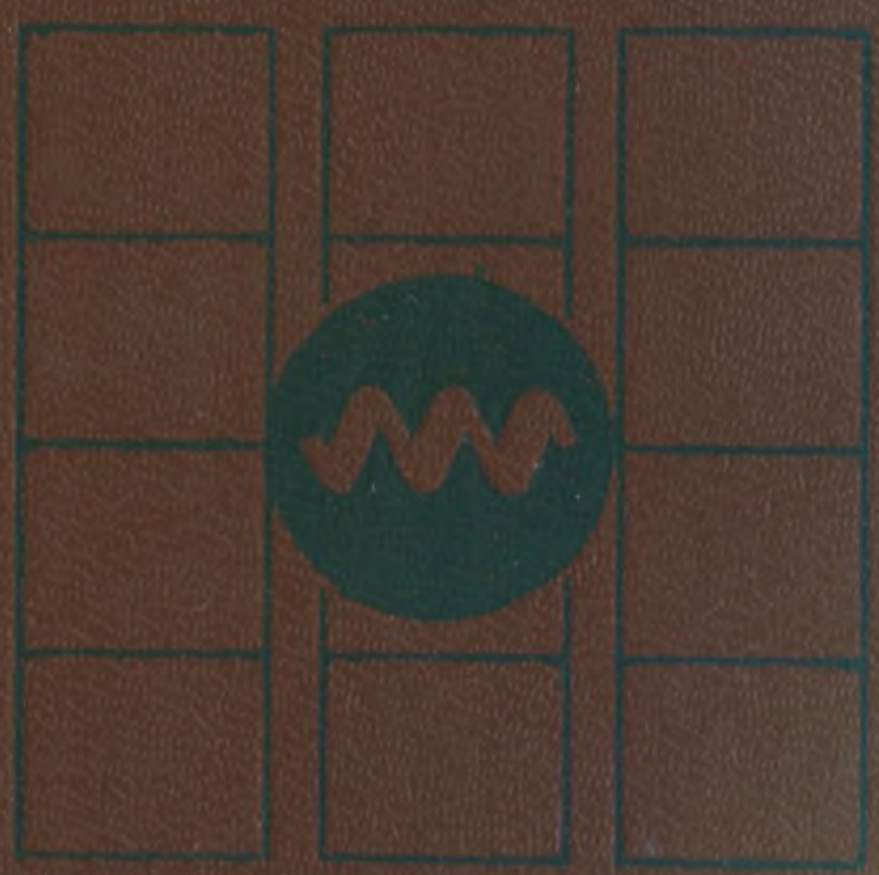
КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

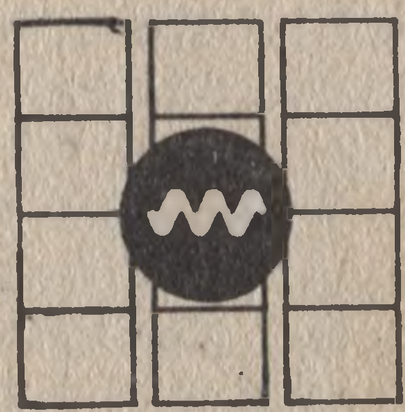
КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ



621.3
К-65

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Под редакцией В. А. ФИЛИКОВА



Допущено
Министерством монтажных
и специальных
строительных работ СССР
в качестве учебника для
учащихся средних
специальных
учебных заведений
электротехнических
специальностей

МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1990

Бух. ТУП и ЛП
БИБЛИОТЕКА
№ 11765

ВВЕДЕНИЕ

Современный научно-технический прогресс тесно связан с разработкой, изучением и освоением новых материалов. Эти материалы играли и продолжают играть очень важную роль в развитии цивилизации. Целые эпохи истории цивилизации были названы по материалам, которые были в то время определяющими: каменный, медный, бронзовый и железный век. Возможно, что последующие эпохи будут названы бумажным веком и веком пластмасс. Именно материалы были и являются ключевым звеном в решении многих инженерных задач при разработке изделий электротехники, электроники, энергетики и т. д.

Для рационального применения материалов необходимо знание их физических, механических, электрических свойств, понимание закономерностей изменений этих свойств при изменении условий их получения и эксплуатации.

Особую роль новые материалы играют в развитии такой технической отрасли, как электротехника. Она относится к исторически молодым отраслям, и в ней трудно выделить периоды подавляющего господства отдельных материалов. В развитии материальной базы происходили отдельные скачки, которые сделали возможным открытие новых материалов. Сюда можно отнести начало века, когда с использованием первого электроизоляционного материала макромолекулярного характера — бакелита — в электротехнике началась эра пластических масс. Аналогичные скачки обусловили открытие во время второй мировой войны первых сегнетоэлектрических материалов, затем внедрение в технику ферритов и полупроводников.

В настоящее время электротехническая промышленность не имеет возможности производить для своих нужд материалы высшего качества. Сложность решаемых ею задач требует сотрудничества с другими отраслями промышленности, которые снабжают электротехнику высококачественным сырьем, полуфабрикатами, а часто и готовыми изделиями. Такими отраслями в настоящее время являются, в частности, химическая, металлургическая, электронная. Поэтому наука об электротехнических и конструкционных материалах смыкается со многими научными отраслями и представляет собой типичную комплексную научную дисциплину, которой при подготовке специалистов в средних специальных учебных заведениях уделяется большое внимание.

Эта дисциплина, основываясь на знаниях, полученных учащимися по общеобразовательным предметам и теоретическим основам электротехники, является базой для изучения таких специальных предметов, как «Электрические измерения», «Основы промышленной электроники», «Основы автоматики и микропроцессорной техники», «Электрические машины» и др.

ЧАСТЬ I

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

С древнейших времен люди пользуются металлами для изготовления орудий труда и оружия. Эти времена восходят к началу бронзового века, когда мастера-умельцы освоили изготовление различных предметов из сплавов на основе меди. Поиски новых более прочных материалов и дальнейшее развитие способов получения высоких температур привели к освоению производства железных изделий и наступлению продолжающегося до сих пор железного века.

Во все времена мастера искали способы сделать металлические изделия более прочными, надежными, красивыми и удобными в пользовании.

В XVIII в. на основе анализа предшествующего опыта и догадок стала зарождаться научная теория, объясняющая причины поломок изделий и показывающая способы улучшения качества металла. Создатели подлинно научной теории впервые начали увязывать качество металла, его прочностные свойства с особенностями его строения. Такой подход в настоящее время является единственно правильным.

Одним из выдающихся исследователей того времени, раскрывшим секрет булатной стали и написавшим по этому поводу сразу же переведенный на немецкий и французский языки знаменитый труд «О булатах», был русский ученый-металлург А. А. Аносов (1799—1851). Для достижения поставленной цели он кроме особенностей химического состава упомянутой стали изучал также специфику ее видимого наружного строения — узора (макроструктуры), а также внутреннего строения — микроструктуры, впервые в мире применив для этого микроскоп.

Большое значение для развития мировой науки о металлах имели работы другого русского ученого — Д. К. Чернова (1839—1921). Разработав четкую теорию кристаллизации и строения слитков, он указал и поныне актуальные пути улучшения качества выплавляемой стали.

Открыв в 1868 г. так называемые критические точки стали, Д. К. Чернов раскрыл не известный еще секрет ее закалки и тем самым заложил научную основу под теорию и практику термиче-

ВВЕДЕНИЕ

Современный научно-технический прогресс тесно связан с разработкой, изучением и освоением новых материалов. Эти материалы играли и продолжают играть очень важную роль в развитии цивилизации. Целые эпохи истории цивилизации были названы по материалам, которые были в то время определяющими: каменный, медный, бронзовый и железный век. Возможно, что последующие эпохи будут названы бумажным веком и веком пластмасс. Именно материалы были и являются ключевым звеном в решении многих инженерных задач при разработке изделий электротехники, электроники, энергетики и т. д.

Для рационального применения материалов необходимо знание их физических, механических, электрических свойств, понимание закономерностей изменений этих свойств при изменении условий их получения и эксплуатации.

Особую роль новые материалы играют в развитии такой технической отрасли, как электротехника. Она относится к исторически молодым отраслям, и в ней трудно выделить периоды подавляющего господства отдельных материалов. В развитии материальной базы происходили отдельные скачки, которые сделали возможным открытие новых материалов. Сюда можно отнести начало века, когда с использованием первого электроизоляционного материала макромолекулярного характера — бакелита — в электротехнике началась эра пластических масс. Аналогичные скачки обусловили открытие во время второй мировой войны первых сегнетоэлектрических материалов, затем внедрение в технику ферритов и полупроводников.

В настоящее время электротехническая промышленность не имеет возможности производить для своих нужд материалы высшего качества. Сложность решаемых ею задач требует сотрудничества с другими отраслями промышленности, которые снабжают электротехнику высококачественным сырьем, полуфабрикатами, а часто и готовыми изделиями. Такими отраслями в настоящее время являются, в частности, химическая, металлургическая, электронная. Поэтому наука об электротехнических и конструкционных материалах смыкается со многими научными отраслями и представляет собой типичную комплексную научную дисциплину, которой при подготовке специалистов в средних специальных учебных заведениях уделяется большое внимание.

Эта дисциплина, основываясь на знаниях, полученных учащимися по общеобразовательным предметам и теоретическим основам электротехники, является базой для изучения таких специальных предметов, как «Электрические измерения», «Основы промышленной электроники», «Основы автоматики и микропроцессорной техники», «Электрические машины» и др.

ЧАСТЬ I

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

С древнейших времен люди пользуются металлами для изготовления орудий труда и оружия. Эти времена восходят к началу бронзового века, когда мастера-умельцы освоили изготовление различных предметов из сплавов на основе меди. Поиски новых более прочных материалов и дальнейшее развитие способов получения высоких температур привели к освоению производства железных изделий и наступлению продолжающегося до сих пор железного века.

Во все времена мастера искали способы сделать металлические изделия более прочными, надежными, красивыми и удобными в пользовании.

В XVIII в. на основе анализа предшествующего опыта и догадок стала зарождаться научная теория, объясняющая причины поломок изделий и показывающая способы улучшения качества металла. Создатели подлинно научной теории впервые начали увязывать качество металла, его прочностные свойства с особенностями его строения. Такой подход в настоящее время является единственно правильным.

Одним из выдающихся исследователей того времени, раскрывшим секрет булатной стали и написавшим по этому поводу сразу же переведенный на немецкий и французский языки знаменитый труд «О булатах», был русский ученый-металлург А. А. Аносов (1799—1851). Для достижения поставленной цели он кроме особенностей химического состава упомянутой стали изучал также специфику ее видимого наружного строения — узора (макроструктуры), а также внутреннего строения — микроструктуры, впервые в мире применив для этого микроскоп.

Большое значение для развития мировой науки о металлах имели работы другого русского ученого — Д. К. Чернова (1839—1921). Разработав четкую теорию кристаллизации и строения слитков, он указал и поныне актуальные пути улучшения качества выплавляемой стали.

Открыв в 1868 г. так называемые критические точки стали, Д. К. Чернов раскрыл не известный еще секрет ее закалки и тем самым заложил научную основу под теорию и практику термиче-

в центре куба на пересечении его диагоналей — у ОЦК (рис. 1.2, *а*) — или на пересечении диагоналей каждой грани, т. е. в ее центре — у ГЦК (рис. 1.2, *б*).

Ячейка решетки ГПУ (рис. 1.2, *в*) представляет собой призму, основаниями которой являются центрированные одним атомом шестигранники. Внутри этой ячейки между основаниями находятся еще три атома, образующие равносторонний треугольник.

Кристаллические решетки металлов независимо от их типа являются плотноупакованными. Это означает, что атомы, находящиеся в их узлах, соприкасаются друг с другом своими наружными электронными оболочками (видны справа на рис. 1.2).

Металлы отличаются друг от друга кроме типа кристаллической решетки еще и ее параметрами, которые представляют собой характерные размеры геометрического тела, составляющего ее ячейку. Например, у кубической ячейки — ребро *а* (рис. 1.2, *а*, *б*), у гексагональной — сторона основания *а* и расстояние между основаниями *с* (рис. 1.2, *в*).

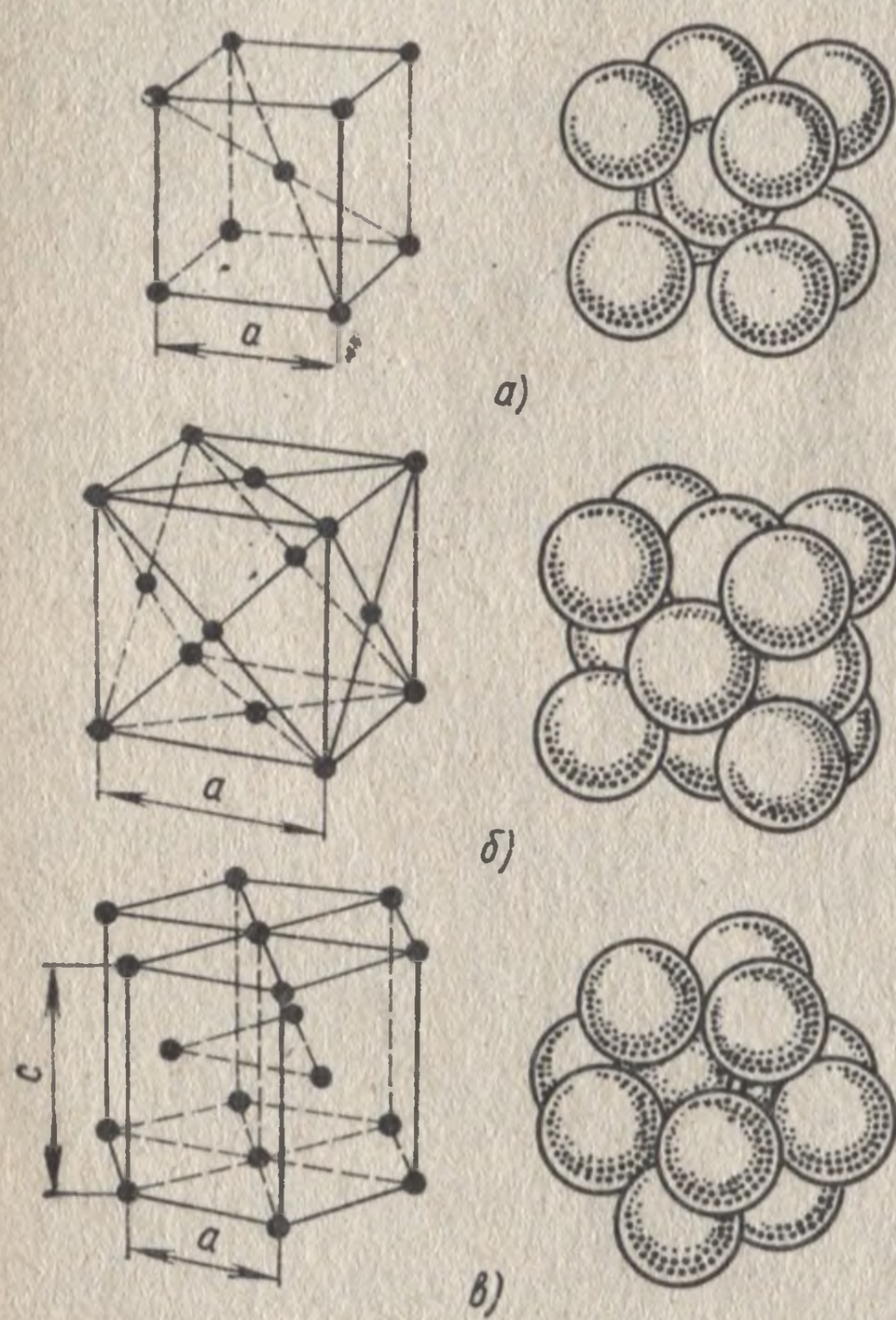


Рис. 1.2. Основные типы кристаллических решеток металлов

Параметр — расстояние между центрами соседних атомов по избранному направлению. Оно выражается в нанометрах (нм) или ангстремах [Å], причем 1 нм = 10 Å = 10^{-9} м. Как правило, параметры решеток металлов колеблются в пределах 2—7 Å (0,2—0,7 нм). Наиболее известные и широко применяемые в промышленности металлы по типам кристаллических решеток можно разбить следующим образом:

ОЦК-решетку имеют железо при обычных температурных условиях, хром, вольфрам, ванадий, молибден, калий и натрий;

ГЦК-решетку имеют никель, медь, алюминий, свинец, серебро, железо при температурах 911—1392 °С и другие металлы;

ГПУ-решетку имеют магний, цинк, а также кобальт, цирконий и титан при комнатной температуре.

Как видно из перечисления, некоторые металлы в зависимости от температурных условий существуют при разных способах расположения атомов в пространстве друг относительно друга. Например, железо при температурах до 911 °С имеет ОЦК-решетку, да-

лее до 1392 °С существует в аллотропической форме ГЦК, а затем вплоть до температуры плавления снова принимает форму ОЦК (см. рис. 1.4).

Способность металла изменять тип своей кристаллической решетки в зависимости от температуры называется *аллотропией* (*полиморфизмом*). Полиморфные превращения свойственны также титану, цирконию, олову и другим металлам.

Аллотропические превращения имеют важное значение в технике; благодаря им, например, оказывается возможным производить термическую обработку стали и других сплавов, имеющую целью изменять их структуру и свойства.

Итак, мы разобрали кристаллическое строение металлов и увидели строго упорядоченное расположение атомов в пространстве относительно друг друга. Из этого вытекает такая важная особенность, присущая всем кристаллическим телам, как анизотропия свойств.

