 95°C;
- плотность – 1,01 г/см³;
- точность печати – ± 0,4%;
- усадка при изготовлении изделий – 0,2;
- влагопоглощение – 0,07%.

Плюсы:

- относительно низкая усадка, позволяющая печатать в принтерах с открытым корпусом;
- высокая адгезия к столу;
- возможность контакта с пищевыми изделиями;
- ударопрочность;
- красивые цвета, позволяющие создавать уникальные предметы декора;
- прозрачность после обработки, возможность использования в светильниках;
- широкий диапазон температур эксплуатации, морозостойкость;
- простота постобработки как химическими, так и механическими методами.

Минусы:

- слабая межслойная адгезия, требует сопел с большим диаметром отверстия, либо печати со 100% заполнением;
- относительно высокая температура печати, как и у PETG.

Применение:

- элементы декора;
- элементы светильников.

6.2. Технические характеристики и параметры профессиональных материалов

HIPS (высокопрочный полистирол)

Достаточно мягкий пластик, создавался для использования совместно с ABS, для поддержки при двухэкструдерной 3D-печати. Этому способствовали его следующие свойства: одинаковая с ABS температура экструзии, низкая спекаемость с ABS, наличие растворителя (*D-Limonene*), который растворяет HIPS и не растворяет ABS.

Параметры печати:

- температура экструзии – 210...245°C;
- температура стола – 90...120°C;
- обдув – нежелателен;
- межслойная адгезия – средняя;
- адгезия к столу – средняя.

Технические характеристики

- температура плавления – 175...210°C;
- температура размягчения – 97°C;
- температура эксплуатации – -40+70°C;
- твердость (по Роквеллу) – R79;
- относительное удлинение при разрыве – 64%;
- прочность на изгиб – 37,6 МПа;
- прочность на разрыв – 16,4 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 0,93 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 1,35 ГПа;
- температура стеклования – 55°C;
- плотность – 1,05 г/см³;
- точность печати – ± 0,5%;

- усадка при изготовлении изделий – 0,4%;
- влагопоглощение – 1%.

Его характеристики сделали возможным использование данного пластика и для самостоятельного применения. На данный момент выпускается различными производителями в широком диапазоне цветов, однако меньшем, чем для PLA или ABS.

Плюсы:

- меньшая усадка, чем у ABS, что делает его пригодным для печати точных изделий;
- меньшая плотность, чем у PLA, что позволяет печатать изделия, где необходима лёгкость конструкции;
- мягкость поверхности, которая гарантирует простоту механической обработки;
- матовость, которая придает эффект сглаженности изделиям;
- температура размягчения почти как у ABS, что позволяет использовать его в уличных условиях.

Минусы:

- как и ABS, требует подогреваемой платформы и подвержен деламинации, хоть и в меньшей степени;
- меньшая, чем у ABS, прочность на изгиб и, как следствие, большая хрупкость изделий;
- низкая устойчивость к ультрафиолетовому излучению, что ограничивает использование изделий на солнечном свете.

Применение:

- производство мебельного декора и интерьерных украшений;
- печать поддержек для ABS.

ULTEM, полиэфиримид (SABIC)

ULTEM 9085, полиэфиримид 9085 (SABIC)

Отличительные свойства:

- конструкционный огнестойкий пластик;
- сертификат FST (на горение, выделение дыма, токсичность);

- высочайшая прочность на разрыв и изгиб;
- высокая термо- и химическая стойкость, ударостойкость;
- размерная стабильность и долговечность;
- цвета желто-коричневый и черный.

Применение:

- аэрокосмические компоненты;
- детали средств транспортировки;
- детали автомобильной техники;
- специальная тара и упаковка;
- корпуса, воздуховоды, патрубки;
- термостойкие износостойкие детали.

ULTEM 1010, полиэфиримид 1010 (SABIC)

Отличительные свойства:

- наивысшая прочность и термостойкость в классе FDM;
- биосовместимый, имеет медицинский сертификат;
- имеет сертификат пищевой безопасности;
- возможность температурной стерилизации в автоклаве;
- обеспечивает стабильность размеров и долговечность;
- цвет тёмно-коричневый.

Применение:

- аэрокосмические компоненты;
- медицинская техника и инструмент;
- детали автомобилей и транспорта;
- термостойкие штампы, высеки, оснастка для пищевой промышленности;
- специальная тара и упаковка;
- корпуса, воздуховоды, патрубки;
- термостойкие износостойкие детали.

Ceramo

Ceramo, ceramic (керамический) – материал, имитирующий керамические изделия. Твердый и прочный, но хрупкий.

Готовые изделия практически неотличимы по тактильным ощущениям от настоящей керамики. Изделия легко поддаются механической обработке.

Параметры печати:

- температура экструзии – 230...250°C;
- температура стола – 90...110°C;
- обдув – нежелателен;
- адгезия слоев – отличная;
- адгезия к столу – средняя;

Технические характеристики:

- температура плавления – 215...220°C;
- температура размягчения – 110°C;
- температура эксплуатации – -30+102°C;
- твердость (по Роквеллу) – R70...R90;
- модуль упругости при изгибе – 3,5 ГПа;
- плотность – 1,11 г/см³;
- минимальная толщина стенок – 1 мм;
- усадка при изготовлении изделий – 0,5...1,2%;
- влагопоглощение – 0,17%.

Продук очень хрупкий, требует осторожности при установке в принтер. Рекомендуется увеличивать толщину стенок детали, чтобы при постобработке не протереть их насквозь.

Плюсы:

- фактура напечатанного изделия напоминает керамику;
- легко шкурится;
- достаточно термостоек для кипятка и, как правило, безопасен (зависит от конкретной марки) – может контактировать с продуктами, использоваться для изготовления посуды, контактирующей с пищей.

Минусы:

хрупкий, не рекомендуется к печати на принтерах с сильными изгибом подающего филамент тракта.

В основном используется для печати декоративных изделий, которым необходимо придать фактуру и внешний вид керамики.

Carbon Fiber

Carbon Fiber (с углеродным волокном) – инженерный пластик, рассчитанный на высокие нагрузки. В качестве основы обычно используется нейлон с добавлением углеродных волокон. Может также

изготавливаются на основе PLA, ABS, PETG, PC. Характеристики зависят от свойств материала основы.

Параметры печати:

зависят от материала основы и степени наполнения углеродным волокном. Сильно меняются у разных производителей.

Технические характеристики:

зависят от материала основы и степени наполнения углеродным волокном. Сильно меняются у разных производителей.

Углеродные волокна придают повышенную прочность данному виду пластика, но при этом обладают высокой абразивностью. Крайне не рекомендуется печатать латунными соплами, сопло 0,3 мм растачивает до 0,5 примерно за полчаса печати. Поэтому для печати используют сопла из нержавеющей стали или с рубиновым наконечником. Используется для печати изделий, работающих с высокими механическими нагрузками.

Плюсы:

- очень прочный и упругий;
- позволяет получать легкие и прочные изделия;
- не требует высокого заполнения.

Минусы:

- очень абразивный, требуются сопла из нержавеющей стали или с рубиновым наконечником;
- сложность печати (зависит от материала-основы);
- стоимость (по сравнению с обычными бытовыми и высокотемпературными инженерными пластиками).

Может использоваться для печати прототипов и полнофункциональных образцов.

Wax (MOLDLAY)

Wax (MOLDLAY) (литьевой воск) – используется для изготовления выжигаемых моделей для литья. Модель заливается гипсом, после чего выжигается/выплавляется из него, получается форма для литья металла.

Характеризуется низкой температурой плавления и малой зольностью

Параметры печати:

- температура экструзии – 90...110°C;
- температура стола – 40...60°C;
- обдув – 0...100%;
- адгезия слоев – хорошая;
- адгезия к столу – хорошая.

Технические характеристики:

- температура каплепадения – 95°C;
- зольность – 0,01%;
- плотность – 0,98 г/см³;
- точность печати – ± 1%;
- усадка при изготовлении изделий – 0,5-0,8%;
- влагопоглощение – отсутствует.

Модели, напечатанные воском, можно обрабатывать в пламени горелки и сглаживать растворителем, они легко поддаются механической обработке, что уменьшает требуемую обработку конечной металлической отливки.