Под анизотропией понимается неодинаковость механических и других свойств монокристаллов по различным направлениям. Так как свойства вдоль какого-нибудь направления зависят от количества расположенных на нем атомов, то анизотропия является закономерным следствием кристаллического строения.

Действительно, например, у монокристаллов с ОЦК-решеткой свойства вдоль ребер кубов отличаются от свойств вдоль их диагоналей, поскольку (рис. 1.2, *а*) вдоль ребра в ячейке насчитывается два атома, а вдоль диагонали — три.

Монокристалл представляет собой как бы одно большое зерно металла, состоящее из огромного количества одинаково ориентированных ячеек. Реальные металлы являются поликристаллическими телами, состоящими из огромного числа мелких зерен с различной ориентировкой их ячеек. Ввиду этого в целом куске металла недостаток свойств в одних зернах по любому из направлений перекрывается их избытком в других зернах по этому же направлению и «средние» свойства в поликристаллическом теле по всем направлениям оказываются одинаковыми. Данное явление присуще реальным металлам, имеющим поликристаллическое строение, и называется *псевдоизотропией* или *квазиизотропией*.

У реальных металлов есть еще одна очень важная для понимания их свойств особенность. Кристаллическая решетка их зерен не является идеальным геометрическим построением, ей присущи такие дефекты, как вакансии, внедренные атомы и дислокации.

Вакансией называется незаполненный по той или иной причине узел кристаллической решетки (рис. 1.3, *а*). В местах нахождения вакансий кристаллическая решетка искажена, там возникают местные внутренние напряжения, которые обусловлены нарушениями однородности сил межатомного взаимодействия, существующей в идеальной кристаллической решетке со всеми заполненными узлами.

в центре куба на пересечении его диагоналей — у ОЦК (рис. 1.2, *а*) — или на пересечении диагоналей каждой грани, т. е. в ее центре — у ГЦК (рис. 1.2, *б*).

Ячейка решетки ГПУ (рис. 1.2, *в*) представляет собой призму, основаниями которой являются центрированные одним атомом шестигранники. Внутри этой ячейки между основаниями находятся еще три атома, образующие равносторонний треугольник.

Кристаллические решетки металлов независимо от их типа являются плотноупакованными. Это означает, что атомы, находящиеся в их узлах, соприкасаются друг с другом своими наружными электронными оболочками (видны справа на рис. 1.2).

Металлы отличаются друг от друга кроме типа кристаллической решетки еще и ее параметрами, которые представляют собой характерные размеры геометрического тела, составляющего ее ячейку. Например, у кубической ячейки — ребро *а* (рис. 1.2, *а*, *б*), у гексагональной — сторона основания *а* и расстояние между основаниями *с* (рис. 1.2, *в*).

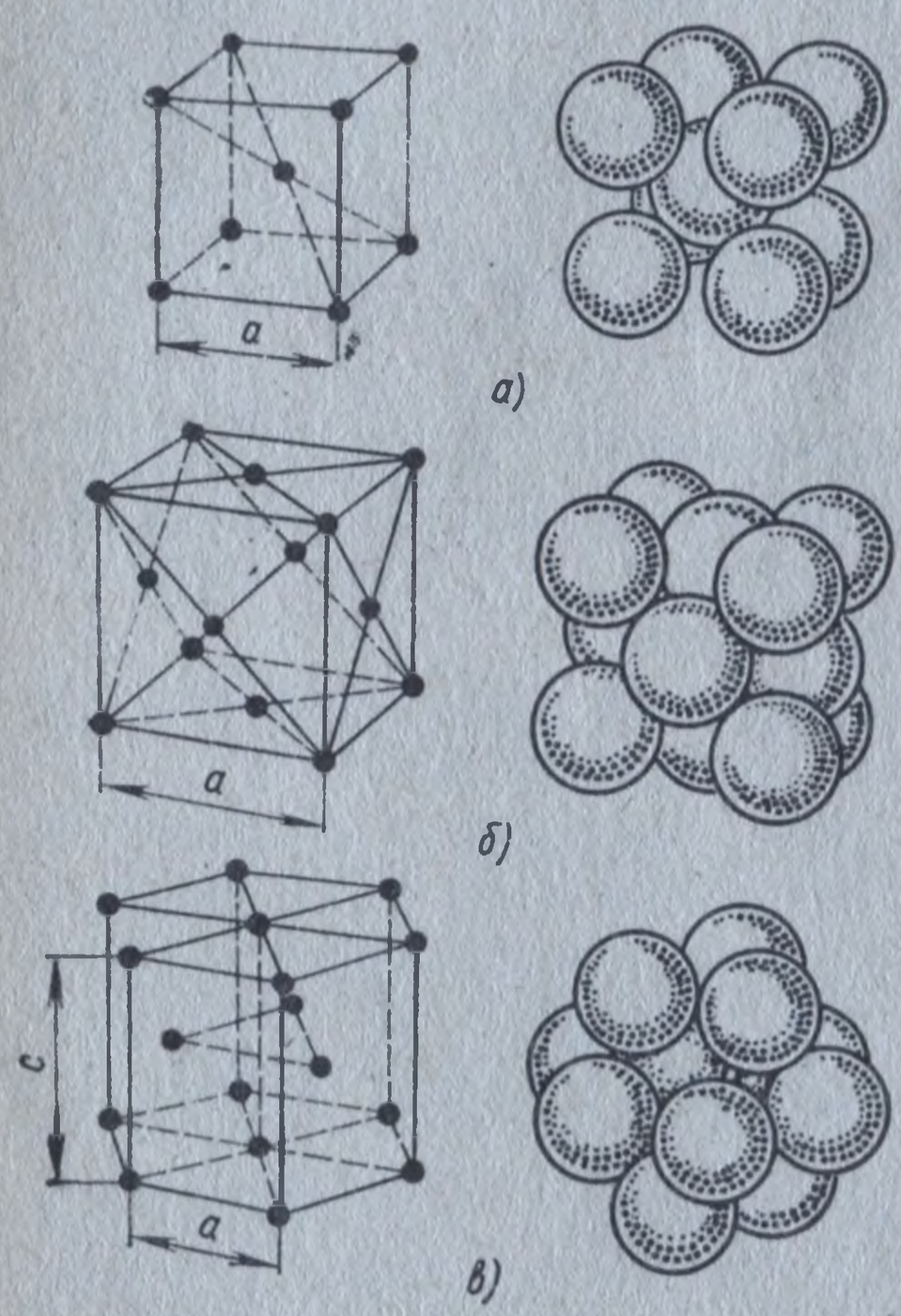


Рис. 1.2. Основные типы кристаллических решеток металлов

Параметр — расстояние между центрами соседних атомов по избранному направлению. Оно выражается в нанометрах (нм) или ангстремах [Å], причем 1 нм = = 10 Å = 10^{-9} м. Как правило, параметры решеток металлов колеблются в пределах 2—7 Å (0,2—0,7 нм). Наиболее известные и широко применяемые в промышленности металлы по типам кристаллических решеток можно разбить следующим образом:

ОЦК-решетку имеют железо при обычных температурных условиях, хром, вольфрам, ванадий, молибден, калий и натрий;

ГЦК-решетку имеют никель, медь, алюминий, свинец, серебро, железо при температурах 911—1392 °С и другие металлы;

ГПУ-решетку имеют магний, цинк, а также кобальт, цирконий и титан при комнатной температуре.

Как видно из перечисления, некоторые металлы в зависимости от температурных условий существуют при разных способах расположения атомов в пространстве друг относительно друга. Например, железо при температурах до 911 °С имеет ОЦК-решетку, да-

лее до 1392 °С существует в аллотропической форме ГЦК, а затем вплоть до температуры плавления снова принимает форму ОЦК (см. рис. 1.4).

Способность металла изменять тип своей кристаллической решетки в зависимости от температуры называется *аллотропией* (*полиморфизмом*). Полиморфные превращения свойственны также титану, цирконию, олову и другим металлам.

Аллотропические превращения имеют важное значение в технике; благодаря им, например, оказывается возможным производить термическую обработку стали и других сплавов, имеющую целью изменять их структуру и свойства.

Итак, мы разобрали кристаллическое строение металлов и увидели строго упорядоченное расположение атомов в пространстве относительно друг друга. Из этого вытекает такая важная особенность, присущая всем кристаллическим телам, как анизотропия свойств.

Под анизотропией понимается неодинаковость механических и других свойств монокристаллов по различным направлениям. Так как свойства вдоль какого-нибудь направления зависят от количества расположенных на нем атомов, то анизотропия является закономерным следствием кристаллического строения.

Действительно, например, у монокристаллов с ОЦК-решеткой свойства вдоль ребер кубов отличаются от свойств вдоль их диагоналей, поскольку (рис. 1.2, *а*) вдоль ребра в ячейке насчитывается два атома, а вдоль диагонали — три.

Монокристалл представляет собой как бы одно большое зерно металла, состоящее из огромного количества одинаково ориентированных ячеек. Реальные металлы являются поликристаллическими телами, состоящими из огромного числа мелких зерен с различной ориентировкой их ячеек. Ввиду этого в целом куске металла недостаток свойств в одних зернах по любому из направлений перекрывается их избытком в других зернах по этому же направлению и «средние» свойства в поликристаллическом теле по всем направлениям оказываются одинаковыми. Данное явление присуще реальным металлам, имеющим поликристаллическое строение, и называется *псевдоизотропией* или *квазиизотропией*.

У реальных металлов есть еще одна очень важная для понимания их свойств особенность. Кристаллическая решетка их зерен не является идеальным геометрическим построением, ей присущи такие дефекты, как вакансии, внедренные атомы и дислокации.

Вакансией называется незаполненный по той или иной причине узел кристаллической решетки (рис. 1.3, *а*). В местах нахождения вакансий кристаллическая решетка искажена, там возникают местные внутренние напряжения, которые обусловлены нарушениями однородности сил межатомного взаимодействия, существующей в идеальной кристаллической решетке со всеми заполненными узлами.

Если в отдельных ячейках кристаллической решетки между ее узлами по каким-либо причинам оказываются как бы «лишние» атомы данного или другого элемента, то образующиеся при этом дефекты называются *внедренными атомами* (рис. 1.3, *б*). Внедренные атомы также искажают кристаллическую решетку и создают внутренние напряжения. При внедрении в междоузлия решетки атомов других элементов эти напряжения оказываются тем больше, чем значительнее разница между размерами атомов внедрения и данного металла.

Линейные несовершенства кристаллической решетки называются *дислокациями*. Дислокации можно представить таким образом: если надрезать идеальный кристалл и сместить края надреза на величину, кратную периоду решетки, то внутри кристалла у края надреза возникнет некоторое искажение, которое и является дислокацией.

Если края надреза сдвинуты параллельно надрезу, то образующаяся дислокация называется *винтовой*. Если же края надреза раздвинуть и внутрь образовавшейся щели вставить (или удалить из нее) лишнюю атомную плоскость того же материала (экстраплоскость), это приведет к образованию дислокации другого типа — *краевой* (рис. 1.3, *в*).

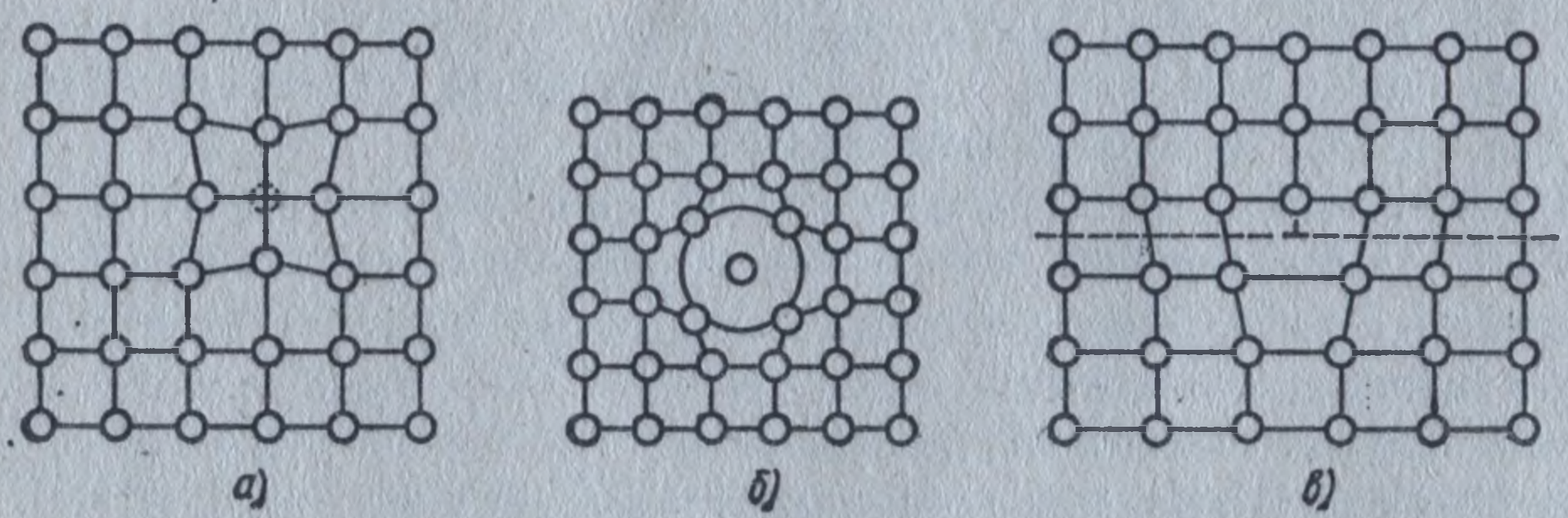


Рис. 1.3. Основные дефекты кристаллических решеток

Чем больше имеется в зерне таких дефектов, тем сильнее искажена его кристаллическая решетка и тем более значительны в ней внутренние напряжения. Дислокации возникают при кристаллизации, особенно на границах зерен, при пластической деформации металла, при его резких нагревах и охлаждениях.

Ознакомившись с вакансиями, внедренными атомами и дислокациями, очень важно для понимания прочности металлов уяснить, что все эти дефекты привносят в зерна металла, в их кристаллическую решетку искажения и внутренние напряжения.

Не менее важное значение для прочностных свойств металла имеют строение и состояние границ его зерен. Благодаря особенностям кристаллизации металла (т. е. образования зерен из жидкого металла) кристаллическая решетка в слое, прилегающем к границам

каждого зерна, содержит большое количество вакансий и недостроенных ячеек.

У границ соседних зерен сталкиваются атомы, находящиеся на разных кристаллографических плоскостях, которые не являются продолжением друг друга, а пересекаются под тем или иным углом. Последнее обстоятельство очень важно для понимания таких явлений, как наклеп или упрочнение металла во время пластической деформации, а также зависимость прочности от размера зерна металла.

По границам зерен могут находиться в виде включений различные легкоплавкие неметаллические примеси. Например, в стали между зернами могут находиться включения сульфида железа FeS. Тугоплавкие включения, например сульфида марганца MnS, наоборот, находятся внутри зерен.

Кристаллизация металлов. Каждое вещество в зависимости от температуры и давления может находиться в твердом, жидком и газообразном (парообразном) состоянии.

В обычных атмосферных условиях при комнатной температуре все металлы, за исключением ртути, являются твердыми телами. Они в отличие от жидкостей сохраняют определенную форму и размеры и противодействуют внешним силам, чтобы не изменить эти важные их признаки. Переход металлов, как и всех кристаллических тел, из жидкого состояния в твердое происходит вследствие естественного стремления любого вещества уменьшить запас своей свободной энергии при понижении температуры.

Оказывается, когда кристаллическое тело находится в жидком состоянии, то при любой температуре, превышающей точку плавления $T_{пл}$, его свободная энергия меньше, чем если бы оно при той же температуре находилось в твердом, т. е. кристаллическом, состоянии. Однако когда его температура окажется ниже точки плавления, то более низкий запас свободной энергии будет у твердого состояния.

Поэтому, подчиняясь природным законам термодинамики, металлы, как кристаллические тела, при нагревании до определенных температур плавятся (переходят из твердого состояния в жидкое), а при охлаждении кристаллизуются (становятся твердыми телами).

Напомним, что твердые металлы состоят из зерен, которые состоят из закономерно расположенных в пространстве атомов, образующих кристаллическую решетку того или иного типа в зависимости от рода металла (см. рис. 1.1 и 1.2).

Так как свойства металлов зависят также от формы и размера зерен, то очень интересно и важно знать, каким образом и по каким законам происходит кристаллизация металлов и можно ли управлять размером зерен, чтобы получать требуемые свойства.

Перед тем как рассмотреть этот вопрос, ознакомимся с кривыми нагрева и охлаждения железа и уясним их физическую сущность (рис. 1.4).

отсутствует, зерна получаются равноосными, т. е. они имеют одинаковые размеры по всем направлениям.

Средний размер получающихся при кристаллизации зерен зависит от числа возникающих центров кристаллизации. Чем больше центров, тем мельче зерно и тем прочнее металл.

При необходимости размером зерна можно управлять. Для получения мелкозернистого металла его модифицируют, т. е. в расплавленный металл вводят небольшое количество специально подбираемого вещества — модификатора, который во время кристаллизации наряду с основным металлом образует дополнительные центры кристаллизации, вследствие чего общее число центров и, следовательно, количество образующихся зерен возрастает, а их размеры уменьшаются.

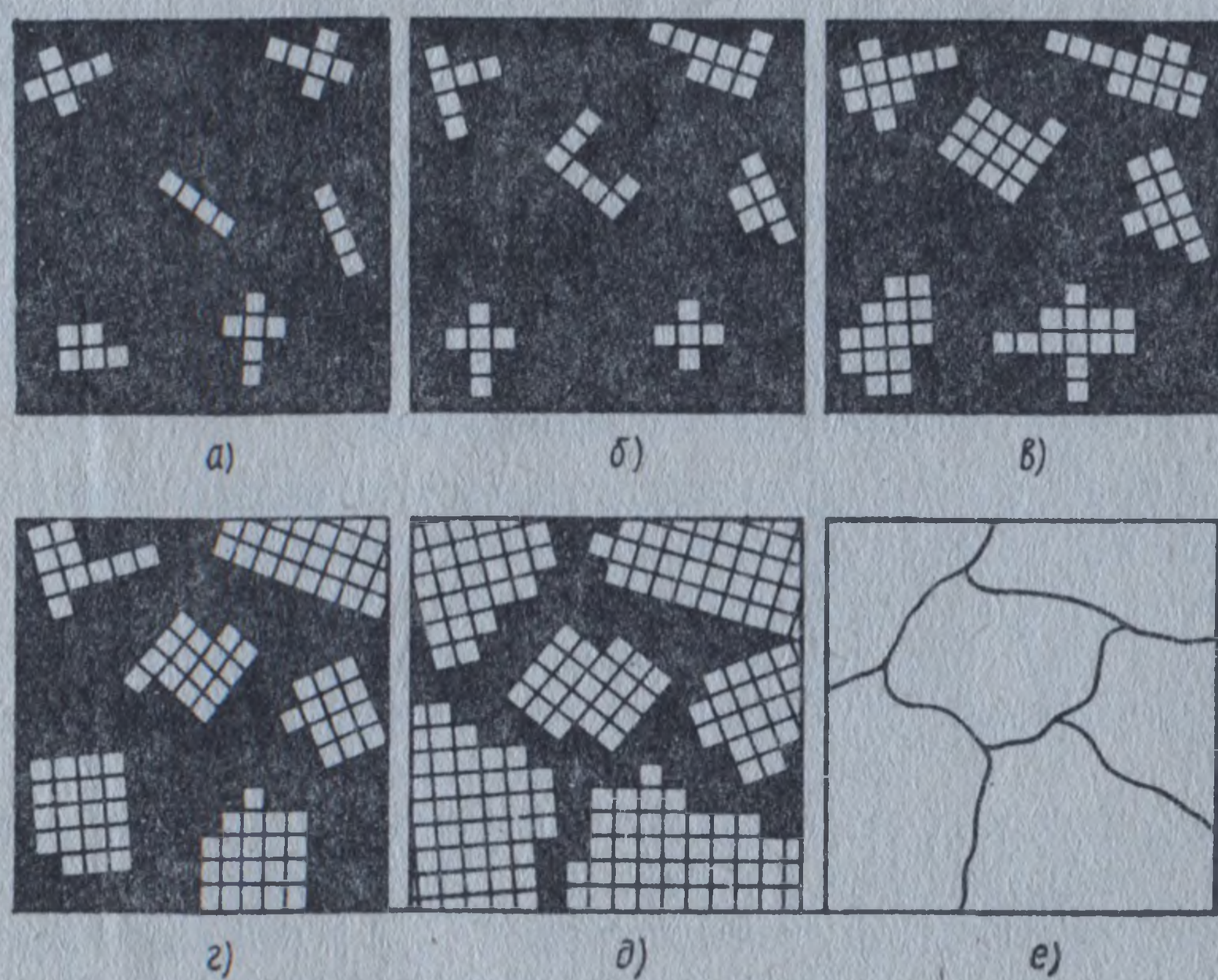


Рис. 1.5. Схема кристаллизации жидкого металла

Другой род модификаторов сам дополнительных центров кристаллизации не создает и даже замедляет рост зерен из возникших центров, однако в результате этого замедления возрастает общая продолжительность кристаллизации и, как следствие, увеличивается суммарное количество зарождающихся в жидком металле центров кристаллизации. А это приводит к измельчению зерен сплава.

Механические и другие свойства металлов и методы их определения. Используемые для изготовления различных изделий материалы прежде всего должны иметь определенный запас механических свойств, обеспечивающих неразрушение изделий эксплуатационными нагрузками.

Другими свойствами материалов являются их различные физические и химические свойства, например плотность, теплопроводность, электротехнические свойства, способность сопротивляться коррозии и т. д.

Особо выделяются технологические свойства материалов. От них зависит, каким способом из данного материала можно изготовить ту или иную деталь. К ним относятся ковкость, литейные свойства, обрабатываемость режущим инструментом, прокаливаемость и т. д.

Наиболее универсальными свойствами являются механические. Это объясняется тем, что большинство изготовляемых изделий во время эксплуатации подвергается действию нагрузок, порождающих воздействующие на материал силы, которые могут создавать в материале растягивающие, сжимающие или касательные (сдвиговые) напряжения и соответствующие им деформации.

Под механическими свойствами принято понимать комплекс свойств, отражающих способность материала противодействовать деформации под действием приложенных сил.

Деформация — это изменение формы и размеры изделия, которая может быть растягивающей, сжимающей и сдвиговой. Растяжение приводит к увеличению размера изделия (или испытываемого образца) в направлении действующей силы и соответствующему уменьшению размера в поперечном направлении. При сжатии, наоборот, продольный размер уменьшается, а поперечный — увеличивается. Сдвиг приводит к смещению одной части материала изделия (образца) относительно другой по какой-нибудь плоскости. Например, при скручивании стержня в нем происходят деформации сдвига или деформации среза.

В зависимости от поведения деформируемого металла после снятия приложенной силы любая из описанных видов деформаций может быть упругой или остаточной.

Упругая деформация после снятия вызвавшей ее силы полностью исчезает, и все размеры изделия (образца), как продольные, так и поперечные, остаются без изменения. При этом не изменяется и взаимное положение атомов в кристаллической решетке. Объясняется это тем, что вызванные внешней силой временные изменения расстояний между атомами, равных периоду решетки, а также смещения соседних атомов относительно друг друга, приводящие к искажению решетки, устраняются благодаря обусловленному металлической связью межатомному взаимодействию.

Если действующие силы и порожденные ими напряжения окажутся достаточно большими, то в изделии (образце) происходят остаточные, т. е. необратимые, перемещения материала, сохраняющиеся после снятия нагрузки. При этом форма и размеры изделия (образца) изменяются. Такая деформация материала называется *пластической*.

Развитие пластической деформации может завершиться разрушением детали. Но даже не достигшая такой стадии, она может стать причиной выхода из строя всей машины или агрегата.

Суммарная пластическая деформация металла складывается из перемещений металла в его отдельных зернах. При этом зерна вытягиваются, приобретают продолговатую форму.

Пластическая деформация является результатом массового перемещения огромного количества дислокаций, существующих в зернах и вновь возникающих под действием напряжений.

Дислокации непрерывными скачками величиной в параметр решетки перемещаются к границам зерен. В результате массового выхода дислокаций в разных местах зерна образуются ступеньки, вдоль которых зерно как бы расслаивается и происходят сдвиги его частей относительно друг друга. Дальнейшее развитие этого дислокационного процесса приводит к необратимой вытяжке зерен, что и составляет сущность пластической деформации металла.

Таким образом, механические свойства в основном отражают способность материала сопротивляться пластической деформации и характеризуют его поведение в ходе ее развития. Как правило, к ним относят твердость, прочность, пластичность и ударную вязкость.

Под твердостью принято понимать способность материала оказывать сопротивление внедрению в него под действием силы наконечника из другого более твердого материала. При внедрении наконечника в материале происходит местная пластическая деформация. Следовательно, сущность твердости материала — это его сопротивление сосредоточенной (местной) пластической деформации.

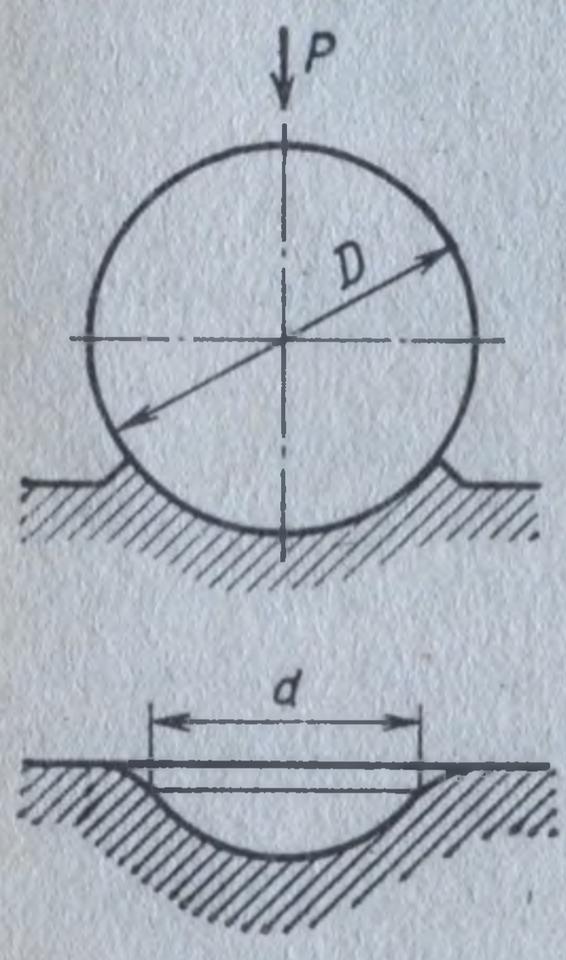


Рис. 1.6. Схема замера твердости по методу Бринелля

Замер твердости производится при помощи специальных приборов — твердомеров. Наиболее распространенным методом замера является метод вдавливания какого-нибудь стандартного наконечника — индентора — в поверхность образца из исследуемого материала. При замере твердости по методу Бринелля (прибор ТШ) индентором служит закаленный стальной шарик (рис. 1.6). При этом шарик под определенной нагрузкой P в течение некоторого времени вдавливается в материал, оставляя на его поверхности лунку диаметром d.

Так как глубина и диаметр лунки зависят от сопротивления материала пластической деформации, вызываемой внедряющимся шариком, то за меру твердости по Бринеллю принимается число, равное отношению силы P к площади сферической поверхности лунки F: $HB = P/F$ или $HB = 2P/(\pi D)\ (D - \sqrt{D^2 - d^2})$.

На практике при замере твердости ее величина не вычисляется по приведенной формуле, а находится по специальной таблице по измеренному специальной лупой диаметру отпечатка d. В таблице против значений d указаны соответствующие им вычисленные значения твердости HB. Твердость по Бринеллю оценивается в мегапаскалях [МПа] или в кгс/мм^2 (1 МПа = 0,1 кгс/мм^2). Если материал имеет очень высокую твердость, особенно когда она тверже шарика прибора Бринелля, то для замера твердости пользуются прибором Роквелла, наконечник которого оснащен конусом, изготовленным из самого твердого материала — алмаза.

Прибором Роквелла пользуются также и для замера твердости сравнительно мягких материалов. В связи с этим в его комплект входит наконечник, оснащенный стальным шариком диаметром 1,5875 мм. Замер твердости по Роквеллу состоит из трех этапов (рис. 1.7). На первом этапе наконечник внедряется в материал на глубину h_0 (мм), создаваемую вручную предварительной нагрузкой P_0, равной 100 Н (10 кгс). Затем прикладывается основная нагрузка P, которая включает в себя кроме предварительной дополнительную нагрузку P_1, равную 500, 1400 или 900 Н в зависимости от рода испытываемого материала. Под этой нагрузкой наконечник в течение определенного времени внедряется в материал на некоторую глубину h_1.

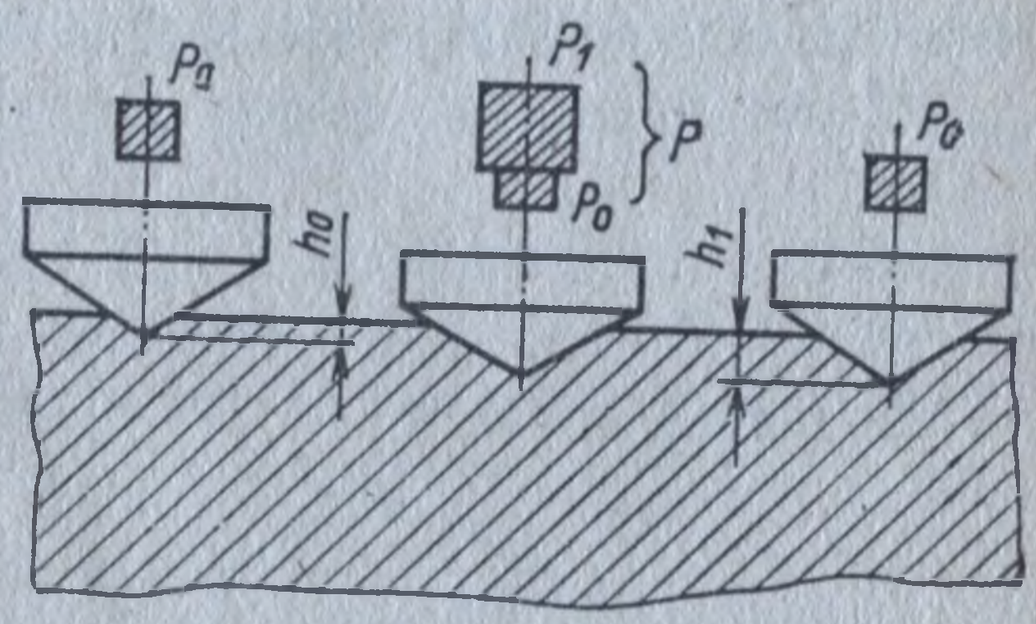


Рис. 1.7. Схема замера твердости по методу Роквелла

На третьем этапе дополнительная нагрузка P_1 снимается и при сохраняющейся предварительной нагрузке P_0 производится отсчет твердости. Для этого на приборе имеется индикатор со стрелкой и двумя шкалами: черной и красной. По черной шкале отсчитывается твердость, замеряемая алмазным конусом, а по красной — стальным шариком.

Шкалы нанесены на диске по окружностям. Каждое деление шкалы соответствует внедрению наконечника на глубину 0,002 мм. Числа твердости, отсчитываемые по черной шкале, для полной нагрузки ($P_0 + P_1$), равной 1500 Н (150 кгс), обозначаются HRC, а для нагрузки 600 Н (60 кгс) — HRA. Твердость, замеряемая шариком, обозначается HRB (нагрузка 1000 Н, 100 кгс).

Указываемые на шкалах стрелкой твердости вычисляются по следующим формулам:

$$\mathrm{HRC\,(HRA)} = 100 - (h_1 - h_0)/0{,}002;$$

$$\mathrm{HRB} = 130 - (h_1 - h_0)/0{,}002,$$

Бер. ТИП и ЛП
БИБЛИОТЕКА

Понятие о металлических сплавах и их свойствах. *Сплавом* называется сложное вещество, получаемое путем сплавления нескольких простых веществ, называемых компонентами сплава. В металлическом сплаве основным компонентом (более 50 %) должен быть металл. У сплавов можно получить более высокие механические, физические и химические свойства, чем у чистых металлов, поэтому их так широко применяют в технике. Для понимания природы сплавов и их свойств необходимо познакомиться с диаграммами состояний простейших сплавов — двойных. Эти сплавы состоят из двух компонентов.

Диаграмма состояний представляет собой чертеж, в котором отражено изменение структуры и фазового состава сплавов данных компонентов в зависимости от их содержания (концентрации) и температуры T (рис. 1.11).

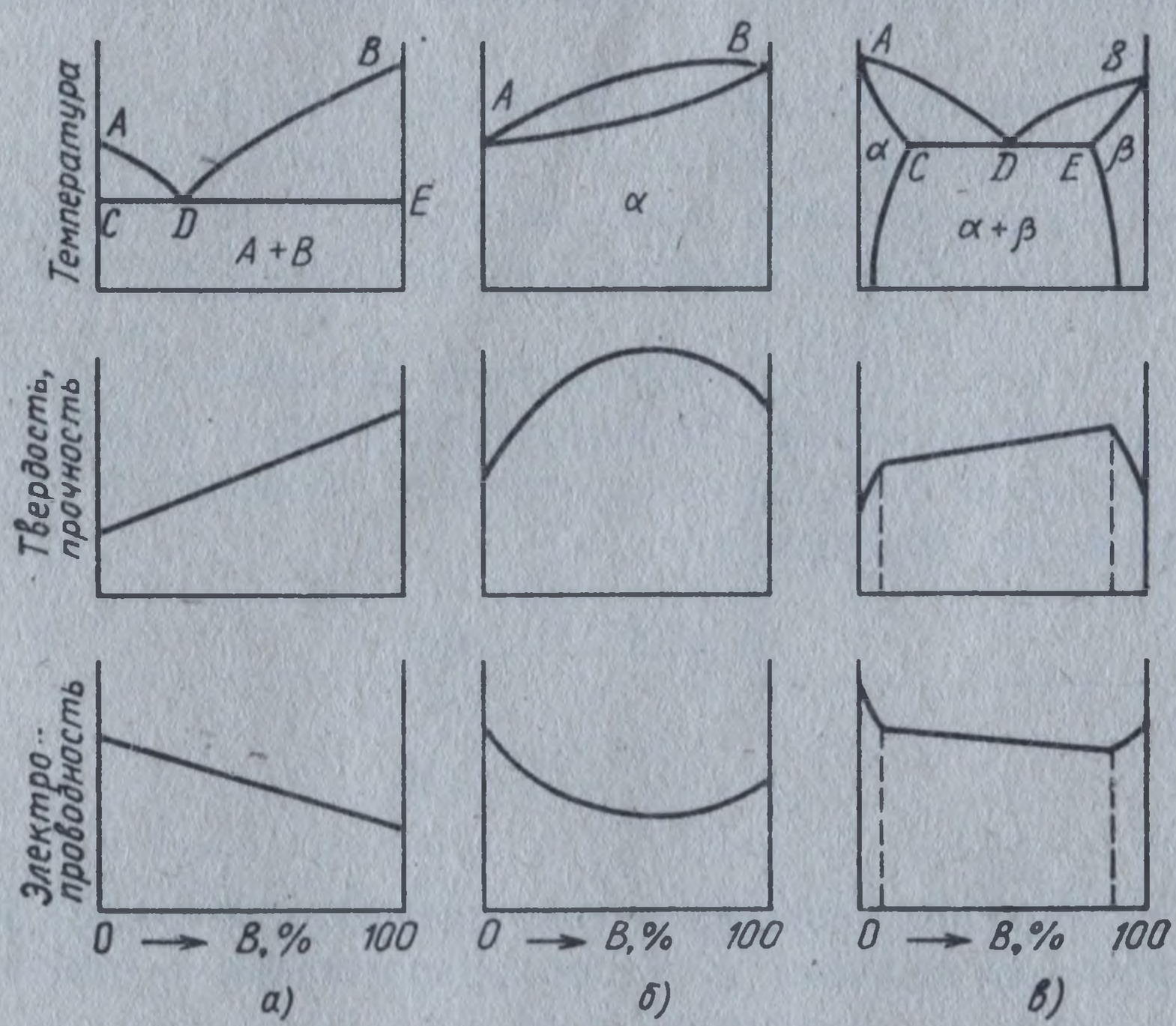


Рис. 1.11. Основные типы диаграмм состояния (верхний ряд) и характер изменения свойств в зависимости от концентрации B

Прежде всего выясним, что такое структура и фазовый состав. Сплавы, как и чистые металлы, построены из зерен, которые можно наблюдать в оптический микроскоп. В зависимости от природы сплавляемых компонентов в сплавах могут наблюдаться в виде зерен следующие фазы:

смесь зерен чистых компонентов (если последние не вступают друг с другом ни в какое взаимодействие);

твердые растворы одного компонента в другом, когда кристаллические решетки в зернах построены из атомов обоих компонентов, из которых один является растворителем, а другой — растворимым;

химические соединения компонентов сплава друг с другом, имеющие свою присущую им кристаллическую решетку, отличную от решеток исходных компонентов.