Широко используется в ювелирной промышленности и при изготовлении прототипов.

Плюсы:

- высокая точность печати;
- простота печати;
- низкая зольность.

Минусы:

специфичность применения.

ASA

ASA (Акрилонитрил-стирол-акрилат) – атмосферостойкий пластик. Аналог ABS, но более стойкий к ультрафиолетовому излучению. Не желтеет на открытом воздухе.

Параметры печати:

- температура экструзии – 220...270°C;
- температура стола – 90...110°C;
- обдув – нежелателен;
- адгезия слоев – средняя;
- адгезия к столу – средняя.

Технические характеристики

- температура плавления – 215...220°C;
- температура размягчения – 100°C;
- температура эксплуатации – -40+90°C;
- твёрдость (по Роквеллу) – R112;
- относительное удлинение при разрыве – 15%;
- прочность на изгиб – 76.1 МПа;
- прочность на разрыв – 36.5 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 1.12 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 1.35 ГПа;
- температура стеклования – 50...70°C;
- плотность – 1,08 г/см³;
- точность печати – ± 3%;
- усадка при изготовлении изделий – 1%;
- влагопоглощение – 3%.

Плюсы:

- стойкость к ультрафиолету позволяет использовать его для изготовления изделий, эксплуатирующихся под воздействием прямого солнечного освещения;
- хорошее сочетание прочности и упругости позволяют использовать его для изготовления механических изделий, рассчитанных на долгий срок эксплуатации;
- широкий диапазон рабочих температур позволяет эксплуатировать изделия из него в технических целях;
- простота механической обработки, в комплексе с химическим сглаживанием поверхности недорогими растворителями типа ацетона, позволяют делать декоративные изделия или корпуса с высоким качеством поверхности.

Минусы:

- не любит сквозняков при печати, что ограничивает применение дешёвых принтеров с открытым корпусом;
- из-за относительно высокой усадки склонен к деламинации (расслоению), требует наличия подогреваемого стола, без него возникают проблемы с прилипанием к столу первого слоя;

- в процессе печати может образовываться неприятных запахов, печатать лучше в проветриваемом помещении или оснащать принтер специальной системой вытяжной вентиляции.

Отличительные свойства:

- прочный атмосферостойкий пластик промышленного уровня;
- наилучшая стойкость к УФ-излучению в классе FDM;
- хорошие прочностные характеристики и теплостойкость;
- высокое эстетическое качество поверхности деталей;
- размерная стабильность;
- множество цветов.

Применение:

- детали уличной инфраструктуры;
- наружное освещение и охрана;
- функциональные прототипы;
- детали и аксессуары автомобилей;
- конечные детали и запчасти.

PP

PP (полипропилен) – широко распространенный пластик, применяемый в производстве упаковочных материалов, посуды, шприцов, труб. Преимущества данного материала – нетоксичность, высокая химическая стойкость, устойчивость к влаге и износу.

При всех своих достоинствах, данный материал не сильно распространен в 3D-печати. Причина – высокая усадка и сложность печати.

Параметры печати:

- температура экструзии – 220...250°C;
- температура стола – 100...120°C;
- обдув – нежелателен;
- адгезия слоев – средняя;
- адгезия к столу – низкая.

Технические характеристики

- температура плавления – 160...170°C;
- температура размягчения – 95°C;

- температура эксплуатации – 0+80°C;
- твердость (по Шору) – D67;
- относительное удлинение при разрыве – 200%;
- прочность на изгиб – 40 МПа;
- прочность на разрыв – 30 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 1,7 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 1,5 ГПа;
- температура стеклования – 40...60°C;
- плотность – 0,92 г/см³;
- точность печати – ± 5%;
- усадка при изготовлении изделий – 2,4%;
- влагопоглощение – 0,03%.

Может использоваться для печати изделий, требующих химической стойкости или контактирующих с пищевыми продуктами. Не рекомендуется к эксплуатации на морозе.

Плюсы:

- химическая инертность позволяет применять его для изделий, имеющих непосредственный контакт с пищевыми продуктами или в медицине;
- высокая прочность позволяет применять его для изделий, несущих конструкционные нагрузки.

Минусы:

- сложность печати – требует наличия термокамеры;
- высокая усадка;
- низкая стойкость к отрицательным температурам.

РОМ

РОМ (полиацеталь) – инженерный пластик, по своим физико-механическим свойствам превосходящий нейлон.

Очень сложен в печати, требует контроля не только температуры сопла, но и температуры в камере принтера.

Параметры печати:

- температура экструзии – 220...250°C;
- температура стола – 110...130°C;
- обдув – нежелателен;
- адгезия слоев – средняя;
- адгезия к столу – низкая.

Технические характеристики

- температура плавления – 175...180°C;
- температура размягчения – 135°C;
- температура эксплуатации – -50+100°C;
- твердость (по Шору) – D82;
- относительное удлинение при разрыве – 40%;
- прочность на изгиб – 95 МПа;
- прочность на разрыв – 60 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 2 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 2,6 ГПа;
- плотность – 1,39 г/см³;
- точность печати – ± 4%;
- усадка при изготовлении изделий – 2%;
- влагопоглощение – 0,8%.

Обладает низким трением, поэтому хорошо подходит для печати шестеренок и деталей подшипников.

Морозоустойчив, но высокая усадка при печати сводит на нет все преимущества. Сложно подобрать клей для хорошей адгезии к столу принтера.

Плюсы:

- высокая прочность, позволяющая печатать нагруженные в механическом плане изделия;
- высокое скольжение, позволяющее применять его в кинематических передачах;
- морозоустойчивость, позволяющая эксплуатировать его при отрицательных температурах.

Минусы:

- очень высокая усадка, требующая термокамеры при печати;
- низкая адгезия к поверхности стола принтера;
- сложность печати.

PEEK

PEEK (полиэфирэфиркетон) – современный полукристаллический материал, обеспечивает уникальную комбинацию механической,

химической и тепловой стойкости. Тугоплавкость приводит к невозможности печати на большинстве бытовых 3D-принтеров.

Очень прочный и высокотемпературный пластик. В бытовой печати практически не применяется, из-за высоких требований к температурам сопла и стола принтера. Требуется наличие термокамеры при печати.

Параметры печати:

- температура экструзии – 360...410°C;
- температура стола – 120...180°C;
- обдув – нежелателен;
- адгезия слоев – хорошая;
- адгезия к столу – плохая.

Технические характеристики:

- температура плавления – 343°C;
- температура размягчения – 152°C;
- температура эксплуатации – -196+150°C;
- твердость (по Шору) – D85;
- относительное удлинение при разрыве – 45%;
- прочность на изгиб – 165 МПа;
- прочность на разрыв – 100 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 2,3 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 4,1 ГПа;
- температура стеклования – 143°C;
- плотность – 1,3 г/см³;
- минимальная толщина стенок – 1 мм;
- точность печати – ± 3%;
- усадка при изготовлении изделий – 1%;
- влагопоглощение – 0,4%.

Плюсы:

- высокая прочность, позволяющая использовать его для механически нагруженных изделий;
- стойкость к истиранию, позволяющая использовать его в кинематических передачах;
- очень высокая для пластика термостойкость;
- химическая стойкость.

Минусы:

- очень высокая температура печати;
- требование обязательного наличия термокамеры в принтере;
- высокая стоимость.

Применение:

- аэрокосмические компоненты;
- ответственные детали систем транспортировки;
- детали, стойкие к ракетному топливу, маслам, гидравлическим жидкостям;
- специальная тара и упаковка;
- корпуса, воздуховоды, патрубки;
- термостойкие износостойкие детали;
- функциональные прототипы изделий, испытывающих высокие физико-механические нагрузки и работающих в условиях повышенных температур.

6.3. Технические характеристики и параметры специальных материалов

Wood

Wood или Woodfill (древеснонаполненный) – это PLA, в который добавляют очень мелкие древесные опилки. В результате изготовленные с применением данного пластика изделия получают фактуру древесины.

Используется в декоративных целях. Из него можно печатать изделия, которые будут хорошо смотреться на полке или на столе: чашки, фигурки, сувениры. Также можно изготавливать архитектурные макеты.

Параметры печати:

- температура экструзии – 190...230°C;
- температура стола – 20...60°C;
- обдув – желателен;
- межслойная адгезия – средняя;
- адгезия к столу – хорошая.