При образовании твердых растворов компоненты в зависимости от их природы могут растворяться друг в друге ограниченно или неограниченно. При ограниченной растворимости в решетке одного компонента может растворяться лишь некоторое, как правило, зависящее от температуры количество атомов другого компонента. Остальное количество взятого для сплава компонента при этом или само становится растворителем и образует зерна со своей решеткой, в которой растворены атомы другого сплавляемого компонента, или вступает со вторым компонентом в химическое взаимодействие. Рассмотрим примеры диаграмм состояний и показанных на них фаз и структурных составляющих.

Диаграмма состояний сплавов — механических смесей — изображена на рис. 1.11, *а*. Это случай, когда компоненты *A* и *B* взаимно растворяются только в жидком состоянии, а в твердом не растворяются и не вступают в химическое взаимодействие.

В твердом состоянии (ниже линии *CDE*) все сплавы этой системы состоят из зерен чистых компонентов $A + B$. Свойства сплавов в данном случае зависят от свойств компонентов и их относительных количеств в каждом сплаве и изменяются по линейному закону от компонентов *A* и *B*.

При неограниченной взаимной растворимости компонентов в твердом состоянии получается диаграмма состояний, изображенная на рис. 1.11, *б*. В данном случае образуется непрерывный ряд сплавов — твердых растворов α переменной концентрации.

Известно, что при растворении в кристаллической решетке одного компонента атомов другого она искажается и в ней возникают внутренние напряжения, тем больше, чем больше в решетке посторонних («чужих») атомов. Все это затрудняет передвижение дислокаций в зернах во время пластической деформации и повышает прочность сплава.

В связи с отмеченным свойства сплавов неограниченных твердых растворов изменяются по криволинейному закону.

Показанная на рис. 1.11, *в* диаграмма состояний отражает поведение сплавляемых компонентов при ограниченной растворимости.

В данном случае в твердом состоянии (ниже линии *ACDEB*) наблюдаются три структурно-фазовые области: области ограниченных α (слева) и β (справа) растворов и между ними область механических смесей этих растворов ($\alpha + \beta$).

В областях, занятых только одним раствором, свойства изменяются по криволинейным законам, а в смешанной области — по линейному.

§ 1.2. Сплавы железа с углеродом

Сплавы на основе железа и особенно железоуглеродистые сплавы — стали и чугуна — продолжают оставаться важнейшими материалами. Для правильного понимания природы свойств разнообразных марок современных сталей и чугунов, включая и специальные, так называемые легированные, стали, необходимо получить хорошее представление о диаграмме железо—углерод, разобраться в отраженном на ней структурно-фазовом составе и открытых Д. К. Черновым критических температурных точках.

Диаграмма состояний железо — углерод. В настоящее время наибольшее практическое значение имеет приведенная на рис. 1.12

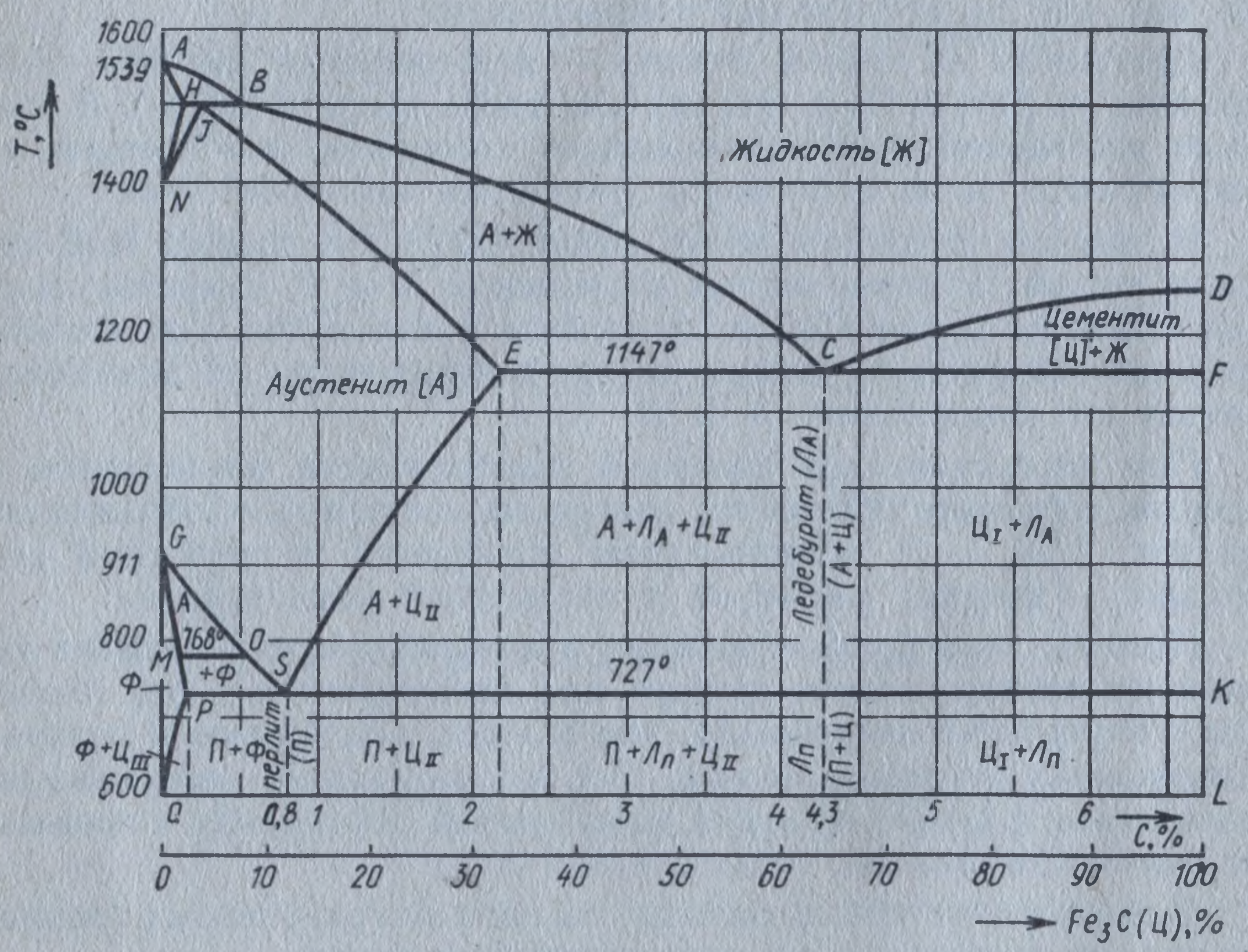


Рис. 1.12. Диаграмма состояний Fe—C

диаграмма состояний Fe—C, на которой одной из важнейших фаз, влияющих на свойства сплавов, указан карбид железа Fe_3C или цементит. Анализ этой диаграммы показывает, что цементит ведет себя как самостоятельный компонент. Поэтому на диаграмме

даны две согласующиеся друг с другом шкалы концентраций: одна показывает содержание углерода, а другая — количество цементита в процентах. Напомним, что в цементите Fe_3C содержится 6,67 % углерода. Поэтому если левая ордината соответствует чистому железу, то правая — цементиту.

Железо может находиться в двух аллотропических формах, которым соответствуют решетки ОЦК и ГЦК (см. рис. 1.4). Если чистое железо претерпевает аллотропическое превращение ОЦК $\rightleftarrows$ ГЦК, т. е. α-Fe $\rightleftarrows$ γ-Fe при 911 °С, то при сплавлении с углеродом эта температура может снизиться вплоть до 727 °С (рис. 1.12, линия *PSK*). Температура плавления железа составляет 1539 °С.

Второй компонент рассматриваемой системы сплавов — цементит — имеет более сложную, чем у железа, кристаллическую решетку и плавится при $T \approx 1250$ °С.

Основными фазами и структурными составляющими данной системы, от которых зависят свойства сплавов и их поведение при нагружении и нагреве, являются феррит [Ф], аустенит [А] и цементит [Ц]. Аустенит — это фаза и различимая в микроскоп в виде зерен структурная составляющая, представляющая собой твердый раствор внедрения углерода в γ-Fe.

В аустените в зависимости от температуры нагрева может раствориться до 2,14 % углерода (при $T = 1147$ °С). Атомы растворенного в аустените углерода располагаются в центрах ячеек ГЦК.

Обычно аустенит существует при $T \geqslant 727$ °С. При комнатной температуре он иногда в небольших количествах может сохраниться только в закаленной стали. Он очень пластичен ($\delta = 40 \div 50$ %), его твердость НВ составляет 1700—2000 МПа (170—200 кгс/мм²).

При $T = 727$ °С аустенит может содержать только 0,8 % углерода (точка *S* на рис. 1.12; во всех точках на линии *PSK* аустенит также содержит 0,8 % углерода, находясь в равновесии с сопутствующим ему на участке *PS* ферритом, а на участке *SK* — цементитом).

При повышении температуры растворимость углерода в аустените возрастает по линии *SE* вплоть до 2,14 % при 114 °С. Очень важно уяснить, что при охлаждении всех сплавов, содержащих аустенит и лежащие ниже и правее линии его насыщения углеродом *E*, из него вследствие уменьшения растворимости будет выделяться углерод. Выделяющийся углерод образует цементит, получивший название вторичного — $Ц_{II}$ (рис. 1.12, области ниже и правее линии *SE*).

Для понимания природы свойств равновесных сплавов разбираемой системы при комнатной температуре наибольший интерес представляют феррит и цементит. Дело в том, что при $T < 727$ °С, включая и комнатную, все сплавы, охватываемые диаграммой Fe—C (Fe—Fe_3C) от 0 % углерода (0 % Fe_3C) до 6,67 % углерода (100 % Fe_3C), состоят только из этих двух фаз, находящихся в них в разных количественных сочетаниях.

Легко проследить, что количество цементита в сплавах возрастает от 0 до 100 % при 6,67 % углерода. В то же время количество феррита соответственно убывает от 100 % до 0. В связи с этим у сплавов будут возрастать свойства, привносимые цементитом, и снижаться характеристики, определяемые ферритом.

Твердость феррита зависит от фактического количества растворенного в нем углерода и может достигать 800 МПа (80 НВ). Феррит, входящий в состав реальной промышленной стали, благодаря неизбежно попадающим в нее при выплавке и растворяющимся в нем некоторым количествам кремния и марганца имеет более высокую твердость, доходящую до 1000 МПа (100 НВ). Он очень пластичен, его относительное удлинение $\delta = 50$ %, а поперечное сужение $\psi = 80$ %.

Цементит является самой твердой и хрупкой фазой и структурной составляющей в рассматриваемом ряду сплавов. Его твердость максимальна (второе место после алмаза) и составляет 8000 МПа (800 НВ), а пластичность равна нулю, так как он способен только к небольшим упругим деформациям.

Теперь легко понять, что при увеличении в сплаве содержания углерода вследствие возрастания в нем количества твердого и хрупкого цементита и соответственно уменьшения доли мягкого и пластичного феррита твердость и прочность сплава должны повышаться, а пластичность и вязкость — уменьшаться. При этом, поскольку в данном случае образуется механическая смесь этих двух фаз (Ф + Ц), свойства согласно закону Курнакова изменяются по линейному закону (см. рис. 1.11, *а*, *в* соответственно для смесей $A + B$ и $\alpha + \beta$).

Таким образом, представленные на диаграмме рис. 1.12 сплавы охватывают собой широкий и противоречивый диапазон механических свойств: высокие пластичность, вязкость; сравнительно небольшая твердость в левой части и огромная твердость с ничтожно малыми пластичностью и вязкостью — в правой.

Все помещенные на этой диаграмме сплавы принято делить на стали и чугуны. К сталям формально относятся сплавы, содержащие менее 2,14 % углерода, остальные сплавы причисляются к чугунам. Перечисленные ранее входящие в состав сталей и чугунов фазы (аустенит, феррит, цементит) могут находиться в них как отдельные структурные составляющие в виде зерен или мелких продолговатых включений. Они также образуют характерные структурные составляющие — механические смеси с некоторыми присущими им признаками — перлит и ледебурит.

П е р л и т представляет собой механическую смесь тонких пластинок цементита и находящихся между ними более толстых пластинок феррита. Он образуется при 727 °С из аустенита, содержащего 0,8 % углерода.

Аустенит, находящийся в любой части диаграммы состояний выше 727 °С (см. рис. 1.12), остывая и подходя к 727 °С, т. е. к ли-

нии *PSK*, приобретает концентрацию 0,8 % углерода. Распад происходит по формуле $А_{0,8} \xrightarrow{727\ °C} Ф_{0,02} + Ц_{6,67}$ (цифровые индексы при фазах означают содержание в них углерода).

Перлит образуется как в сталях, так и в чугунах и играет важную роль в формировании их свойств.

Ледебурит является механической смесью одновременно кристаллизующихся из жидкой фазы при постоянной, равной 1147 °С температуре зерен аустенита и цементита. Ледебурит содержит 4,3 % углерода. Поэтому, когда остывающая жидкая фаза приближается по температуре к линии *EC* (1147 °С), углерода в ней оказывается 4,3 % и она, затвердевая, превращается в хорошо перемешанную смесь зерен цементита и аустенита по формуле

$$Ж_{4,3} \xrightarrow{1147°\,C} А_{2,14} + Ц_{6,67}.$$

При дальнейшем охлаждении содержание углерода в аустените из-за уменьшения растворимости снижается по линии *FS* и при 727 °С (линия *SK*) достигает 0,8 %. Аустенит при этом превращается в перлит и, таким образом, ледебурит становится смесью зернышек перлита и цементита. По описанной причине на диаграмме (рис. 1.12) ледебурит с аустенитом обозначен $Л_А$, а с перлитом — $Л_П$. Ледебурит содержится только в чугунах и отсутствует в сталях.

Понятие о выплавке и формировании качества чугуна и стали. Реальные свойства сталей и чугунов в значительной степени зависят от неизбежно попадающих в них при выплавке других элементов, которые могут или растворяться в феррите и цементите, или образовывать в сплавах твердые или газообразные неметаллические включения. Во всех этих случаях особенно сильно изменяются свойства сталей и надо четко себе представлять хотя бы схематично процесс выплавки стали. Основная масса производимой в стране стали получается из чугуна путем его переплавки. В свою очередь, чугун выплавляется из железной руды в специальных печных агрегатах, называемых доменными печами. Железная руда представляет собой сложный горный минерал, содержащий железо в количествах, обеспечивающих экономически рациональное ведение плавки.

Железо в руде содержится в виде оксида (Fe_2O_3, Fe_3O_4 или FeO), называемого рудным минералом. Кроме рудного минерала в руде содержится определенное количество перемешанной с ним пустой породы, в основном состоящей из кремнезема SiO_2. В железной руде, как правило, содержится небольшое количество марганца в виде минерала пиролюзита MnO_2.

Чтобы выплавить чугун, надо прежде всего восстановить железо из его оксида и отделить получающийся продукт от пустой породы. Но для этого вместе с рудой в доменную печь надо загрузить топливо — кокс и флюс (углекислый кальций), известняк $CaCO_3$. Кокс служит источником необходимой для хода плавки теплоты и

Легко проследить, что количество цементита в сплавах возрастает от 0 до 100 % при 6,67 % углерода. В то же время количество феррита соответственно убывает от 100 % до 0. В связи с этим у сплавов будут возрастать свойства, привносимые цементитом, и снижаться характеристики, определяемые ферритом.