Технические характеристики:

зависят от степени наполнения древесными волокнами.

По характеристикам почти идентичен обычному PLA, но – чем больше древесных волокон в него добавлено, тем меньше прочность и упругость конечных объектов.

Меняя температуру экструдера, можно изменять оттенки и текстуру получаемого изделия.

Плюсы:

- легкость печати;
- внешний вид и фактура максимально приближены к древесине;
- приятные тактильные ощущения.

Минусы:

- невозможность печати узкими соплами (забивается);
- чуть большая абразивность;
- прочность изделий снижена, по сравнению с классическим PLA.

Metal

Metal, bronzefill и т.д. (металлонаполненный) – пластик, аналогичный предыдущему, только в качестве наполнителей работают частицы бронзы, меди, латуни или алюминия, а в качестве базового пластика может использоваться не только PLA, но и ABS. Обычно в пластик добавляют до 50% металлического порошка, но существуют филаменты с долей металла до 85%.

Параметры печати:

зависят от материала основы, металла и степени наполнения. Сильно меняются у разных производителей.

Технические характеристики:

свойства конечного изделия зависят от того, какое сочетание пластика и металла было использовано в качестве базового при производстве филамента.

Данный вид пластика используется, в основном, для производства декоративных изделий. Небольшая постобработка позволяет дополнительно подчеркнуть металлические свойства пластика.

При печати необходимо учитывать два фактора:

во-первых – пластик абразивен и достаточно быстро стачивает латунные сопла,

во-вторых – у данных пластиков высокая плотность.

Плюсы:

- металлический блеск готовых изделий;
- постобработка позволяет придать фактуру литого изделия.

Минусы:

повышенная абразивность – для печати лучше использовать сопла из нержавеющей стали

bioFila

bioFila (биоразлагаемый) – основное достоинство данного филамента - это не прочность или уникальные физические свойства, а отсутствие вреда экологии.

Параметры печати:

зависят от производителя пластика.

Технические характеристики:

зависят от производителя пластика.

При массовом изготовлении прототипов много пластика уходит на неудачные модели, которые приходится выбрасывать. Использование данного пластика позволяет снизить экологический ущерб при изготовлении таких моделей.

Пластик используется, когда не нужна особая прочность или гибкость конечного изделия, но планируется печать большого количества прототипов.

Плюсы:

- экологичность;
- простота печати.

Минусы:

низкая прочность.

Как уже отмечалось выше, PLA является биоразлагаемым пластиком. Помимо этого выпускаются марки: twoBEars' bioFila и Biome3D от Biome Bioplastics.

Conductive

Conductive (электропроводный) – это пластик, который можно использовать в качестве токопроводящих элементов в электрических цепях.

В основе лежит PLA или ABS, в состав которых введены электропроводящие частицы. Поэтому свойства электропроводящего пла-

стика зависят от исходного материала. Сопротивление обычно достаточно высоко и составляет сотни Ом на сантиметр длины.

Параметры печати:

зависят от материала – основы, наполнителя и степени наполнения. Сильно меняются у разных производителей.

Технические характеристики:

зависят от материала – основы, наполнителя и степени наполнения. Сильно меняются у разных производителей.

Может использоваться в небольших поделках, в которых не нужны большие токи или высокое сопротивление может быть нивелировано большой площадью напечатанного проводника. Идеален для учебных пособий.

Плюсы:

- электропроводность;
- при использовании двухэкструдерных принтеров можно печатать проводники сразу в готовом изделии.

Минусы:

низкая электропроводность – для пропускания небольшого тока требуется печатать проводников с большим сечением.

Преимущество данного пластика раскрывается на двухэкструдерном принтере. Если в один экструдер заправить обычный пластик, а в другой – токопроводящий, то можно получить деталь с размещенными в ней электрическими проводниками.

Glow-in-the-Dark

Glow-in-the-Dark (фосфоресцирующий пластик) – еще один вид декоративного филамента, в основе которого может лежать PLA, ABS или PETG. К базовому пластику добавляется пигмент, способный накапливать световую энергию и излучать её в темноте. Свойства данного филамента зависят от базового пластика.

Параметры печати:

зависят от материала – основы, наполнителя и степени наполнения. Сильно меняются у разных производителей.

Технические характеристики:

зависят от материала – основы, наполнителя и степени наполнения. Сильно меняются у разных производителей.

Хорошо подходит для печати декоративных изделий и игрушек, от которых требуется недолгое и неярко свечение.

Плюсы:

светится в темноте.

Минусы:

зависят от пластика-основы.

Magnetic

Magnetic (Магнитный) – в основе данного пластика все те же PLA или ABS, только на этот раз в качестве присадки используется ферромагнетик. За счет этого пластик приобретает способность притягиваться к магнитам.

Параметры печати:

зависят от материала – основы, магнитной добавки и степени наполнения. Разнятся у разных производителей.

Технические характеристики:

зависят от материала – основы, магнитной добавки и степени наполнения. Разнятся у разных производителей.

Пластик отличается высокая плотность, как и у металлонаполненных пластиков, а также высокая абразивность. Для печати данным пластиком латунное сопло лучше поменять на стальное. Магнитные свойства невысоки, поэтому применять его лучше в декоративных изделиях.

Плюсы:

способность взаимодействовать с магнитами.

Минусы:

слабое взаимодействие с магнитами.

Color-Changing

Color-Changing (Изменяющий цвет) – еще один композит PLA или ABS, но в данном случае – способный изменять цвет при изменении температуры.

Используется при печати декоративных изделий.

Параметры печати:

зависят от материала основы. Сильно меняются у разных производителей.

Технические характеристики:

зависят от материала основы. Сильно меняются у разных производителей.

Плюсы:

способность менять цвет при изменении температуры.

Минусы:

зависят от пластика-основы.

PMMA

PMMA (полиметилметакрилат, более известный как оргстекло) – прочный влагоустойчивый материал, устойчивый к воздействию солнечного света. Прозрачный.

Изделия из него достаточно пластичны и легко поддаются склейке. В традиционной 3D-печати методом FDM используется достаточно редко.

Параметры печати:

- температура экструзии – 245...255°C;
- температура стола – 100...120°C;
- обдув – нежелателен.

Технические характеристики

- температура плавления – 160°C;
- температура размягчения – 105°C;
- температура эксплуатации – -60+100°C;
- твердость (по Роквеллу) – R70...R90;
- относительное удлинение при разрыве – 4%;
- прочность на изгиб – 90 МПа;
- прочность на разрыв – 70 МПа;
- модуль упругости при растяжении – 3 ГПа;
- модуль упругости при изгибе – 2,1 ГПа;
- температура стеклования – 50...70°C;
- плотность – 1,19 г/см³;
- точность печати – ± 1%;
- усадка при изготовлении изделий – 0,4%;
- влагопоглощение – 0,2%.

Плюсы:

- прозрачность;
- стойкость к ультрафиолетовому излучению;
- легкость склейки;
- простота постобработки.

Минусы:

- плохо хранится в виде катушек, так-как постоянное механическое натяжение приводит к постепенному разрушению материала;
- во избежание образования пузырьков разрешение печати должно быть очень высоким, практически недоступным для домашних принтеров;
- быстрое застывание требует наличия термокамеры и высокой скорости печати;
- высокая скорость печати снижает разрешение, что приводит к увеличению проблемы пузырьков.

Вопросы для самопроверки

1. Какие изделия в мехатронике могут быть получены методом 3D-печати?
2. Какие стандартные материалы для 3D-печати вы знаете?
3. Каково назначение профессиональных материалов для 3D-печати?
4. В чём проявляется особенность применения специальных материалов для 3D-печати?
5. Какие пластики могут применяться для изготовления корпусных деталей в мехатронике?
6. Из какого материала возможно изготовление функциональных прототипов?
7. Какой материал используется для печати трущихся узлов кинематических пар редукторов мехатронных модулей?
8. Какой материал можно использовать в технических изделиях в условиях повышенных температур?
9. Какие материалы для 3D-печати являются биологически совместимыми?
10. Какие материалы применимы для печати изделий, работающих с высокими механическими нагрузками?
11. Какой материал можно использовать для изделий, несущих конструкционные нагрузки?

Глава 7. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

7.1. Магнитные свойства веществ

Магнитными веществами или магнетиками называются вещества, обладающие магнитными свойствами. Под магнитными свойствами понимается способность вещества приобретать магнитный момент, т.е. намагничиваться при воздействии на него магнитного поля. В этом смысле все вещества в природе являются в той или иной степени магнетиками, так как при воздействии магнитного поля приобретают определенный магнитный момент, представляющий собой сумму элементарных магнитных моментов атомов данного вещества. Проявление магнетизма в веществе обусловлено процессами движения электронов, которые образуют круговые токи, обладающие магнитными моментами. Магнитный момент электрона складывается из орбитального магнитного момента (вследствие движения электрона вокруг ядра) и спинового момента (вследствие вращения электрона вокруг собственной оси). Элементарные магнитные моменты могут быть наведены внешним магнитным полем, либо существовать в веществе до наложения магнитного поля. В последнем случае магнитное поле вызывает их преимущественную ориентацию.

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает некоторый магнитный момент M . Магнитный момент единицы объема вещества называют намагниченностью J_M :

$$J_M = dM/dV, \text{ А/м.}$$

Намагниченность является векторной величиной, в изотропных телах она направлена либо параллельно, либо антипараллельно напряженности магнитного поля H .

Намагниченность связана с напряженностью магнитного поля с соотношением

$$J_M = k_M \times H,$$

где k_M – магнитная восприимчивость – безразмерная величина, характеризующая способность вещества намагничиваться в магнитном поле.

По поведению в магнитном поле все материалы делятся на диа-

магнетики и парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики (рисунок 7.1).

Диамагнетики характеризуются очень малой отрицательной величиной магнитной восприимчивости ($k_m = 10^{-6} \dots 10^{-7}$), которая в большинстве случаев не зависит от температуры и напряженности поля. Индуцированный магнитный момент направлен против направления поля. Диамагнетики выталкиваются из неоднородного магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.), большинство полупроводников (кремний, германий, арсенид гелия), органические соединения, неорганические стекла и др., а также все вещества в сверхпроводящем состоянии.

Парамагнетики характеризуются малой положительной величиной магнитной восприимчивости ($k_m = 10^{-3} \dots 10^{-6}$), не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. В парамагнетиках атомы обладают собственным магнитным моментом даже в отсутствие внешнего магнитного поля, однако из-за теплового движения эти магнитные моменты распределены хаотично так, что намагниченность вещества в целом равна нулю. Внешнее магнитное поле вызывает преимущественную ориентацию магнитных моментов атомов в одном направлении. Тепловая энергия противодействует созданию магнитной упорядоченности. Поэтому магнитная восприимчивость сильно зависит от температуры.

Парамагнетики втягиваются в неоднородное магнитное поле. К парамагнетикам относятся: кислород, окись азота, соли железа, никеля, кобальта, щелочные металлы, алюминий, платина.

Ферромагнетики обладают большими положительными значениями k_m (до сотен тысяч и миллионов) и сложной нелинейной зависимостью k_m от температуры и внешнего поля. Характерными особенностями ферромагнетиков являются способность сильно намагничиваться при обычных температурах в слабых полях и переход в парамагнитное состояние выше определенной температуры, так называемой точкой Кюри.

Антиферромагнетики характеризуются небольшой величиной магнитной восприимчивости ($k_m = 10^{-3} \dots 10^{-5}$) и отличаются её особой температурной зависимостью. По мере повышения температуры, начиная от 0К, k_m растёт, достигая максимума при температуре, назы-

ваемой точкой Нееля, и далее начинает падать. В антиферромагнетиках атомы обладают одинаковыми магнитными моментами, которые направлены в противоположных направлениях и взаимно компенсируются. Антиферромагнетизм выражен у марганца, хрома.

Ферримагнетики характеризуются большой величиной магнитной восприимчивости ($k_M = 10^4 \dots 10^6$), точкой Кюри T_K , меньшей, по сравнению с ферромагнетиками, величиной намагниченности насыщения. В отсутствие внешнего магнитного поля ферримагнетики имеют антипараллельное расположение магнитных моментов соседних атомов или ионов, но при этом суммарный магнитный момент не равен нулю. Ферримагнетизм наблюдается у ферритов.

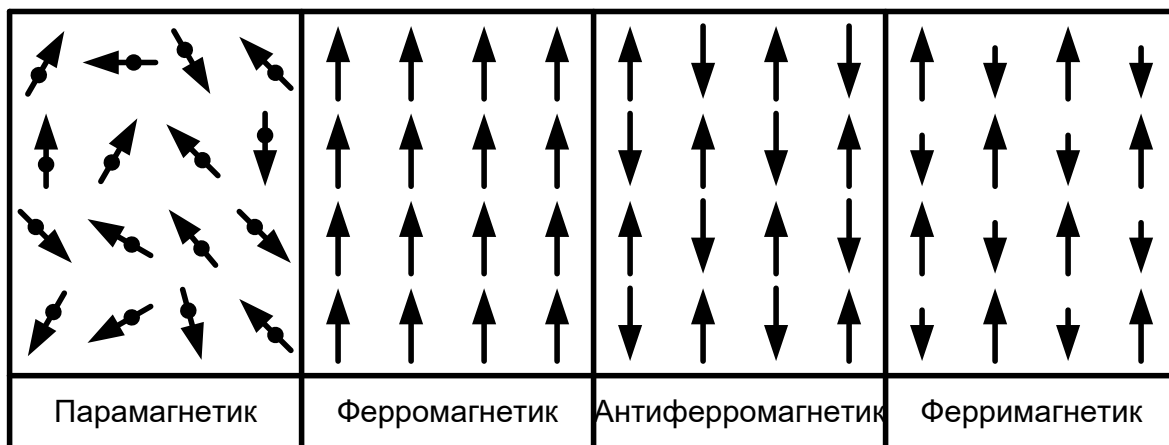


Рис. 7.1. Ориентация магнитных моментов в материалах различной магнитной природы:

- парамагнетик – векторы магнитных моментов разориентированы;
- ферромагнетик – параллельное расположение спиновых моментов;
- антиферромагнетик – магнитные моменты соседних атомов ориентированы антипараллельно и скомпенсированы;
- ферримагнетик – магнитные моменты атомов антипараллельны и некомпенсированы.

Явления намагничивания и перемагничивания

В монокристаллах ферромагнитных веществ существуют направления *лёгкого* и *трудного* намагничивания. В отсутствие внешнего поля магнитные моменты доменов самопроизвольно ориентируются вдоль одной из осей легкого намагничивания. Энергия, которую необходимо затратить для намагничивания монокристаллического

ского образца до насыщения вдоль одной из осей легкого намагничивания, значительно меньше, чем вдоль оси трудного намагничивания. При наличии внешнего поля самым энергетически выгодным направлением является ось легкого намагничивания, составляющая наименьший угол с направлением внешнего поля.

Все магнитные материалы делятся на две основные группы: магнитно-мягкие и магнитно-твёрдые.

Магнитно-мягкие материалы отличаются малыми потерями на гистерезис (магнитный гистерезис – отставание намагниченности тела от внешнего намагничивающего поля). Они имеют относительно большие значения магнитной проницаемости, малую коэрцитивную силу и относительно большую индукцию насыщения. Данные материалы применяются для изготовления магнитопроводов трансформаторов, электрических машин и аппаратов, магнитных экранов и прочих устройств, где требуется намагничивание с малыми потерями энергии.

Магнитно-твёрдые материалы отличаются большими потерями на гистерезис, т. е. обладают большой коэрцитивной силой и большой остаточной индукцией. Эти материалы, будучи намагниченными, могут длительное время сохранять полученную магнитную энергию, т. е. становятся источниками постоянного магнитного поля. Магнитно-твёрдые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов.

Согласно своей основе, магнитные материалы подразделяются на металлические, неметаллические и магнитодиэлектрики.

К металлическим магнитно-мягким материалам относятся: чистое (электролитическое) железо, листовая электротехническая сталь, железо-армко, пермаллой (железо-никелевые сплавы) и др.

К металлическим магнитно-твёрдым материалам относятся: легированные стали, специальные сплавы на основе железа, алюминия и никеля и легирующих компонентов (кобальт, кремний и пр.).