Твердость феррита зависит от фактического количества растворенного в нем углерода и может достигать 800 МПа (80 НВ). Феррит, входящий в состав реальной промышленной стали, благодаря неизбежно попадающим в нее при выплавке и растворяющимся в нем некоторым количествам кремния и марганца имеет более высокую твердость, доходящую до 1000 МПа (100 НВ). Он очень пластичен, его относительное удлинение $\delta = 50$ %, а поперечное сужение $\psi = 80$ %.

Цементит является самой твердой и хрупкой фазой и структурной составляющей в рассматриваемом ряду сплавов. Его твердость максимальна (второе место после алмаза) и составляет 8000 МПа (800 НВ), а пластичность равна нулю, так как он способен только к небольшим упругим деформациям.

Теперь легко понять, что при увеличении в сплаве содержания углерода вследствие возрастания в нем количества твердого и хрупкого цементита и соответственно уменьшения доли мягкого и пластичного феррита твердость и прочность сплава должны повышаться, а пластичность и вязкость — уменьшаться. При этом, поскольку в данном случае образуется механическая смесь этих двух фаз (Ф + Ц), свойства согласно закону Курнакова изменяются по линейному закону (см. рис. 1.11, *а*, *в* соответственно для смесей $A + B$ и $\alpha + \beta$).

Таким образом, представленные на диаграмме рис. 1.12 сплавы охватывают собой широкий и противоречивый диапазон механических свойств: высокие пластичность, вязкость; сравнительно небольшая твердость в левой части и огромная твердость с ничтожно малыми пластичностью и вязкостью — в правой.

Все помещенные на этой диаграмме сплавы принято делить на стали и чугуны. К сталям формально относятся сплавы, содержащие менее 2,14 % углерода, остальные сплавы причисляются к чугунам. Перечисленные ранее входящие в состав сталей и чугунов фазы (аустенит, феррит, цементит) могут находиться в них как отдельные структурные составляющие в виде зерен или мелких продолговатых включений. Они также образуют характерные структурные составляющие — механические смеси с некоторыми присущими им признаками — перлит и ледебурит.

П е р л и т представляет собой механическую смесь тонких пластинок цементита и находящихся между ними более толстых пластинок феррита. Он образуется при 727 °С из аустенита, содержащего 0,8 % углерода.

Аустенит, находящийся в любой части диаграммы состояний выше 727 °С (см. рис. 1.12), остывая и подходя к 727 °С, т. е. к ли-

нии *PSK*, приобретает концентрацию 0,8 % углерода. Распад происходит по формуле $А_{0,8} \xrightarrow{727\ °C} Ф_{0,02} + Ц_{6,67}$ (цифровые индексы при фазах означают содержание в них углерода).

Перлит образуется как в сталях, так и в чугунах и играет важную роль в формировании их свойств.

Ледебурит является механической смесью одновременно кристаллизующихся из жидкой фазы при постоянной, равной 1147 °С температуре зерен аустенита и цементита. Ледебурит содержит 4,3 % углерода. Поэтому, когда остывающая жидкая фаза приближается по температуре к линии *EC* (1147 °С), углерода в ней оказывается 4,3 % и она, затвердевая, превращается в хорошо перемешанную смесь зерен цементита и аустенита по формуле

$$Ж_{4,3} \xrightarrow{1147°\,C} А_{2,14} + Ц_{6,67}.$$

При дальнейшем охлаждении содержание углерода в аустените из-за уменьшения растворимости снижается по линии *FS* и при 727 °С (линия *SK*) достигает 0,8 %. Аустенит при этом превращается в перлит и, таким образом, ледебурит становится смесью зернышек перлита и цементита. По описанной причине на диаграмме (рис. 1.12) ледебурит с аустенитом обозначен $Л_А$, а с перлитом — $Л_П$. Ледебурит содержится только в чугунах и отсутствует в сталях.

Понятие о выплавке и формировании качества чугуна и стали. Реальные свойства сталей и чугунов в значительной степени зависят от неизбежно попадающих в них при выплавке других элементов, которые могут или растворяться в феррите и цементите, или образовывать в сплавах твердые или газообразные неметаллические включения. Во всех этих случаях особенно сильно изменяются свойства сталей и надо четко себе представлять хотя бы схематично процесс выплавки стали. Основная масса производимой в стране стали получается из чугуна путем его переплавки. В свою очередь, чугун выплавляется из железной руды в специальных печных агрегатах, называемых доменными печами. Железная руда представляет собой сложный горный минерал, содержащий железо в количествах, обеспечивающих экономически рациональное ведение плавки.

Железо в руде содержится в виде оксида (Fe_2O_3, Fe_3O_4 или FeO), называемого рудным минералом. Кроме рудного минерала в руде содержится определенное количество перемешанной с ним пустой породы, в основном состоящей из кремнезема SiO_2. В железной руде, как правило, содержится небольшое количество марганца в виде минерала пиролюзита MnO_2.

Чтобы выплавить чугун, надо прежде всего восстановить железо из его оксида и отделить получающийся продукт от пустой породы. Но для этого вместе с рудой в доменную печь надо загрузить топливо — кокс и флюс (углекислый кальций), известняк $CaCO_3$. Кокс служит источником необходимой для хода плавки теплоты и

поставщиком оксида углерода CO, являющегося восстановителем железа. При очень высоких температурах восстановителем служит и содержащийся в коксе углерод.

Действие флюса — известняка — основано на том, что в сочетании с пустой породой — кремнеземом SiO_2 — он образует легкоплавкую смесь, которая, плавясь и будучи более легкой, чем чугун, скапливается над ним в виде шлака. Таким образом, пустая порода надежно отделяется от металла. Но загружаемые в доменную печь вместе с рудой кокс и известняк всегда содержат какое-то количество попадающих в чугун, а из него в сталь вредных примесей, главным образом серы и фосфора. Сера находится в руде и коксе в виде сульфидов FeS, FeS_2, а фосфор — в руде и известняке в виде минералов $3CaP_2O_5$ и $3FeO\ P_2O\ 8H_2O$. Схема восстановления железа из рудного минерала при получении чугуна:

$$Fe_2O_3 \xrightarrow{CO} Fe_3O_4 \xrightarrow{CO} FeO \xrightarrow{C} Fe.$$

На каждой из первых двух ступеней благодаря воздействию CO происходит частичное восстановление оксидов с образованием CO_2, а на последней ступени взаимодействуют сильно разогретые кокс и закись железа, образуя губчатое железо. Последнее, взаимодействуя с раскаленным коксом и в особенности с CO, науглероживается и образует цементит: $3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$. При увеличении суммарного содержания углерода до 4,3 % образуется легкоплавкая (ледебуритная) смесь, которая плавится и стекает в колодец доменной печи. Затем по мере повышения температуры в нижних горизонтах печи и образования новых порций губчатого железа они плавятся в образующемся чугуне, который скапливается в колодце.

Одновременно с восстановлением железа из пиролюзита и кремнезема восстанавливаются и растворяются в жидком чугуне марганец и кремний:

$$MnO_2 \xrightarrow{CO} Mn_2O_3 \xrightarrow{CO} Mn_3O_4 \xrightarrow{CO} MnO \xrightarrow{C} Mn,$$

$$SiO_2 + 2C + Fe = FeSi + 2CO.$$

В образующемся жидком чугуне растворяются также сера и фосфор, находящиеся в руде и во вспомогательно-технологических шихтовых материалах — коксе и известняке.

Скапливающийся в колодце доменной печи жидкий чугун периодически выпускается, разливается на чушки или отправляется на специальные склады жидкого чугуна — миксеры, из которых он транспортируется на переплавку.

Таким образом, выплавленный в доменной печи реальный чугун благодаря ранее отмеченным особенностям ни по химическому составу, ни по фазовому строению не может соответствовать изображенной на рис. 1.12 диаграмме состояний и состоять при комнат-

ной температуре только из феррита и цементита, представленных в виде $П + Л_П + Ц_{II}$ или $Л_П + Ц_I$.

В действительности в чугуне будут присутствовать неизбежно попадающие в него при выплавке примеси. К ним относятся марганец и кремний, которые принято рассматривать как полезные примеси. К вредным примесям относятся сера и фосфор, а также попадающие из атмосферы кислород, азот и водород.

Сера находится в виде сульфидов железа и марганца внутри зерен (MnS) и по границам (FeS). Фосфор в основном растворяется в феррите, делая его хрупким, а избыточный, т. е. сверх предельной растворимости, образует фосфид железа Fe_3P.

Кислород образует точечные включения оксидов, а азот и водород частично растворяются, а частично образуют точечные включения нитридов и гидридов. Все эти примеси при переплавке чугуна переходят в сталь.

Сущность выплавки стали из чугуна состоит в удалении из него путем окисления излишнего количества углерода до требуемого марочного уровня, а также примесных элементов, содержание которых ограничивается определенными пределами.

В зависимости от назначения стали и предъявляемых к ее качеству требований применяется несколько промышленных способов ее выплавки. При любом способе правильная печь представляет собой выложенную огнеупорным кирпичом ванну с отлогими стенками. В нее загружаются так называемые шихтовые материалы, необходимые для выплавки стали: жидкий или твердый чугун, стальной лом, шлакообразующие и другие материалы, необходимые для ведения плавки и, в частности, для связывания и удаления в шлак вредных примесей серы и фосфора.

В качестве окислителей при выплавке стали используются закись железа FeO, образующаяся в ванне в результате окисления железа кислородом воздуха, а также чистый кислород, вдуваемый в переплавляемый жидкий чугун.

В ходе выплавки стали по достижении в ней заданного марочного содержания углерода дальнейшее его окисление надо прекратить. С этой целью прекращается подача кислорода и в металл вводятся раскислители в такой последовательности: ферромарганец FeMn, ферросилиций FeSi и алюминий. Они должны удалить из ванны закись железа и этим остановить окисление углерода: $FeO + Mn = Fe + MnO$.

Полностью раскисленная сталь называется *спокойной*, а недостаточно раскисленная (например, только ферромарганцем) продолжает «кипеть» при выпуске, заливке в изложницу и при кристаллизации, поэтому такую сталь называют *кипящей*. Процесс окисления углерода в жидкой стали сопровождается напоминающим кипение бурным выделением из нее пузырей оксида углерода: $C + FeO = Fe + CO$. Большинство марок стали выплавляют спокойными. Во время выплавки стали из нее при помощи специальных материа-

поставщиком оксида углерода CO, являющегося восстановителем железа. При очень высоких температурах восстановителем служит и содержащийся в коксе углерод.

Действие флюса — известняка — основано на том, что в сочетании с пустой породой — кремнеземом SiO_2 — он образует легкоплавкую смесь, которая, плавясь и будучи более легкой, чем чугун, скапливается над ним в виде шлака. Таким образом, пустая порода надежно отделяется от металла. Но загружаемые в доменную печь вместе с рудой кокс и известняк всегда содержат какое-то количество попадающих в чугун, а из него в сталь вредных примесей, главным образом серы и фосфора. Сера находится в руде и коксе в виде сульфидов FeS, FeS_2, а фосфор — в руде и известняке в виде минералов $3CaP_2O_5$ и $3FeO\ P_2O\ 8H_2O$. Схема восстановления железа из рудного минерала при получении чугуна:

$$Fe_2O_3 \xrightarrow{CO} Fe_3O_4 \xrightarrow{CO} FeO \xrightarrow{C} Fe.$$

На каждой из первых двух ступеней благодаря воздействию CO происходит частичное восстановление оксидов с образованием CO_2, а на последней ступени взаимодействуют сильно разогретые кокс и закись железа, образуя губчатое железо. Последнее, взаимодействуя с раскаленным коксом и в особенности с CO, науглероживается и образует цементит: $3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$. При увеличении суммарного содержания углерода до 4,3 % образуется легкоплавкая (ледебуритная) смесь, которая плавится и стекает в колодец доменной печи. Затем по мере повышения температуры в нижних горизонтах печи и образования новых порций губчатого железа они плавятся в образующемся чугуне, который скапливается в колодце.

Одновременно с восстановлением железа из пиролюзита и кремнезема восстанавливаются и растворяются в жидком чугуне марганец и кремний:

$$MnO_2 \xrightarrow{CO} Mn_2O_3 \xrightarrow{CO} Mn_3O_4 \xrightarrow{CO} MnO \xrightarrow{C} Mn,$$

$$SiO_2 + 2C + Fe = FeSi + 2CO.$$

В образующемся жидком чугуне растворяются также сера и фосфор, находящиеся в руде и во вспомогательно-технологических шихтовых материалах — коксе и известняке.

Скапливающийся в колодце доменной печи жидкий чугун периодически выпускается, разливается на чушки или отправляется на специальные склады жидкого чугуна — миксеры, из которых он транспортируется на переплавку.

Таким образом, выплавленный в доменной печи реальный чугун благодаря ранее отмеченным особенностям ни по химическому составу, ни по фазовому строению не может соответствовать изображенной на рис. 1.12 диаграмме состояний и состоять при комнат-

ной температуре только из феррита и цементита, представленных в виде $П + Л_П + Ц_{II}$ или $Л_П + Ц_I$.

В действительности в чугуне будут присутствовать неизбежно попадающие в него при выплавке примеси. К ним относятся марганец и кремний, которые принято рассматривать как полезные примеси. К вредным примесям относятся сера и фосфор, а также попадающие из атмосферы кислород, азот и водород.

Сера находится в виде сульфидов железа и марганца внутри зерен (MnS) и по границам (FeS). Фосфор в основном растворяется в феррите, делая его хрупким, а избыточный, т. е. сверх предельной растворимости, образует фосфид железа Fe_3P.

Кислород образует точечные включения оксидов, а азот и водород частично растворяются, а частично образуют точечные включения нитридов и гидридов. Все эти примеси при переплавке чугуна переходят в сталь.

Сущность выплавки стали из чугуна состоит в удалении из него путем окисления излишнего количества углерода до требуемого марочного уровня, а также примесных элементов, содержание которых ограничивается определенными пределами.

В зависимости от назначения стали и предъявляемых к ее качеству требований применяется несколько промышленных способов ее выплавки. При любом способе правильная печь представляет собой выложенную огнеупорным кирпичом ванну с отлогими стенками. В нее загружаются так называемые шихтовые материалы, необходимые для выплавки стали: жидкий или твердый чугун, стальной лом, шлакообразующие и другие материалы, необходимые для ведения плавки и, в частности, для связывания и удаления в шлак вредных примесей серы и фосфора.

В качестве окислителей при выплавке стали используются закись железа FeO, образующаяся в ванне в результате окисления железа кислородом воздуха, а также чистый кислород, вдуваемый в переплавляемый жидкий чугун.

В ходе выплавки стали по достижении в ней заданного марочного содержания углерода дальнейшее его окисление надо прекратить. С этой целью прекращается подача кислорода и в металл вводятся раскислители в такой последовательности: ферромарганец FeMn, ферросилиций FeSi и алюминий. Они должны удалить из ванны закись железа и этим остановить окисление углерода: $FeO + Mn = Fe + MnO$.

Полностью раскисленная сталь называется *спокойной*, а недостаточно раскисленная (например, только ферромарганцем) продолжает «кипеть» при выпуске, заливке в изложницу и при кристаллизации, поэтому такую сталь называют *кипящей*. Процесс окисления углерода в жидкой стали сопровождается напоминающим кипение бурным выделением из нее пузырей оксида углерода: $C + FeO = Fe + CO$. Большинство марок стали выплавляют спокойными. Во время выплавки стали из нее при помощи специальных материа-

лов удаляют вредные примеси, особенно серу и фосфор. После выплавки готовую сталь разливают в специальные металлические сосуды — изложницы, в которых она кристаллизуется, образуя слитки (рис. 1.13). Слиток в разрезе состоит из трех зон кристаллизации: тонкой зоны мелких равноосных зерен *1*, широкой зоны столбчатых кристаллов *2*, имеющих вытянутую вдоль направления отвода теплоты форму, и средней зоны равноосных зерен (равноосные, т. е. в этой зоне нет преимущественного направления отвода теплоты, вдоль которого могли бы вытянуться зерна) *3*.

В верхней части слитка формируется усадочная раковина *4*, отрезаемая после прокатки. В средней (осевой) части слитка скапливаются легкоплавкие неметаллические примеси и газовые включения. Неметаллические примеси затвердевают и остаются между столбчатыми кристаллами, а также на стыке зоны столбчатых и равноосных кристаллов и особенно близ вертикальной оси слитка, куда они оттесняются более тугоплавкими, чем они, зернами стали.