К неметаллическим магнитным материалам относятся ферриты. Это материалы, получаемые из порошкообразной смеси окислов некоторых металлов и окиси железа. Отпрессованные ферритовые изделия (сердечники, кольца и др.) подвергают обжигу при температуре 1300...1500°C. Ферриты бывают магнитно-мягкие и магнитно-твёрдые.

Магнитодиэлектрики – это композиционные материалы, состоящие из 70...80% порошкообразного магнитного материала и 30...20% органического высокополимерного диэлектрика. Ферриты и магнитодиэлектрики отличаются от металлических магнитных материалов большими значениями удельного объемного сопротивления, что резко снижает потери на вихревые токи. Это позволяет использовать эти материалы в технике высоких частот. Кроме этого, ферриты обладают стабильностью своих магнитных характеристик в широком диапазоне частот.

7.2. Магнитно-мягкие материалы

Основные характеристики низкочастотных магнитомягких материалов приведены в таблице 7.1.

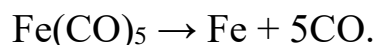
Таблица 7.1 – Основные характеристики низкочастотных магнитомягких материалов

Материал	$\mu_{нач}$	μ_{max}	H_c , А/м	B_m , Тл	ρ , мкОм·м
Техническое железо	400	4000	50...100	2,2	0,1
Электролитическое железо	600	15000	30	2,2	0,1
Карбонильное железо	3000	20000	6,4	2,2	0,1
Монокристалл чистого железа	20000	$1,4 \cdot 10^6$	0,8	-	0,1
Электротехническая сталь	200...600	3000...8000	10...65	2,0	0,25...0,6
Низконикелевые пермаллои	4000	$(15...60) \cdot 10^3$	5...30	1,0...1,6	0,45...0,9
Высоконикелевые пермаллои	$7 \cdot 10^3 ... 10^5$	$10^4 ... 3 \cdot 10^5$	0,65...5	0,65...1,05	0,16...0,85
Супермаллой: 79НМ: 79%Ni, 5%Mo, 15%Fe, 0,5%Mn	100000	$1,5 \cdot 10^6$	0,3	0,8	0,6
Альсифер: 5,6%Al, 9,5%Si Fe ост.	35400	117000	1,8		0,8

Железо является основным компонентом большинства магнитных материалов. Из простых магнитомягких материалов железо обладает наибольшей индукцией насыщения. Магнитные свойства железа существенно зависят от содержания примесей. Наибольшей магнитной проницаемостью обладает электролитическое и карбонильное железо, содержащее не более 0,05% примесей. В техническом железе примесей до 0,1%.

Электролитическое железо получают путем электролиза сернокислого или хлористого железа.

Карбонильное железо получают в виде тонкого порошка путем термического разложения пентакарбонила железа:



Электротехническая листовая сталь

Электротехническая сталь является магнитно-мягким материалом. Для улучшения магнитных характеристик в неё добавляют кремний, который повышает величину удельного сопротивления стали, что приводит к уменьшению потерь на вихревые токи. Различают нелегированную и легированную электротехническую сталь. В нелегированных электротехнических сталях $\text{Si} < 0,4\%$.

В легированных электротехнических сталях Si до 5%. Такая сталь выпускается в виде листов толщиной 0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 1,0 мм, шириной от 240 до 1000 мм и длиной от 720 до 2000 мм.

Кремнистая сталь обладает магнитной анизотропией подобно чистому железу: направление легкого намагничивания (100), а трудного – (111).

Свойства стали значительно улучшаются за счёт образования магнитной текстуры при холодной прокатке и последующего отжига в водороде. При прокатке получают преимущественную ориентацию зерен (текстуру деформации), а при последующем отжиге (900...1000°C) в процессе рекристаллизации – крупнозернистую структуру с ориентировкой зёрен осями легкого намагничивания в направлении прокатки. Получается так называемая ребровая текстура.

Текстурованная сталь анизотропна. Вдоль направления прокатки у стали более высокая магнитная проницаемость и меньшие потери на гистерезис. Применение текстурованной стали позволяет сни-

зять массу и габариты сердечников силовых трансформаторов на 20...25%, а радиотрансформаторов – до 40%.

Пермаллои

Данные материалы представляют собой железо-никелевые сплавы с содержанием никеля от 36 до 80%. Различают низконикелевые (Ni до 50%) и высоконикелевые пермаллои. Для улучшения тех или иных характеристик пермаллоев в их состав добавляют хром, молибден, медь и др. Кремний и хром повышают ρ . Молибден повышает μ , ρ и снижает чувствительность к деформациям. Медь способствует постоянству μ при изменении температуры. Маркировка пермаллоев: *45Н*, *50Н*, *42НС*, *50НХС*, *76НХС*, *79НМ*, *50НП*, *65НП* и т.д. Цифры показывают содержание никеля в процентах. Буквенные обозначения: *Н* – никель, *Х* – хром (1...3%), *С* – кремний (1...2%), *Д* – медь (5...14%), *М* – молибден (3...5%); *П* - с прямоугольной петлей гистерезиса.

Характерными особенностями всех пермаллоев являются их лёгкая намагничиваемость в слабых магнитных полях и повышенные значения удельного электрического сопротивления. Магнитные свойства пермаллоев чрезвычайно чувствительны к напряжениям и деформации. Поэтому термообработка пермаллоев проводится с особой тщательностью и направлена на получение равновесной крупнозернистой структуры типа гомогенного твердого раствора. Кроме того, в электротехнических устройствах предусматривают специальные меры защиты пермаллоевых сердечников от механических нагрузок. Наивысшей магнитной проницаемостью обладает супермаллой *79НМ*, подвергнутый специальной термоманитной обработке. Она заключается в нагреве до 1100...1200°C в вакууме или среде водорода, выдержке в течение 3...5 часов для снятия магнитострикционного эффекта и медленном охлаждении со скоростью 20...50°C/ч в слабомагнитном поле.

Пермаллои – пластичные сплавы, легко прокатываемые в листы и ленты толщиной до 0,02 мм и менее. Благодаря повышенным значениям удельного сопротивления и стабильности магнитных характеристик пермаллои могут применяться до частот 200...500 кГц.

Пермаллои широко используются в электронных блоках аналоговой и цифровой аппаратуры мехатронных и робототехнических си-

стем для изготовления малогабаритных трансформаторов различного типа и назначения, реле, магнитных усилителей, бесконтактных переключателей, магнитных экранов и т.д.

Альсифер

Альсифер – это тройной сплав системы Al-Si-Fe. Оптимальный состав альсифера: 5,6% Al, 9,5% Si, остальное – Fe. По своим магнитным свойствам альсифер не уступает высоконикелевым пермаллоям. Альсифер отличается высокой твердостью и хрупкостью. Изделия из альсифера (магнитные экраны, корпуса приборов) изготавливают методом литья с толщиной стенок 2...3 мм. Альсифер, размолотый в виде порошка, наряду с карбонильным железом, используется для изготовления высокочастотных прессованных сердечников.

7.3. Магнитно-твёрдые материалы

Магнитно-твёрдые материалы обладают большими значениями коэрцитивной силы и большой остаточной индукцией, а следовательно, большими значениями магнитной энергии. К магнитно-твердым материалам относятся:

- сплавы, закаливаемые на мартенсит (стали, легированные хромом, вольфрамом или кобальтом);
- железо-никель-алюминиевые нековкие сплавы дисперсионного твердения (альни, альнико и др.);
- ковкие сплавы на основе железа, кобальта и ванадия (виккалой) или на основе железа, кобальта, молибдена (комоль);
- сплавы с очень большой коэрцитивной силой на основе благородных металлов (платина-железо; серебро-марганец-алюминий и др.);
- металлокерамические нековкие материалы, получаемые прессованием порошкообразных компонентов с последующим обжигом отпрессованных изделий (магнитов);
- магнитно-твердые ферриты;
- металлопластические нековкие материалы, получаемые из прессовочных порошков, состоящих из частиц магнитно-твердого материала и связующего вещества (синтетическая смола);

– магнитоэластические материалы (магнитоэласты), состоящие из порошка магнито-твёрдого материала и эластичного связующего (каучук, резина).

Остаточная индукция у металлопластических и магнитоэластических магнитов на 20...30% меньше по сравнению с литыми магнитами из тех же магнито-твёрдых материалов (альни, альнико и др.).