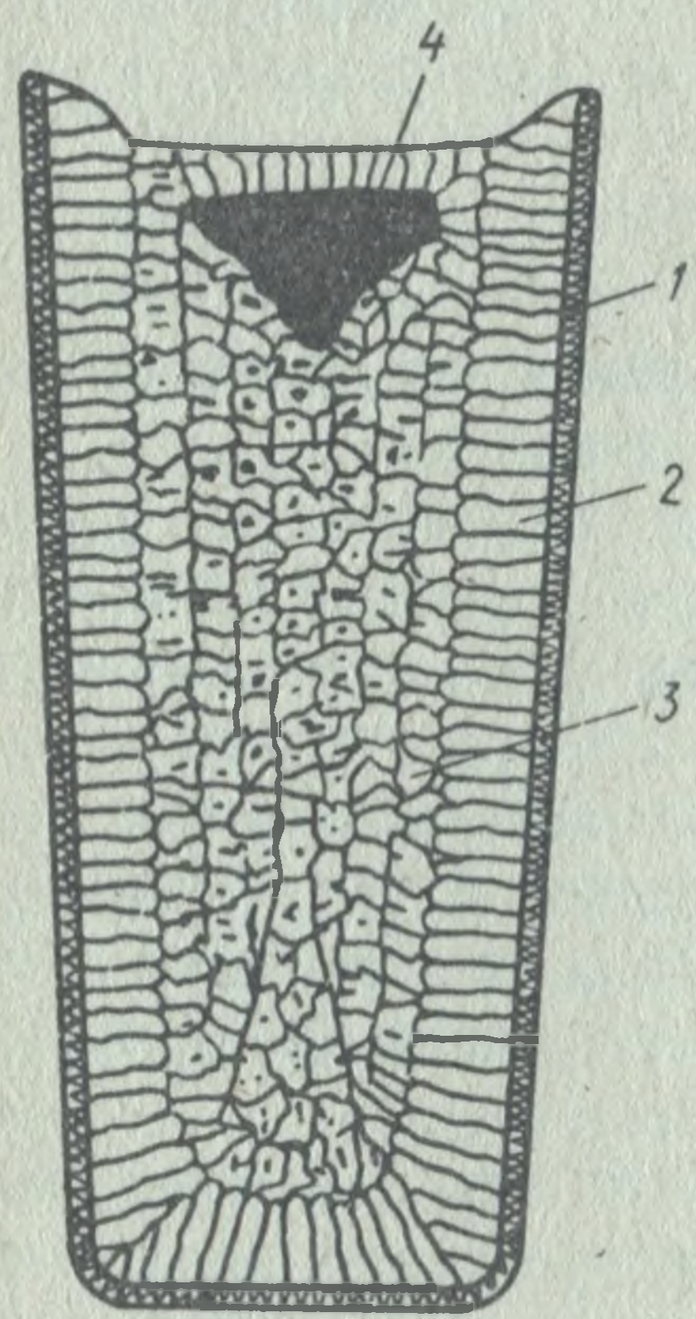


Рис. 1.13. Схема строения стального слитка

Таким образом, в затвердевающей стали, т. е. в слитке, металлургические дефекты распределяются неравномерно. И чем крупнее слиток, тем сильнее выражена эта неравномерность.

Основными металлургическими дефектами, ухудшающими свойства стали, являются сернистые соединения (сульфиды), оксиды, шлаковые включения, различные газовые пузыри, рассредоточенная усадочная рыхлость (мелкие поры, образующиеся между зернами вследствие нехватки жидкого металла). Попавшие в сталь и растворенные в ней азот, водород и кислород также ухудшают ее механические свойства.

С целью улучшения металлургического качества стали в настоящее время применяют следующие технологические меры:

1) использование отборных шихтовых материалов с минимальным исходным содержанием вредных примесей (S и P);

2) ведение плавки в специальных печах, обеспечивающих наиболее благоприятные режимы для удаления вредных примесей и исключающих попадание в сталь азота, кислорода и водорода. Наиболее качественные стали выплавляются в электродуговых и вакуумных печах индукционного нагрева;

3) обработку стали синтетическим шлаком специального состава с целью раскисления и более полной очистки от серы и неметаллических включений. Для этого выплавленную в печи сталь выпус-

кают в ковш, в котором находится заранее подготовленный синтетический шлак;

4) обработку выплавленной стали вакуумом, в процессе которой из нее выделяются растворенные в ней газы и всплывают на поверхность различные неметаллические примеси;

5) продувку жидкой стали нейтральным газом аргоном, во время которой из нее, так же как и в предыдущем случае, выделяются газы и всплывают неметаллические примеси.

В настоящее время осваивается и внедряется в производство перспективное направление получения стали непосредственно из руды минуя доменное производство. При этом прямом способе выплавки стали в специальную камеру вдуваются строго расчетные количества измельченной железной руды, оксида углерода и флюсов. В результате протекающих в реакторе реакций образуется сталь.

В заключение подчеркнем, насколько важно для обеспечения высокой надежности и долговечности изготовляемых из стали изделий добиваться еще при выплавке ее высокого металлургического качества, поскольку именно от него в решающей степени зависят ее механические свойства и работоспособность изделий.

Углеродистые стали. Углеродистые стали занимают левую часть диаграммы состояний на рис. 1.12. Пользуясь этой диаграммой для оценки свойств отожженных, т. е. находящихся в равновесном фазовом состоянии сталей, надо помнить отличия химического состава их фаз — феррита и цементита — и металлургические дефекты, которые привносятся в них при выплавке и которые влияют на их механические и другие свойства. Марганец и кремний, попадающие в сталь из чугуна, а также вводимые в нее дополнительно при раскислении, растворяются в феррите, а марганец — в цементите. Благодаря этому при сохраняющейся пластичности несколько возрастают прочность и твердость стали (пластичность и вязкость снижаются при более высоком, чем примесное, содержании Mn и Si).

Сера и фосфор снижают прочность и пластичность, а также ударную вязкость стали и поэтому являются вредными примесями. При этом фосфор, растворяясь в феррите, упрочняет его и делает хрупким, т. е. снижает вязкость стали, особенно при низких температурах. Отсюда принято считать, что фосфор придает стали хладоломкость.

Сера в фазах, находящихся в стали, растворяться не может. Поэтому в стали она располагается между ее зернами в виде легкоплавкого соединения FeS. Это соединение, как бы разъединяя зерна, снижает прочность, пластичность и вязкость стали. Кроме того, соединение FeS образует с соседними зернами стали плавящуюся при 988 °С смесь. Поэтому сильно пораженная серой сталь при ковке ($T \geqslant 1100$ °С) разрушается на фрагменты. В связи с этим говорят, что сера придает стали красноломкость. Плавящиеся при 1620 °С зерна MnS находятся внутри зерен стали. Они ме-

нее вредны, чем оторочки вокруг ее зерен. Кислород, как и сера, в твердой стали не растворяется, но присутствует в ней в виде различных оксидов, имеющих форму разнообразных по очертаниям и размерам зерен (SiO_2, FeO, MnO и т. д.), называемых неметаллическими включениями (НМВ). Эти включения делают сталь хрупкой и снижают ее прочность.

Азот и водород способны растворяться в феррите и образовывать мелкие зерна нитридов и гидридов. Все это приводит к росту твердости и потере пластичности, а также вязкости стали.

Содержание углерода существенно влияет на свойства стали, поскольку от него зависят относительные количества находящихся в стали мягкого и пластичного феррита и очень твердого, но хрупкого цементита. В связи с этим тесно переплетается классификация сталей по содержанию углерода и назначению. Так, низкоуглеродистые стали (до 0,25 % углерода) очень пластичны, но сравнительно малопрочны и используются для изготовления слабонагруженных изделий. Среднеуглеродистые стали (0,3—0,6 % углерода) сочетают в себе достаточно высокий комплекс вязкостно-прочностных свойств и являются основными конструкционными машиноподелочными материалами. Высокоуглеродистые стали (0,7—1,3 % углерода) обладают очень высокой твердостью, низкими пластичностью и вязкостью. Из них изготовляются режущий и другой инструмент, а также изделия с высокой износостойкостью.

По назначению углеродистые стали делятся на конструкционные и инструментальные.

К конструкционным сталям относятся и строительные стали. Вместе они составляют класс машиноподелочных и строительных сталей, используемых в машиностроении и строительном деле.

В зависимости от характера и величины нагрузки, прикладываемой к изготовляемым из них изделиям и конструкциям, эти стали принято делить на стали обыкновенного качества и качественные.

В сталях обыкновенного качества допускается большее количество серы, фосфора, НМВ, газов и других примесей, чем в качественных. В свою очередь, они делятся на три группы, свойства которых гарантируются ГОСТ 380—71.

У группы А гарантируются только механические свойства. Химический состав не гарантируется. Поэтому из нее можно делать изделия только применяемые механическую обработку (снятие стружки). Нагревы, сварку применять нельзя, так как изменяющиеся при этом свойства можно восстановить только термической обработкой, но для этого необходимо знать содержание углерода в стали, т. е. ее химсостав.

Стали этой группы маркируются так: Ст0, Ст1, ..., Ст6. Гарантируемая прочность $\sigma_в$ находится в пределах 300—625 МПа, а пластичность $\delta = 22 \div 14$ %.

Сталь группы Б (БСт0, БСт1, ..., БСт6) выпускается с гарантируемым химическим составом. Поэтому при изготовлении изделий ее можно нагревать, например для ковки, а потом при помощи термической обработки исправлять нарушенную структуру и придавать необходимые свойства.

Стали группы В (ВСт1, ..., ВСт6) поставляются по механическим свойствам и химическому составу. Они идут для изготовления сварных конструкций.

К маркировке недораскисленных («кипящих») сталей прибавляются буквы кп, например, Ст1кп, БСт1кп.

Качественные углеродистые конструкционные стали выплавляются при более строгом соблюдении технологии выплавки, а содержание вредных примесей серы и фосфора в них не должно превышать 0,03 % каждого. Их маркировка состоит из двузначного числа, означающего содержание углерода в сотых долях процента: сталь 05, 08, 10, 15, 20, ..., 40, 45, ..., 85. Из-за высокой хрупкости конструкционные углеродистые стали не содержат углерода свыше 0,85 %. Буква А в конце марки свидетельствует об улучшенном металлургическом качестве стали: более полном раскислении, мелком наследственном зерне, более точном химическом составе и меньшем содержании серы и фосфора (менее 0,02 % каждого). Из этих сталей делаются детали ответственного назначения.

Низкоуглеродистые стали могут выплавляться и как «кипящие»: 10кп, 15кп, 20кп. Важным преимуществом «кипящей» стали является отсутствие у ее слитков сосредоточенной усадочной раковины, благодаря чему на 10—20 % увеличивается выход годного металла. Что касается находящихся в слитке многочисленных заполненных оксидом углерода пузырей, то они во время прокатки или ковки завариваются.

Инструментальные углеродистые стали являются высокоуглеродистыми сталями, содержащими 0,7—1,3% углерода. Это гарантирует им высокую твердость, необходимую для придания инструменту режущих свойств и износостойкости.

Их маркируют У7, У7А, ..., У13, У13А. Цифра означает содержание углерода в десятых долях процента, а буква А — улучшенное металлургическое качество.

Чугуны. Показанные в правой части диаграммы состояний на рис. 1.12 чугуны являются двухкомпонентными белыми чугунами, в которых весь углерод химически связан в цементит.

В реально выплавляемых промышленностью чугунах определенная часть углерода может находиться в свободном состоянии в виде графита — темного кристаллического вещества с гексагональной решеткой. В связи с отмеченным чугуны принято делить на белые и серые, имеющие белый, светлый излом ввиду отсутствия графита и чугуна с графитом, т.е. каким-то количеством свободного углерода.

Чугун с графитом может условно рассматриваться как сталь, «испорченная» наличием графита

нее вредны, чем оторочки вокруг ее зерен. Кислород, как и сера, в твердой стали не растворяется, но присутствует в ней в виде различных оксидов, имеющих форму разнообразных по очертаниям и размерам зерен (SiO_2, FeO, MnO и т. д.), называемых неметаллическими включениями (НМВ). Эти включения делают сталь хрупкой и снижают ее прочность.

Азот и водород способны растворяться в феррите и образовывать мелкие зерна нитридов и гидридов. Все это приводит к росту твердости и потере пластичности, а также вязкости стали.

Содержание углерода существенно влияет на свойства стали, поскольку от него зависят относительные количества находящихся в стали мягкого и пластичного феррита и очень твердого, но хрупкого цементита. В связи с этим тесно переплетается классификация сталей по содержанию углерода и назначению. Так, низкоуглеродистые стали (до 0,25 % углерода) очень пластичны, но сравнительно малопрочны и используются для изготовления слабонагруженных изделий. Среднеуглеродистые стали (0,3—0,6 % углерода) сочетают в себе достаточно высокий комплекс вязкостно-прочностных свойств и являются основными конструкционными машиноподелочными материалами. Высокоуглеродистые стали (0,7—1,3 % углерода) обладают очень высокой твердостью, низкими пластичностью и вязкостью. Из них изготовляются режущий и другой инструмент, а также изделия с высокой износостойкостью.

По назначению углеродистые стали делятся на конструкционные и инструментальные.

К конструкционным сталям относятся и строительные стали. Вместе они составляют класс машиноподелочных и строительных сталей, используемых в машиностроении и строительном деле.

В зависимости от характера и величины нагрузки, прикладываемой к изготовляемым из них изделиям и конструкциям, эти стали принято делить на стали обыкновенного качества и качественные.

В сталях обыкновенного качества допускается большее количество серы, фосфора, НМВ, газов и других примесей, чем в качественных. В свою очередь, они делятся на три группы, свойства которых гарантируются ГОСТ 380—71.

У группы А гарантируются только механические свойства. Химический состав не гарантируется. Поэтому из нее можно делать изделия только применяемые механическую обработку (снятие стружки). Нагревы, сварку применять нельзя, так как изменяющиеся при этом свойства можно восстановить только термической обработкой, но для этого необходимо знать содержание углерода в стали, т. е. ее химсостав.

Стали этой группы маркируются так: Ст0, Ст1, ..., Ст6. Гарантируемая прочность $\sigma_в$ находится в пределах 300—625 МПа, а пластичность $\delta = 22 \div 14$ %.

Сталь группы Б (БСт0, БСт1, ..., БСт6) выпускается с гарантируемым химическим составом. Поэтому при изготовлении изделий ее можно нагревать, например для ковки, а потом при помощи термической обработки исправлять нарушенную структуру и придавать необходимые свойства.

Стали группы В (ВСт1, ..., ВСт6) поставляются по механическим свойствам и химическому составу. Они идут для изготовления сварных конструкций.

К маркировке недораскисленных («кипящих») сталей прибавляются буквы кп, например, Ст1кп, БСт1кп.

Качественные углеродистые конструкционные стали выплавляются при более строгом соблюдении технологии выплавки, а содержание вредных примесей серы и фосфора в них не должно превышать 0,03 % каждого. Их маркировка состоит из двузначного числа, означающего содержание углерода в сотых долях процента: сталь 05, 08, 10, 15, 20, ..., 40, 45, ..., 85. Из-за высокой хрупкости конструкционные углеродистые стали не содержат углерода свыше 0,85 %. Буква А в конце марки свидетельствует об улучшенном металлургическом качестве стали: более полном раскислении, мелком наследственном зерне, более точном химическом составе и меньшем содержании серы и фосфора (менее 0,02 % каждого). Из этих сталей делаются детали ответственного назначения.

Низкоуглеродистые стали могут выплавляться и как «кипящие»: 10кп, 15кп, 20кп. Важным преимуществом «кипящей» стали является отсутствие у ее слитков сосредоточенной усадочной раковины, благодаря чему на 10—20 % увеличивается выход годного металла. Что касается находящихся в слитке многочисленных заполненных оксидом углерода пузырей, то они во время прокатки или ковки завариваются.

Инструментальные углеродистые стали являются высокоуглеродистыми сталями, содержащими 0,7—1,3% углерода. Это гарантирует им высокую твердость, необходимую для придания инструменту режущих свойств и износостойкости.

Их маркируют У7, У7А, ..., У13, У13А. Цифра означает содержание углерода в десятых долях процента, а буква А — улучшенное металлургическое качество.

Чугуны. Показанные в правой части диаграммы состояний на рис. 1.12 чугуны являются двухкомпонентными белыми чугунами, в которых весь углерод химически связан в цементит.

В реально выплавляемых промышленностью чугунах определенная часть углерода может находиться в свободном состоянии в виде графита — темного кристаллического вещества с гексагональной решеткой. В связи с отмеченным чугуны принято делить на белые и серые, имеющие белый, светлый излом ввиду отсутствия графита и чугуна с графитом, т .е. каким-то количеством свободного углерода.

Чугун с графитом может условно рассматриваться как сталь, «испорченная» наличием графитных включений, т. е. его можно

бора охлаждающей среды, зависят строение и характер получающихся при его распаде продуктов. Возьмем для простоты аустенит, имеющий эвтектоидный состав, т. е. 0,8 % углерода, и рассмотрим, какие из него будут получаться продукты при разных скоростях охлаждения.

При медленном охлаждении, например в печи, аустенит распадается на грубую, крупнопластинчатую смесь, состоящую из пластинок феррита и цементита, именуемую перлитом — П: А → Ф + + Ц = П. Распад происходит при температурах, близких линии *PSK* (727 °С). Перлит имеет твердость 180—200 кгс/мм² НВ.

При ýскоренном охлаждении, например на открытом воздухе, распад аустенита произойдет в интервале более низких температур, и при этом получается более тонкая смесь пластинок феррита и цементита, называемая сорбитом — С. Твердость сорбита около 250 кгс/мм² НВ.

При дальнейшем ускорении охлаждения (например, в минеральном масле) распад аустенита происходит при еще более низких температурах, а получающаяся смесь феррита с цементитом, называемая троститом, оказывается еще более тонкой и твердой (около 300 кгс/мм²).

Здесь следует заметить, что существует такая достаточно большая скорость охлаждения аустенита, начиная с которой он уже не успевает распадаться на феррито-цементнуую смесь, а переохлаждаясь до вполне определенной температуры, превращается в пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α-Fe. Этот раствор, называемый мартенситом, очень тверд и хрупок. Его твердость составляет 600 кгс/мм² НВ. Мартенситное превращение требует непрерывного охлаждения от температурной точки $M_н$ (начало мартенситного превращения) до точки $M_к$ (конец мартенситного превращения). Оно происходит в результате бездиффузионного аллотропического превращения γ-Fe а α-Fe (ГЦК-решетки в ОЦК), при котором вследствие отсутствия диффузии из-за низкой температуры весь находившийся в аустените растворенный углерод остается в новой ОЦК-решетке и оказывается растворенным в α-Fe. Но так как растворимость углерода в α-Fe значительно меньше, то получается пересыщенный раствор с большими искажениями решетки и внутренними напряжениями. Эти искажения и напряжения называются *закалочными*, их появлению способствует очень большая плотность возникающих дислокаций.