Чтобы получить высокую коэрцитивную силу H_c , необходимо затруднить процесс размагничивания. Наиболее эффективный способ – создать в сплаве после термообработки структуру с однодоменными неравноосными удлиненными частицами ($l_1/l_2 \geq 20$) сильномагнитной фазы в слабомагнитной матрице. В таких сплавах размагничивание путем вращения векторов намагниченности ферромагнитных включений затруднено.

Магнитные цепи с постоянными магнитами должны быть разомкнутыми, т.е. иметь рабочий воздушный зазор. Магнитный поток в зазоре возникает после предварительного намагничивания материала в сильном магнитном поле.

Литые высококоэрцитивные сплавы – это системы Fe-Ni-Al-Co (Ni – до 35%, Al – до 16%, Co – до 40%), модифицированные различными добавками (4...8% Cu, 5...8% Ti). Они используются во многих приборах и имеют хорошее сочетание свойств и стоимости. Высококоэрцитивное состояние этих сплавов обусловлено дисперсионным распадом при термической обработке. Их подвергают высокотемпературной закалке с температурой 1200...1280°C для получения пересыщенного твёрдого раствора с последующим отпуском при температуре 600...650°C. В результате твердый раствор претерпевает дисперсионный распад на две фазы: одна из фаз по составу близка к чистому железу и является сильномагнитной; её выделения имеют форму пластинок или стержней однодоменной толщины, другая фаза, состоящая из Ni и Al – слабомагнитная. Таким образом, получается структура из слабомагнитной матрицы и однодоменных магнитных включений. Намагничивание такой структуры происходит за счёт поворота магнитных моментов доменов. Легирующие добавки Cu, Ti, Nb не только улучшают магнитные свойства, но и обеспечивают лучшую повторяемость характеристик. Магнитные свойства сплавов значительно улучшаются, если создать кристаллическую и магнитную текстуру.

Кристаллическая текстура создаётся кристаллизацией сплава, залитого в форму, с направленным теплоотводом в магнитном поле. При этом образуется т.н. столбчатая структура, длина таких кристаллов достигает 300 мкм. Ось кристалла совпадает с направлением легкого намагничивания.

Магнитная текстура создается термомагнитной обработкой – охлаждением сплава при термообработке в сильном магнитном поле с напряженностью $H > 1200$ кА/м. При этом достигается упорядоченное расположение пластинчатых выделений сильномагнитной фазы, которые своими осями легкого намагничивания ориентируются в направлении поля. Текстурированный материал магнитно анизотропен. Для создания магнитной текстуры содержание кобальта в сплаве должно быть не менее 24%.

Создание кристаллической и магнитной текстур приводит к улучшению всех характеристик литых сплавов.

Очень высокими магнитными свойствами обладают монокристаллические материалы *ЮНДК35Т5АА*, *ЮНДК40Т8АА* (символ *АА* означает монокристаллическую структуру).

К недостаткам литых сплавов относятся их повышенная хрупкость и высокая твердость, что исключает все виды обработки кроме шлифования. Этим недостаткам лишены порошковые сплавы системы Fe-Ni-Al.

Магниты из порошков получают путем спекания порошков исходных металлов Fe, Ni, Al при 1300°C в атмосфере аргона. Порошки используют мелкодисперсные и желательно с неравноосными частицами. После прессования проводится термообработка такая же, как для литых сплавов. Из порошков изготавливают мелкие и точные по размеру магниты. По магнитным свойствам они уступают литым.

Деформируемые магнитотвёрдые сплавы – сплавы на основе Fe, Co, Cr, Cu. Хорошие магнитные свойства получают после термообработки, состоящей из закалки и старения, в результате образуются мелкодисперсные ферромагнитные фазы в слабомагнитной матрице. Сплавы, пластически деформируются и обладают высокими в отношении механической обработки свойствами. Они хорошо штампуются, режутся ножницами, обрабатываются на металлорежущих стан-

ках. Из сплавов можно изготовить ленты, пластины, листы, тонкую проволоку. В отдельных случаях (при изготовлении мелких магнитов сложной конфигурации) целесообразно применение металлокерамической технологии. Марок сплавов, пластически деформируются много, и физические процессы, благодаря которым они имеют высокие магнитные свойства, разнообразны. Наиболее распространенные сплавы: *кунифе* (Cu-Ni-Fe) и *викалой* (Co-V). Сплавы кунифе анизотропные, намагничиваются в направлении прокатки, часто применяются в виде проволоки малых толщин, а также штамповки. Викалой применяют для изготовления мельчайших магнитов сложной или ажурной конфигурации и как высокопрочные магнитные ленты или магнитные проволоки.

Магнитотвёрдые сплавы на основе редкоземельных металлов весьма перспективны. Редкоземельные металлы образуют с металлами переходных групп бинарные соединения, из которых наибольший интерес представляют соединения типа RCO_5 и R_2Co_{17} , где R – редкоземельный элемент. Указанные соединения имеют гексагональную структуру. Им присуща сильная кристаллографическая магнитная анизотропия, высокая точка Кюри. Константа анизотропии K на два порядка выше, чем у железа. Из редкоземельных металлов используют самарий (Sm), празеодим (Pr), иттрий (Y), неодим (Nd). Технология изготовления магнитов сложная, но это единственный путь достижения исключительно высоких значений магнитной энергии и коэрцитивной силы. Магниты изготавливают из порошков тонкого размола, частицы которых – это монокристаллы с размерами, близкими к размерам домена ($\sim 3 \dots 10$ мкм). Прессование порошков проводится в магнитном поле для получения магнитной и кристаллической текстуры. Последующее спекание в вакууме или инертной среде, для повышения прочности, плотности, формирования структуры и магнитных свойств.

Например, технология производства порошка из сплава $Nd_2Fe_{14}B$ с использованием скоростной закалки расплава ($V_{охл} = 10^6$ °C/с) позволила получить частицы удлинённой формы до 200 мкм, повысить плотность и получить кристаллическую текстуру. Изготовленные по этой технологии магниты имеют: $\mathcal{E}_{max} = 400$ кДж/м³; $H_c = 800 \dots 1000$ кА/м; $B_r = 1,05 \dots 1,35$ Тл.

Неодим является самым мощным постоянным магнитным материалом, известным учёным в настоящее время. А также очень доступным, что делает его пригодным для множества вариантов использования. Химический состав неодимового магнита: $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, иначе говоря, два атома неодима, 14 атомов железа, и один атом бора. Поэтому иногда такие магниты называют «неодим-железо-бор». Это редкоземельные магниты, которые, в отличие от обычных ферритовых и керамических магнитов, содержат атомы из лантанидов или актинидов периодической таблицы. Магниты, изготовленные из неодима, являются самыми мощными редкоземельными магнитами. Их сила зачастую даётся в Гауссах (МегаГаусс-Эрстед, магнитная энергия), и в зависимости от формы и класса может достигать 13500 Гаусс и более, хотя обычно составляет 2000 Гаусс. Для сравнения, магниты из железа выдают примерно 50 Гаусс.

Неодимовые магниты сравнительно недороги, поэтому их используют достаточно часто и в промышленности, и в быту. Например, каждый жёсткий диск современного компьютера имеет небольшой неодимовый магнит в виде сегмента, который помогает направить магнитную головку для считывания данных.

Неодимовые магниты можно найти в дорогих акустических системах, в креплениях мебели, различной фурнитуре и т.д. Также магниты из неодима используют как сувенирные магниты. Единственным минусом неодимовых магнитов можно считать только то, что они теряют часть своей магнитной энергии при высоких эксплуатационных температурах. Это исключает использование неодимовых магнитов в электронике, где генерируется много тепловой энергии. Однако есть различные классы неодимовых магнитов, которые можно использовать при температурах до 200 градусов Цельсия.

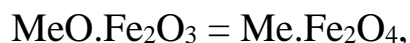
Главным же плюсом неодимовых магнитов является их **сила**: например, магнит размером с 5-ти рублевую монету (25 мм в диаметре и 5 мм в толщину) может выдержать вес почти 9 кг! Два соединенных между собой под неправильным углом магнита могут травмировать кожу до кровоподтеков. А магниты больших размеров (например, 50 на 30 мм) являются чрезвычайно опасными, поэтому необходимо соблюдать меры предосторожности при работе с ними.

Вторым, но не менее важным, достоинством неодимовых магнитов является **срок их службы**. И хоть технологии производства

неодимовых магнитов всего 30 лет, но уже сейчас можно говорить, что неодимовые магниты теряют всего порядка 1% своей магнитной энергии в течение 100 лет. Для сравнения, обычные ферритовые магниты служат не более 10 лет, после чего становятся просто куском железа.

Если ферритовые магниты чаще всего изготавливали в виде подковы, одна сторона которой выкрашена в красный, а вторая – в синий цвет для замыкания линий магнитного поля ферритового магнита, чтобы увеличить срок их службы, то неодимовым магнитам это не требуется, поэтому можно изготовить практически любую форму, а также сделать их «мультиполярными», т.е. имеющими несколько полюсов на поверхности.

Ферриты представляют собой неметаллические магнитные материалы, изготовленные из смеси специально подобранных окислов металлов с окисью железа. Название феррита определяется названием двухвалентного металла, окисел которого входит в состав феррита. Так, если в состав феррита входит окись цинка, то феррит называется цинковым; если в состав материала добавлена окись марганца – марганцевым. Наиболее широкое применение нашли ферриты со структурой природного минерала *шпинели*. Общая формула ферритов:



где Me - 2-валентный металл (Ni, Mg, Zn, Mn и др.).

Особенности ферритов:

- по электрическим свойствам ферриты являются диэлектриками или полупроводниками *p*-типа ($\rho = 0,1 \dots 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
- малые магнитные потери;
- радиопрозрачны;
- по механическим свойствам – это керамика, обладающая высокой твердостью и хрупкостью;
- для ферритов характерна сильная зависимость свойств от состава, дисперсности, режима спекания, температуры эксплуатации и др.

В технике находят применение сложные (смешанные) ферриты, имеющие более высокие значения магнитных характеристик и боль-

шее удельное сопротивление по сравнению с простыми ферритами. Примерами сложных ферритов являются никель-цинковый, марганцево-цинковый и др.

Все ферриты – вещества поликристаллического строения, получаемые из окислов металлов в результате спекания порошков различных окислов при температурах 1100...1300°C. Ферриты могут обрабатываться только абразивным инструментом. Они являются магнитными полупроводниками. Это позволяет применять их в магнитных полях высокой частоты, т. к. потери у них на вихревые токи незначительны.

Магнитотвёрдые ферриты получают спеканием окислов Fe_2O_3 , BaO , CoO . По магнитным свойствам они уступают литым сплавам, но как диэлектрики (по высокому удельному сопротивлению), могут использоваться в качестве постоянных магнитов в высокочастотных электромагнитных полях без тепловых потерь. Значение H_c у ферритов выше, чем у литых сплавов из-за наличия в структуре однодоменных неравноосных частиц оксида и большой константы кристаллографической анизотропии.

Сплавы на основе благородных металлов

К ним относятся сплавы серебра с марганцем и алюминием (*сильманал*) и сплавы платины с железом (77,8% Pt; 22,2% Fe) или платины с кобальтом (76,7% Pt; 23,3 % Co). Материалы этой группы, особенно те, которые содержат платину, очень дорогие, поэтому их применяют только для сверхминиатюрных магнитов массой в несколько миллиграммов. При изготовлении магнитов из всех сплавов этой группы широко используют металлокерамическую технологию.

Эластичные магниты. Как отмечалось, важнейшим недостатком основных групп материалов для постоянных магнитов – литых сплавов и магнитотвёрдых ферритов – является их плохие механические свойства (высокие твердость и хрупкость). Применение же сплавов, пластически деформируются ограничено их высокой стоимостью. Магниты на резиновой основе могут быть любой формы, что позволяет технология резины – в виде шнуров, длинных полос, листов и т.п. Такой материал легко режется ножницами, штампуется, сгибается, скручивается.

Эластичные магниты изготавливаются из резины и мелкого порошка магнитотвердых материалов (наполнитель). В качестве наполнителя чаще всего используют феррит бария.

Материалы для магнитных лент и магнитных дисков. Под магнитными лентами (дисками) понимают носители магнитной записи компьютерной информации. Наибольшее распространение имеют ленты и диски на пластмассовой основе с порошковым рабочим слоем. Основное назначение носителя магнитной записи состоит в создании на поверхности воспроизводящей магнитной головки магнитного поля, напряжённость которого меняется (при протяжке ленты или вращении диска) во времени так же, как и сигнал, что записывается. Свойства лент (дисков) с покрытием магнитными порошками существенно зависят не только от свойств исходных материалов, но и от степени измельчения частиц, объёмной плотности магнитного материала в рабочем слое, ориентации частиц при наличии у них анизотропии формы и т.п.

Рабочий слой должен быть как можно тоньше, а сама лента (диск) – гладкой и гибкой для обеспечения максимального взаимодействия (магнитного контакта) между магнитными материалами ленты и головки. Остаточная намагниченность материала должна быть возможно более высокой.

В качестве материалов для магнитных порошков находят применение: феррит железа (магнетит), феррит кобальта, двуокись хрома и др.. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Наибольшее применение получил гамма-окись железа ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) игольчатой формы с длиной частиц около 0,4 мкм и отношением длины к диаметру, приблизительно равным трем.

Терромагнитные материалы. Терромагнитными называют материалы с существенной зависимостью магнитной индукции (точнее, намагниченности насыщения, потому что обычно терромагнитный материал работает в режиме насыщения) от температуры в определенном интервале (в большинстве случаев $-60\dots+60^\circ\text{C}$). Терромагнитные материалы используют, главным образом, как магнитные шунты или дополнительные опоры. Включение таких элементов в магнитные цепи позволяет осуществить компенсацию температурной

погрешности или обеспечить изменение магнитной индукции в воздушном зазоре по заданному закону терморегулирования.

Вопросы для самопроверки

1. Как называются материалы, обладающие магнитными свойствами?
2. Какие основные свойства диамагнетиков?
3. В чём проявляется особенность парамагнетиков?
4. Чем отличаются ферро- и антиферромагнетики?
5. Какими параметрами характеризуются ферромагнетики?
6. Дайте характеристику магнитно-мягких материалов.
7. Каковы особенности магнитно-твёрдых материалов?
8. Какие магнитные свойства электротехнической стали вы знаете?
9. Каковы характерные особенности пермаллоев?
10. Охарактеризуйте область применения литых высококоэрцитивных сплавов.
11. Основные свойства магнитотвёрдых ферритов.
12. В чём проявляется особенность деформируемых магнитотвёрдых сплавов?
13. Какие редкоземельные материалы обеспечивают высокие значения магнитной энергии?
14. Какими магнитными материалами являются ферриты?
15. Где применяются магниты на резиновой основе?
16. Какие материалы применяются для магнитных лент и магнитных дисков?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стремительное развитие мехатроники в мире – закономерный процесс, который вызван принципиально новыми требованиями рынка к показателям качества технологических машин и сложным физико-техническим системам и процессам.

В машиностроении цель и предмет мехатроники – создание и производство качественно новых модулей движения и машин для реализации заданных функциональных движений машин и механизмов. Эта работа невозможна без применения современных электротехнических и конструкционных материалов, являющихся основой для создания новых классов машин и компьютеризированного технологического оборудования.

В учебном пособии представлены основные сведения об электротехнических материалах, применяемых в мехатронике и робототехнике.

В первой главе приведена общая характеристика электротехнических материалов. Во второй главе подробно рассматриваются проводниковые материалы, их свойства и особенности. Третья глава содержит сведения о твёрдых, жидких и газообразных диэлектриках и их применении в электротехнике. В четвёртой и пятой главах рассмотрены проводниковые изделия и материалы для изоляции соединений электронных блоков мехатронных устройств, приведены их основные параметры и технические характеристики. В шестой главе приводятся сведения о материалах, используемых для изготовления конструктивных элементов электротехнического оборудования в робототехнике и 3D-печати элементов мехатронных модулей. Седьмая глава раскрывает свойства и параметры магнитных материалов.