Минимальная скорость охлаждения, при которой обеспечивается превращение аустенита в мартенсит, называется *критической скоростью закалки*.

Охлаждение аустенита в воде обеспечивает закритическую скорость и гарантирует получение мартенситной структуры, характеризующейся высокой твердостью и практически нулевыми пластичностью и вязкостью.

Виды термической обработки. Из всего вышеизложенного следует, что изменяя скорость охлаждения аустенита можно получать продукты с различными свойствами — от самых мягких и пластичных до наиболее твердых и хрупких. На этом и основано применение таких широко и часто используемых в промышленности видов предварительной термической обработки углеродистых сталей, как отжиг, нормализация и закалка.

Отжиг служит главным образом для снижения твердости стальных заготовок перед механической обработкой. Для его проведения заготовки из эвтектоидной и доэвтектоидной стали нагревают до аустенитного состояния, а из заэвтектоидной — до аустенитно-цементитного, делают выдержку для выравнивания состава аустенита и медленно охлаждают, выключив источник теплоснабжения печи, с закрытой, а иногда с открытой дверцей.

Нормализацией может быть достигнут ряд целей: измельчение выросшего по какой-то причине зерна стали, разрушение затрудняющей механическую обработку цементитной сетки вокруг зерен заэвтектоидной стали ($>0{,}8$ % углерода), а также перекристаллизация грубой и хрупкой столбчато-дендритной структуры литой стали в мелкозернистую, равноосную.

Для заготовок из мягкой по природе низкоуглеродистой стали нормализация с целью экономии времени проводится вместо отжига, а для деталей неответственного назначения из любой стали заменяет закалку. При нормализации сталь нагревают до температуры выше линии *GSE* на 30—50 °С, затем делают выдержку и охлаждают на спокойном воздухе.

При таком охлаждении низкоуглеродистых сталей получается более тонкая по строению, чем при отжиге, смесь зерен феррита и перлита, но вследствие небольшого содержания углерода твердость оказывается не намного выше.

Средне- и особенно высокоуглеродистые стали при этом приобрерают структуру мелкозернистого, мелкопластинчатого перлита, называемого сорбитом. Поэтому прочность оказывается выше, чем при отжиге.

Вокруг зерен высокоуглеродистой (заэвтектоидной) стали цементитная оболочка сформироваться не успевает, и выделяющийся цементит оказывается внутри зерен перлита в виде изолированных друг от друга зернышек. С таким строением она легче обрабатывается режущим инструментом. Но, чтобы уменьшить ее твердость и дополнительно облегчить снятие стружки, заэвтектоидную сталь после нормализации следует подвергнуть неполному отжигу с нагревом до температуры выше линии *PSK* на 30—50 °С.

Закалка является первой операцией окончательной термообработки изделий. Под окончательной понимают такую термообработку, которая придает стали ту структуру и свойства, которые необходимы изделию для выполнения своих эксплуатационных функций.

бора охлаждающей среды, зависят строение и характер получающихся при его распаде продуктов. Возьмем для простоты аустенит, имеющий эвтектоидный состав, т. е. 0,8 % углерода, и рассмотрим, какие из него будут получаться продукты при разных скоростях охлаждения.

При медленном охлаждении, например в печи, аустенит распадается на грубую, крупнопластинчатую смесь, состоящую из пластинок феррита и цементита, именуемую перлитом — П: А → Ф + + Ц = П. Распад происходит при температурах, близких линии *PSK* (727 °С). Перлит имеет твердость 180—200 кгс/мм² НВ.

При ýскоренном охлаждении, например на открытом воздухе, распад аустенита произойдет в интервале более низких температур, и при этом получается более тонкая смесь пластинок феррита и цементита, называемая сорбитом — С. Твердость сорбита около 250 кгс/мм² НВ.

При дальнейшем ускорении охлаждения (например, в минеральном масле) распад аустенита происходит при еще более низких температурах, а получающаяся смесь феррита с цементитом, называемая троститом, оказывается еще более тонкой и твердой (около 300 кгс/мм²).

Здесь следует заметить, что существует такая достаточно большая скорость охлаждения аустенита, начиная с которой он уже не успевает распадаться на феррито-цементнуую смесь, а переохлаждаясь до вполне определенной температуры, превращается в пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α-Fe. Этот раствор, называемый мартенситом, очень тверд и хрупок. Его твердость составляет 600 кгс/мм² НВ. Мартенситное превращение требует непрерывного охлаждения от температурной точки $M_н$ (начало мартенситного превращения) до точки $M_к$ (конец мартенситного превращения). Оно происходит в результате бездиффузионного аллотропического превращения γ-Fe а α-Fe (ГЦК-решетки в ОЦК), при котором вследствие отсутствия диффузии из-за низкой температуры весь находившийся в аустените растворенный углерод остается в новой ОЦК-решетке и оказывается растворенным в α-Fe. Но так как растворимость углерода в α-Fe значительно меньше, то получается пересыщенный раствор с большими искажениями решетки и внутренними напряжениями. Эти искажения и напряжения называются *закалочными*, их появлению способствует очень большая плотность возникающих дислокаций.

Минимальная скорость охлаждения, при которой обеспечивается превращение аустенита в мартенсит, называется *критической скоростью закалки*.

Охлаждение аустенита в воде обеспечивает закритическую скорость и гарантирует получение мартенситной структуры, характеризующейся высокой твердостью и практически нулевыми пластичностью и вязкостью.

Виды термической обработки. Из всего вышеизложенного следует, что изменяя скорость охлаждения аустенита можно получать продукты с различными свойствами — от самых мягких и пластичных до наиболее твердых и хрупких. На этом и основано применение таких широко и часто используемых в промышленности видов предварительной термической обработки углеродистых сталей, как отжиг, нормализация и закалка.

Отжиг служит главным образом для снижения твердости стальных заготовок перед механической обработкой. Для его проведения заготовки из эвтектоидной и доэвтектоидной стали нагревают до аустенитного состояния, а из заэвтектоидной — до аустенитно-цементитного, делают выдержку для выравнивания состава аустенита и медленно охлаждают, выключив источник теплоснабжения печи, с закрытой, а иногда с открытой дверцей.

Нормализацией может быть достигнут ряд целей: измельчение выросшего по какой-то причине зерна стали, разрушение затрудняющей механическую обработку цементитной сетки вокруг зерен заэвтектоидной стали ($>0{,}8$ % углерода), а также перекристаллизация грубой и хрупкой столбчато-дендритной структуры литой стали в мелкозернистую, равноосную.

Для заготовок из мягкой по природе низкоуглеродистой стали нормализация с целью экономии времени проводится вместо отжига, а для деталей неответственного назначения из любой стали заменяет закалку. При нормализации сталь нагревают до температуры выше линии *GSE* на 30—50 °С, затем делают выдержку и охлаждают на спокойном воздухе.

При таком охлаждении низкоуглеродистых сталей получается более тонкая по строению, чем при отжиге, смесь зерен феррита и перлита, но вследствие небольшого содержания углерода твердость оказывается не намного выше.

Средне- и особенно высокоуглеродистые стали при этом приобрерают структуру мелкозернистого, мелкопластинчатого перлита, называемого сорбитом. Поэтому прочность оказывается выше, чем при отжиге.

Вокруг зерен высокоуглеродистой (заэвтектоидной) стали цементитная оболочка сформироваться не успевает, и выделяющийся цементит оказывается внутри зерен перлита в виде изолированных друг от друга зернышек. С таким строением она легче обрабатывается режущим инструментом. Но, чтобы уменьшить ее твердость и дополнительно облегчить снятие стружки, заэвтектоидную сталь после нормализации следует подвергнуть неполному отжигу с нагревом до температуры выше линии *PSK* на 30—50 °С.

Закалка является первой операцией окончательной термообработки изделий. Под окончательной понимают такую термообработку, которая придает стали ту структуру и свойства, которые необходимы изделию для выполнения своих эксплуатационных функций.

В этом случае изделию дается так называемая истинная закалка, обеспечивающая получение мартенситной структуры. Только получив предварительно мартенсит и подвергнув его затем соответствующему виду отпуска можно получить у стали наилучший комплекс механических свойств, т. е. наиболее благоприятное сочетание твердости, прочности, вязкости и пластичности, необходимое для надежной и долговечной работы изделия.

Для закалки на мартенсит сталь нагревается до температуры на 30—50 °С выше линии *GSK*, выдерживается для выравнивания аустенита по углероду и другим растворенным в нем элементам (например, легирующим, если сталь легированная), а затем охлаждается со скоростью не менее критической. Для углеродистых сталей закалочной средой является вода.

Закалка с меньшей скоростью дает более мягкие, чем мартенсит, структуры — тростит или сорбит, обеспечивающие более низкие комплексы механических свойств.

Отпуск стали является заключительной операцией термообработки, выполняемой после закалки. Его основной целью является трансформирование полученного в результате закалки мартенсит в структуру, обладающую оптимальным комплексом вязкостно-прочностных свойств, способных обеспечить надежную и долговечную работу изделия в заданных условиях эксплуатации.

Он заключается в нагреве закаленной детали до какой-то определенной, заданной температуры, лежащей ниже 1-й критической точки Д. К. Чернова (727 °С), выдержке при этой температуре, достаточной для завершения необходимых структурно-фазовых превращений, и охлаждении с любой скоростью.

В закаленной стали при отпуске благодаря развитию диффузионных процессов постепенно устраняются искажения кристаллической решетки, «рассасываются» дислокации и снимаются внутренние напряжения, вследствие чего устраняется хрупкость, снижается прочность, повышаются пластичность и вязкость. Полное развитие эти процессы получают при 600—650 °С.

Основой упомянутых процессов является происходящий при нагреве распад мартенсита на ферритно-цементитную смесь. Пересыщенность кристаллической решетки мартенсита углеродом порождает в нем все искажения и напряжения и обусловливает его неравновесное состояние с большим избытком свободной энергии.

Производимый при отпуске нагрев вызывает в закаленной стали диффузионные процессы, приводящие к выходу атомов углерода из перенапряженной решетки альфа-железа, образованию сначала (при $T < 300$ °С) частичек эпсилон-карбида, а потом (при $T > 300$ °С) цементита, что и приводит к постепенному устранению искажений решетки, уменьшению плотности дислокаций, снижению до полного исчезновения внутренних напряжений и уменьшению запаса свободной энергии.

Описываемые превращения оказывают влияние на получающуюся при отпуске структуру, а через нее — на комплекс механических свойств. Так как степень завершенности диффузионных процессов в основном зависит от температуры, то характер и уровень получающихся свойств зависят от температуры отпуска. В машиностроении исторически сложились три большие группы стальных изделий с принципиально различающимися по характеру комплексами механических свойств:

I группа (режущий и другие виды инструмента) для выполнения своих эксплуатационных функций должна в первую очередь иметь высокую твердость своего материала. Без этого невозможны ни снятие стружки резцом с обрабатываемой детали, ни его продолжительная работа из-за быстрого износа;

II группа (пружины, рессоры, торсионы и другие изделия) требует от своего материала прежде всего высокого предела упругости, сочетающегося с удовлетворительной вязкостью;

III группа изделий испытывает в работе значительные, как правило, ударные, циклические или знакопеременные нагрузки. Поэтому для обеспечения их прочности и долговечности решающее значение имеет высокая ударная вязкость их материала.

В связи с изложенным в практике термической обработки сложились три вида отпуска соответственно для каждой из перечисленных групп изделий.

Низкий отпуск производится при 150—180 °С (иногда при 220—250 °С). При этих температурах из решетки мартенсита выходит лишь часть «лишнего» углерода, который образует высокодисперсные, не видимые в микроскоп частицы эпсилон-карбида.

Получающаяся структура представляет собой смесь малоуглеродистого мартенсита, называемого мартенситом отпуска, с мельчайшими частицами эпсилон-карбида. Эта структура обладает высокой твердостью. Однако вследствие хотя и уменьшающихся, но все еще сохраняющихся искажений и внутренних напряжений ее пластичность и вязкость повышаются незначительно.

Средний отпуск производится при 350—450 °С (иногда 470 °С). При таком нагреве мартенсит полностью распадается на ферритно-цементитную смесь, так как весь избыточный углерод покидает решетку мартенсита (и образуется феррит), а частицы эпсилон-карбида в результате перестройки и коагуляции превращаются в зернышки цементита. Образующаяся при среднем отпуске тонкая смесь феррита и зернистого цементита называется троститом отпуска. Она обладает высокими упругими свойствами и достаточной для долговечной работы вязкостью.

Высокий отпуск осуществляется при 500—650 °С. Он практически полностью устраняет искажения кристаллической решетки альфа-железа и снимает закалочные напряжения. Плотность дислокаций сводится к минимуму.

В этом случае изделию дается так называемая истинная закалка, обеспечивающая получение мартенситной структуры. Только получив предварительно мартенсит и подвергнув его затем соответствующему виду отпуска можно получить у стали наилучший комплекс механических свойств, т. е. наиболее благоприятное сочетание твердости, прочности, вязкости и пластичности, необходимое для надежной и долговечной работы изделия.

Для закалки на мартенсит сталь нагревается до температуры на 30—50 °С выше линии *GSK*, выдерживается для выравнивания аустенита по углероду и другим растворенным в нем элементам (например, легирующим, если сталь легированная), а затем охлаждается со скоростью не менее критической. Для углеродистых сталей закалочной средой является вода.

Закалка с меньшей скоростью дает более мягкие, чем мартенсит, структуры — тростит или сорбит, обеспечивающие более низкие комплексы механических свойств.

Отпуск стали является заключительной операцией термообработки, выполняемой после закалки. Его основной целью является трансформирование полученного в результате закалки мартенсит в структуру, обладающую оптимальным комплексом вязкостно-прочностных свойств, способных обеспечить надежную и долговечную работу изделия в заданных условиях эксплуатации.

Он заключается в нагреве закаленной детали до какой-то определенной, заданной температуры, лежащей ниже 1-й критической точки Д. К. Чернова (727 °С), выдержке при этой температуре, достаточной для завершения необходимых структурно-фазовых превращений, и охлаждении с любой скоростью.

В закаленной стали при отпуске благодаря развитию диффузионных процессов постепенно устраняются искажения кристаллической решетки, «рассасываются» дислокации и снимаются внутренние напряжения, вследствие чего устраняется хрупкость, снижается прочность, повышаются пластичность и вязкость. Полное развитие эти процессы получают при 600—650 °С.

Основой упомянутых процессов является происходящий при нагреве распад мартенсита на ферритно-цементитную смесь. Пересыщенность кристаллической решетки мартенсита углеродом порождает в нем все искажения и напряжения и обусловливает его неравновесное состояние с большим избытком свободной энергии.

Производимый при отпуске нагрев вызывает в закаленной стали диффузионные процессы, приводящие к выходу атомов углерода из перенапряженной решетки альфа-железа, образованию сначала (при $T < 300$ °С) частичек эпсилон-карбида, а потом (при $T > 300$ °С) цементита, что и приводит к постепенному устранению искажений решетки, уменьшению плотности дислокаций, снижению до полного исчезновения внутренних напряжений и уменьшению запаса свободной энергии.

Описываемые превращения оказывают влияние на получающуюся при отпуске структуру, а через нее — на комплекс механических свойств. Так как степень завершенности диффузионных процессов в основном зависит от температуры, то характер и уровень получающихся свойств зависят от температуры отпуска. В машиностроении исторически сложились три большие группы стальных изделий с принципиально различающимися по характеру комплексами механических свойств:

I группа (режущий и другие виды инструмента) для выполнения своих эксплуатационных функций должна в первую очередь иметь высокую твердость своего материала. Без этого невозможны ни снятие стружки резцом с обрабатываемой детали, ни его продолжительная работа из-за быстрого износа;

II группа (пружины, рессоры, торсионы и другие изделия) требует от своего материала прежде всего высокого предела упругости, сочетающегося с удовлетворительной вязкостью;

III группа изделий испытывает в работе значительные, как правило, ударные, циклические или знакопеременные нагрузки. Поэтому для обеспечения их прочности и долговечности решающее значение имеет высокая ударная вязкость их материала.

В связи с изложенным в практике термической обработки сложились три вида отпуска соответственно для каждой из перечисленных групп изделий.

Низкий отпуск производится при 150—180 °С (иногда при 220—250 °С). При этих температурах из решетки мартенсита выходит лишь часть «лишнего» углерода, который образует высокодисперсные, не видимые в микроскоп частицы эпсилон-карбида.

Получающаяся структура представляет собой смесь малоуглеродистого мартенсита, называемого мартенситом отпуска, с мельчайшими частицами эпсилон-карбида. Эта структура обладает высокой твердостью. Однако вследствие хотя и уменьшающихся, но все еще сохраняющихся искажений и внутренних напряжений ее пластичность и вязкость повышаются незначительно.

Средний отпуск производится при 350—450 °С (иногда 470 °С). При таком нагреве мартенсит полностью распадается на ферритно-цементитную смесь, так как весь избыточный углерод покидает решетку мартенсита (и образуется феррит), а частицы эпсилон-карбида в результате перестройки и коагуляции превращаются в зернышки цементита. Образующаяся при среднем отпуске тонкая смесь феррита и зернистого цементита называется троститом отпуска. Она обладает высокими упругими свойствами и достаточной для долговечной работы вязкостью.

Высокий отпуск осуществляется при 500—650 °С. Он практически полностью устраняет искажения кристаллической решетки альфа-железа и снимает закалочные напряжения. Плотность дислокаций сводится к минимуму.

В результате закалки и низкого отпуска на поверхности получается твердый, износостойкий мартенситный слой с зернышками карбонитридов.