Основные области применения современных материалов в мехатронных модулях и робототехнических системах:

– станкостроение и оборудование для автоматизации, технологических процессов в машиностроении;

- промышленная и специальная робототехника;
- авиационная и космическая техника;
- военная техника, машины для полиции и спецслужб;
- электронное машиностроение и оборудование для быстрого прототипирования;
- автомобилестроение (приводные модули «мотор-колесо», антиблокировочные устройства тормозов, автоматические коробки передач, системы автоматической парковки и т. п.);
- нетрадиционные транспортные средства (электромобили, электровелосипеды, электросамокаты, инвалидные коляски);
- офисная техника (например, копировальные аппараты);
- периферийные устройства компьютеров (принтеры, плоттеры, дисковые накопители);
- медицинское и спортивное оборудование (биоэлектрические и экзоскелетные протезы для инвалидов, тонусные тренажеры, управляемые диагностические капсулы, массажеры и т. д.);
- бытовая техника (стиральные, швейные, посудомоечные машины, автономные пылесосы);
- микромашины (для медицины, биотехнологии, средств связи и телекоммуникации);
- контрольно-измерительные устройства и машины;
- лифтовое и складское оборудование, автоматические двери в отелях и аэропортах; фото- и видеотехника;
- тренажеры для подготовки операторов сложных технических систем и пилотов;
- железнодорожный транспорт (системы контроля и стабилизации движения поездов);
- интеллектуальные машины для пищевой и мясомолочной промышленности;
- полиграфические машины;
- интеллектуальные устройства для шоу-индустрии, аттракционы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анненков Ю.М. Перспективные материалы и технологии в электроизоляционной и кабельной технике: учебное пособие / Ю.М. Анненков, А.С. Ивашутенко: Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 212 с.

2. Антипов Б. Л. Материалы электронной техники: задачи и вопросы / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. – СПб. : Лань, 2001. – 479 с.

3. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. и др. Материаловедение: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с.

4. Барвинский И.А., Барвинская И.Е. Справочник по литью пластмасс. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.barvinsky.ru/guide/guide-materials.htm>, свободный.

5. Диаграммы выбора материалов для 3D-печати. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/default.html, свободный.

6. Дроздов Н. Г., Никулин Н. В. Электроматериаловедение. Москва, 1973. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://forca.ru/knigi/arhivy/elektromaterialovedenie.html>, свободный.

7. Евстифеев В.В. и др. Электротехнические материалы, пластмассы, резины, композиты: Учебное пособие / В.В. Евстифеев, М.С. Корытов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2009. – 36 с.

8. Конструкционные и электротехнические материалы. / В. Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.А. Феликов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высшая школа, 1990. – 296 с.

9. Конструкционные и электротехнические материалы в транспортном машиностроении: учеб. пособие / О.В. Чудина, В.А. Александров. – М.: МАДИ, 2017. – 228 с.

10. Коробейников С.М. Курс электротехнического материаловедения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sermir.narod.ru/lec/lect1.htm>, свободный.

11. Материаловедение / Под. общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 214 с.
12. Материаловедение и технология материалов: учебное пособие / Под ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина.– М.: ИНФРА-М, 2011. – 288 с.
13. Материаловедение: Учебное пособие / В.А. Стуканов. – М.: ИД ФОРУМ: НИЦ Инфра-М, 2012. – 368 с.
14. Материалы современной электроники : [учеб. пособие] / В. Ф. Марков, Х. Н. Мухамедзянов, Л. Н. Маскаева ; [под общ. ред. В. Ф. Маркова] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 272 с.
15. Медь и деформируемые медные сплавы: учебное пособие/ Ю.Н.Логинов. 2-е изд., стер. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 136 с.
16. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники: учебник, 5-е изд. – СПб.: Лань, 2003. – 368 с.
17. Петрова Л.Г., Потапов М.А., Чудина О. В. Электротехнические материалы: Учебное пособие / МАДИ (ГТУ). – М., 2008. – 198 с.
18. Серков П. Дао изоленты. Простой путеводитель по материалам v.1.4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://serkov.su/blog/?page_id=2573, свободный.
19. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1/ Под ред Ю.В.Корицкого и др.– 3-е изд., перераб. – М,: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.
20. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.2/ Под ред Ю.В.Корицкого и др.– 3-е изд., перераб. – М,: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
21. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.3/ Под ред Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева.– 3-е изд., перераб. – Л.,: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 728 с.
22. Феликов В. А. Электротехнические и конструкционные материалы, – М.: Мастерство, 2000. – 156 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1	1 H 1,0079 водород							(H)			2 He 4,0026 гелий
2	3 Li 6,941 литий	4 Be 9,012 бериллий	5 10,811 B бор	6 12,011 C углерод	7 14,0067 N азот	8 15,9994 O кислород	9 18,9984 F фтор				10 20,179 Ne неон
3	11 Na 22,9898 натрий	12 Mg 24,3050 магний	13 26,9815 Al алюминий	14 28,0855 Si кремний	15 30,9737 P фосфор	16 32,066 S сера	17 35,4527 Cl хлор				18 39,948 Ar аргон
4	19 K 39,0983 калий	20 Ca 40,078 кальций	21 44,956 Sc скандий	22 47,867 Ti титан	23 50,9415 V ванадий	24 51,996 Cr хром	25 54,938 Mn марганец	26 55,845 Fe железо	27 58,933 Co кобальт	28 58,693 Ni никель	
	29 63,546 Cu медь	30 65,39 Zn цинк	31 69,723 Ga галлий	32 72,61 Ge германий	33 74,9216 As мышьяк	34 78,96 Se селен	35 79,904 Br бром				36 83,80 Kr криптон
5	37 85,468 Rb рубидий	38 87,62 Sr стронций	39 88,906 Y иттрий	40 91,224 Zr цирконий	41 92,906 Nb ниобий	42 95,94 Mo молибден	43 98,907 Tc технеций	44 101,07 Ru рутений	45 102,9055 Rh родий	46 106,42 Pd палладий	
	47 107,868 Ag серебро	48 112,411 Cd кадмий	49 114,818 In индий	50 118,710 Sn олово	51 121,760 Sb сурьма	52 127,60 Te теллур	53 126,904 I йод				54 131,29 Xe ксенон
6	55 132,905 Cs цезий	56 137,327 Ba барий	57 138,905 La* лантан	72 178,49 Hf гафний	73 180,948 Ta тантал	74 183,84 W вольфрам	75 186,207 Re рений	76 190,23 Os осмий	77 192,217 Ir иридий	78 195,08 Pt платина	
	79 196,9665 Au золото	80 200,59 Hg ртуть	81 204,383 Tl таллий	82 207,2 Pb свинец	83 208,980 Bi висмут	84 208,9824 Po полоний	85 209,987 At астат				86 222,0176 Rn радон
	87 223,0197 Fr франций	88 226,0254 Ra радий	89 227,0278 Ac** актиний	104 261,11 Rf резерфордий	105 262,114 Db дубний	106 263,118 Sg сиборгий	107 262,12 Bh борий	108 [265] Hs хассий	109 [266] Mt мейтнерий	110	

*) ЛАНТАНОИДЫ

58 140,115 Ce церий	59 140,907 Pr празеодим	60 144,24 Nd неодим	61 144,913 Pm прометий	62 150,36 Sm самарий	63 151,965 Eu европий	64 157,25 Gd гадолиний	65 158,925 Tb тербий	66 162,52 Dy диспрозий	67 164,93 Ho гольмий	68 167,26 Er эрбий	69 168,934 Tm тулий	70 173,04 Yb иттербий	71 174,967 Lu лютеций
--	--	--	---	---	--	---	---	---	---	---	--	--	--

**) АКТИНОИДЫ

90 232,038 Th торий	91 231,036 Pa протактиний	92 238,051 U уран	93 237,048 Np нептуний	94 244,064 Pu плутоний	95 243,061 Am америций	96 247,070 Cm кюрий	97 247,070 Bk берклий	98 251,080 Cf калифорний	99 252,083 Es эйнштейний	100 257,095 Fm фермий	101 258,1 Md менделевий	102 259,101 No нобелий	103 262,11 Lr лоуренсий
--	--	--	---	---	---	--	--	---	---	--	--	---	--

Учебное издание

НЕМОНТОВ Владимир Александрович

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ В МЕХАТРОНИКЕ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 17.06.21.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 17,67. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.