Понятие о легированных сталях. *Легированной сталью* называется такая сталь, в которую кроме углерода вводятся один или несколько других элементов, называемых легирующими, с целью улучшения ее механических и технологических свойств или получения каких-либо новых служебных свойств, не присущих углеродистым сталям. По назначению легированные стали делятся на конструкционные, инструментальные и стали и сплавы с особыми свойствами. В легированных деталях должно быть не менее 50 % железа, при меньших количествах получаются сплавы с особыми свойствами.

Для изготовления тяжелонагруженных деталей ответственного назначения у углеродистых сталей не хватает прочности и вязкости. Компенсировать этот недостаток за счет увеличения сечения детали нерационально, так как из-за недостаточной прокаливаемости углеродистых сталей внутренняя часть сечения оказывается непрочной. Под прокаливаемостью понимается способность стали закаливаться на определенную глубину. Ее можно оценивать, например, по наибольшему диаметру, при котором деталь из данной стали прокаливается насквозь, приобретая во всем сечении мартенситную структуру.

Для улучшения механических свойств в конструкционные легированные стали вводятся такие элементы, как хром, никель, вольфрам, молибден, ванадий, титан и бор, а также марганец и кремний в количествах, превышающих их обычное содержание в углеродистых сталях.

Оптимальным содержанием вводимых в конструкционную сталь легирующих элементов является такое, которое обеспечивает сквозную прокаливаемость изготовляемых из данной стали деталей.

Конструкционные легированные стали маркируются следующим образом: вначале ставится двузначное число, выражающее среднее содержание углерода в стали в сотых долях процента, затем русскими заглавными буквами перечисляются находящиеся в стали легирующие элементы. При этом приняты следующие обозначения: Х—Cr, Н—Ni, М—Mo, Г—Mn, Д—Cu, В—W, Ф—V, Б—Nb, Р—B, К—Co, С—Si, Т—Ti, Ц—Zr, Ю—Al, П—P, А—N. Проставляемая после буквы цифра означает среднее количество данного элемента в процентах. Если элемента менее 1 %, то цифра не ставится. Стоящая в конце маркировки буква А свидетельствует о высоком металлургическом качестве стали и прежде всего о том, что в ней серы и фосфора менее 0,02 % каждого.

Конструкционные легированные стали обладают более высокими вязкостно-прочностными свойствами по сравнению с углеродистыми благодаря следующим преимуществам: все они (кроме марганцовистых) — природно мелкозернистые стали; они глубже прокали-

ваются и закаливаются не в воде, а в масле, а некоторые на воздухе, благодаря чему у них получаются очень малые закалочные напряжения и следовательно, более высокие пластичность и вязкость: при отпуске на равные с углеродистыми сталями твердость и прочность требуют более высокой температуры и большей выдержки, вследствие чего в них полнее снимаются закалочные напряжения и вязкость оказывается выше. Кроме того, никель (до 5 %) и хром (до 3 %), растворяясь в феррите, повышают его прочность и вязкость, чем в отличие от других элементов более значительно улучшают комплекс механических свойств стали.

Таким образом, легирование конструкционных сталей благоприятно отражается на комплексе их механических свойств.

Стали для режущего инструмента должны быть твердыми и износостойкими. Поэтому они должны содержать достаточное количество углерода (0,8—1,0 %) и карбидобразующих элементов, главным образом хрома. Получающаяся у них после закалки и низкого отпуска структура (мартенсит отпуска с равномерно распределенными карбидами) обеспечивает высокие режущие свойства инструмента. Наиболее часто используются следующие марки легированных инструментальных сталей: Х, 9ХС, ХГСВФ (стали I группы).

В маркировке инструментальных сталей содержание углерода указывается в десятых долях процента, а отсутствие цифры свидетельствует о том, что углерода содержится около 1 %. Отсутствие цифр после символов таких элементов, как хром, кремний и вольфрам, означает, что их количество может доходить до 1,5 %.

Из перечисленных выше сталей делаются резцы, фрезы, сверла и другой режущий инструмент. Высоколегированные инструментальные стали, содержащие до 1 % С и до 25 % W, Cr, V, способны сохранять высокую твердость и резать металл при разогреве до 500 °С и более. Благодаря этому они обеспечивают высокую скорость резанни (до 50 м/мин) и называются быстрорежущими. Они обозначаются буквой Р: Р18, Р12, Р9, Р6М5К5 и т. д.

Еще более высокие режущие свойства показывают твердосплавные пластины, которыми оснащают инструмент. Они превосходят быстрорежущую сталь по скорости резания и теплостойкости, достигающей 900—1000 °С.

Режущие пластины изготовляют методом спекания при температуре до 1400 °С порошков карбидов, тщательно смешанных с небольшим количеством порошка и кобальта, используемого в качестве пластичной связки.

Изготовляемые таким образом металлокерамические сплавы делятся на три группы: группа ВК (ВК2, ВК3) содержит карбид вольфрама WC (В) и кобальт (К), количество которого в процентах указано цифрой (остальное — WC); группа ТК (Т5К10, Т30К4), включающая карбиды титана (Т), вольфрама и кобальт. Количество TiC и Co указаны цифрами, стоящими после букв Т и К (ос-

тальное — WC); группа ТТК, например, ТТ7К12, содержащая 7 % карбидов титана и тантала (4 % TiC + 3 % TaC), 12 % Co и 81 % WC. К сталям с особыми свойствами относятся прежде всего коррозионно-стойкие и жаропрочные стали.

Коррозионно-стойкими называются стали, противодействующие поверхностному разрушению под действием агрессивных газовых или жидких сред.

Газовой коррозии хорошо противостоят нержавеющие стали, имеющие не менее 12 % Cr: 12Х13, 40Х13. Они устойчивы на воздухе, в воде, в паровой среде. Из них делают клапаны гидропрессов, предметы домашнего обихода, хирургический инструмент. Сталь с большим содержанием хрома 12Х17 является кислотостойкой. Сталь 08Х17Т, содержащая титан, хорошо противостоит межкристаллитной коррозии (МКК), поэтому годна для изготовления сварных конструкций.

Еще большую коррозионную стойкость имеют хромоникелевые кислотостойкие стали с аустенитной структурой 12Х18Н9 и 12Х18Н9Т. Последняя противостоит МКК.

Другими способами защиты металла от коррозии являются оксидирование и фосфатирование, т. е. покрытие оксидными или фосфатными пленками. Применяются также различные металлические покрытия, например цинкование, лужение (оловом), хромирование, никелирование и т. д.

Жаропрочными называются стали, способные продолжительно работать под нагрузкой при повышенных (свыше 400 °С) и высоких (свыше 650 °С) температурах. Для этого они прежде всего должны быть жаростойкими (окалиностойкими). Сопротивление окалинообразованию при высоких температурах обеспечивается образующейся на их поверхности плотной оксидной пленкой из Cr_2O_3, Al_2O_3 или SiO_2, которая останавливает дальнейшее окисление в глубину. В связи с этим в жаропрочных сталях нужны хром, алюминий или кремний.

Для упрочнения феррита в стали, работающие при 400—580 °С (котлы, пароперегреватели, трубопроводы), вводятся молибден, ванадий, хром: 12МХ, 15ХМ, 12Х1МФ.

Для работы при повышенных давлениях и температурах свыше 600 °С применяются стали с аустенитной структурой 09Х14Н16Б, 08Х18Н10Т и др. Температуры 800—1100 °С выдерживают лопатки турбин из жаропрочных сплавов на никелевой основе ХН77ТЮР, ХН55ВМТФКЮ, в которых никеля содержится соответственно 77 и 55 %, а сплавляемыми с ним компонентами являются Cr, Ti, Al, B, W, Mo, V, Co.

Сплавы цветных металлов. Наиболее распространенными и широко применяемыми являются сплавы на основе меди и алюминиевые сплавы.

Медные сплавы принято делить на латуни и бронзы. *Латунями* называются сплавы меди с цинком. В качестве второсте-

ненных компонентов, улучшающих свойства латуней, в них могут добавляться и другие элементы, например олово для повышения коррозионной стойкости, свинец для лучшей обрабатываемости режущим инструментом, алюминий и никель для улучшения механических свойств. С добавлением цинка в медь до 32 % Zn одновременно повышаются прочность и пластичность латуни. Наиболее пластичными являются однофазные латуни, в которых весь цинк растворен в ГЦК-решетке меди. Предельная растворимость — 39 % Zn. При сплавлении с большим количеством цинка образуется вторая фаза на основе раствора в химическом соединении CuZn и, таким образом, получаются двухфазные латуни. Эти латуни тверже, но хрупче однофазных. Латуни маркируются буквами Л с цифрами, указывающими количество меди как более дорогого, чем цинк элемента. Если латунь содержит другие элементы, то они обозначаются русскими буквами, проставляемыми после Л: О — олово, А — алюминий, Н — никель, Ж — железо, С — свинец, К — кремний, Мц — марганец и т. д. Однофазные латуни: Л96, Л90, Л80, Л68, Л62. Из них делают листы, ленты, разные профили.

Из двухфазных латуней широко известная латунь Л59. Для образования сыпучей стружки в нее добавляют 1—2 % Pb (ЛС59-1). Они чаще всего выпускаются в виде прутков разного профиля.

Бронзами называются сплавы меди с любыми компонентами, кроме цинка (однако цинк может входить в состав сложных бронз в качестве второстепенного компонента). Бронзы существенно отличаются от латуней тем, что с увеличением содержания второго компонента они быстро теряют пластичность, в то время как твердость довольно быстро возрастает (у латуней до 32 % Zn растут оба эти показателя).

Бронзы маркируются буквами Бр, а затем ставится второй компонент с цифрой, указывающей его среднее содержание в процентах. Если имеются и другие компоненты, то они перечисляются вслед за вторым, а затем, разделенные дефисами, указываются содержания компонентов начиная со второго, например Бр010, Бр0Ф10-1, БрА5, БрА7, БрБ2, БрКд 1,5 и т. д. Оловянная и оловянно-фосфористая бронзы являются хорошими антифрикционными сплавами для подшипников скольжения, червячных колес. Алюминиевые бронзы являются дешевыми заменителями оловянных бронз. Бериллиевая бронза (БрБ2) является твердым и упругим материалом, служащим для изготовления немагнитных пружин и неискрящего ударного инструмента. Кадмиевая бронза (БрКд 1,5) является износостойким электропроводящим материалом. Применяется для изготовления троллейбусных и трамвайных контактных проводов.

Основные преимущества алюминиевых сплавов — легкость и сравнительная недефицитность. В зависимости от пластичности и деформируемости все они делятся на две группы: деформируемые (способные пластически деформироваться при изго-

товлении из них изделий) и литейные (имеющие низкую пластичность, поэтому для получения из них изделия нужного очертания их следует в жидком виде заливать в специальную литейную форму). Наиболее простые деформируемые сплавы алюминия содержат до 1,6 % Mn (АМц) или 2—5 % Mg (АМг2 и АМг5). Эти элементы, растворяясь в кристаллической решетке алюминия, существенно его упрочняют и лишь незначительно уменьшают пластичность, обеспечивая хорошую деформируемость сплавов.

Термической обработкой эти сплавы не упрочняются. Они стойки против коррозии. Из них изготовляют малонагруженные детали и легкие сварные конструкции.

К деформируемым алюминиевым сплавам, значительно упрочняемым термообработкой, относятся дюралюмины. Основным элементом, вводимым в них для обеспечения возможности упрочняющей термообработки, является медь (от 2,8—4,5 %). Другие элементы (Mg, Mn) добавляются для улучшения комплекса свойств. Дюралюмины маркируются буквой Д с цифрой, означающей порядковый номер в системе разработки сплава (Д6, Д16, Д18 и т. д.) Для упрочнения их подвергают закалке, а затем естественному (при комнатной температуре в течение 4—5 сут) или искусственному (при 150 °С, 18 ч) старению. При старении сплав дополнительно существенно упрочняются.

Из литейных сплавов алюминия широко применяются силумины— сплавы алюминия с кремнием и добавками Mg, Mn и других элементов. Наиболее типичен силумин АЛ2, содержащий 10—13 % Si. Если его перед заливкой в форму модифицировать смесью солей NaCl и NaF, то его эвтектика становится тонкодисперсной, что упрочняет сплав и повышает его пластичность.

Контрольные вопросы

1. Что такое металлы? Каково их строение?
2. Какие характерные свойства присущи металлам?
3. Как происходит кристаллизация металлов?
4. Что представляют собой металлические сплавы и каковы их характерные свойства?
5. Что такое диаграмма состояний? Какие она содержит сведения?
6. В чем отличие чугунов от сталей?
7. Какие существуют виды термической обработки металлических сплавов?
8. В чем состоит сущность легирования стали?
9. Чем поверхностная закалка отличается от химико-термической обработки стали?

ГЛАВА 2. СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

§ 2.1. Общие сведения о литейном производстве

Литейным производством называется процесс изготовления литых изделий, а также соответствующая ему отрасль промышленности. В заводской практике широко используется термин «литье», под которым понимается вся совокупность технологических операций, приводящих к получению литых заготовок, называемых отливками.

Общая схема литья. Процесс получения отливки складывается из следующих основных операций: изготовления литейной формы; плавки металла; заливки металла в форму; затвердевания металла и охлаждения отливки; выбивки отливки из формы; обрубки и очистки отливки; термической обработки отливки; контроля качества отливки и сдачи ее на механическую обработку. Каждая из перечисленных сложных и многопереходных по характеру операций должна осуществляться таким образом, чтобы был обеспечен высокий уровень качества отливки по всем показателям, включая точность размеров и чистоту поверхности, благоприятную структуру металла, а также отсутствие наружных и внутренних литейных и металлургических дефектов.

Элементы литейной формы. Литейная форма представляет собой устройство, предназначенное для заливки металла и образования отливки (рис. 2.1). Она должна иметь рабочую полость *1*, где непосредственно формируется тело заготовки, а также литниковую систему, обеспечивающую подвод металла в рабочую полость и питание отливки в процессе кристаллизации. Конфигурация и размеры рабочей полости должны соответствовать очертаниям и размерам изготовляемой отливки. При этом следует иметь в виду, что размеры полости должны превышать размеры отливки на величину литейной усадки металла. В свою очередь, размеры отливки должны быть больше размеров детали на величину снимаемого при механической обработке технологического припуска. Таким образом, окончательные размеры рабочей полости литейной формы включают в себя соответствующие размеры детали, припуски на механическую обработку и на литейную усадку металла. Внутри некоторых отливок, а также на их наружной поверхности могут быть различные отверстия, полости и выемки. Для выполнения при сборке формы в ней устанавливаются соответствующие керамические или металлические элементы, называемые стержнями *8* (рис. 2.1). Стержни удаляются из отливки при выбивке, оставляя в ней после себя необходимые углубления или отверстия. Литниковая система (рис. 2.1) включает в себя чашу (воронку) *2*, стояк *3*, дроссель *4*, регулирующий скорость заливки и предотвращающий вакуум (подсос воздуха) в стояке, шлакоуловитель *5*, расположенный в верхней опоке для задержания неметаллических включений,

питатель *6*, подающий металл в рабочую полость непосредственно или, как в данном случае, через боковую прибыль *7*. Прибыль питает тело отливки при остывании и кристаллизации металла и предотвращает образование в ней усадочных раковин. Прибыли могут быть верхнего или бокового расположения.

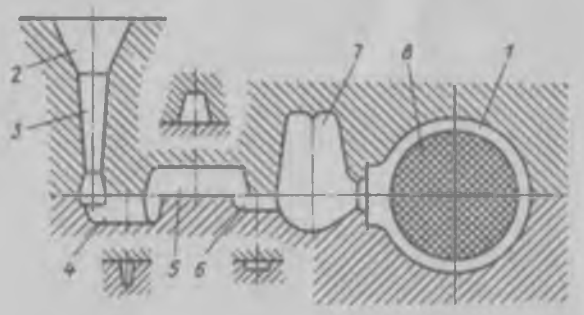


Рис. 21. Принципиальная схема устройства литейной формы

Основные виды литья. Виды литья отличаются друг от друга по материалу литейной формы и по способу подачи в нее заливаемого металла. Однако более существенно они различаются по точности размеров и чистоте поверхности отливок, а также по производительности и степени сложности технологического процесса. Сложились две группы видов литья: литье в песчано-глинистые формы и специальные виды литья.

Литье в песчано-глинистые формы — наиболее простой и распространенный способ получения литых заготовок. Материалами для изготовления форм в данном случае служат формовочные смеси, состоящие из песчаной основы, в которую в качестве связующих материалов добавляются определенные количества глины и воды. Кроме того, в смесь вводятся противопригарные добавки в виде молотого каменного угля, маршаллита (пылевидного кварца), мазута и другие вещества, способствующие улучшению качества отливки (древесные опилки, сульфитно-спиртовая барда).

Для изготовления стержней используются стержневые смеси, состоящие в основном из песка, связанного специальными веществами — крепителями (льняное масло, сульфитная барда, декстрин, канифоль и т. д.). Литейная форма обычно состоит из полуформ изготовляемых ручным или машинным способом двух полуформ: нижней и верхней. Каждая из полуформ изготовляется в специальных металлических ящиках без доньев и крышек, называемых опоками. При сборке формы опоки устанавливаются друг на друга и скрепляются.

Рабочие полости для отливки в набитых формовочной смесью опоках получатся при помощи половинок разъемной модели, форма и размеры которой соответствуют форме и расчетным размерам рабочей полости. Сборка литейной формы из полуформ — опок — производится после извлечения половинок моделей и установки стержней в нижней полуформе. Стержни изготовляются в специальных приспособлениях — стержневых ящиках — и проходят обязательную сушку.

Собранная форма, состоящая из скрепленных опок, с помощью специального ковша заливается через литниковую систему и остается на месте заливки до завершения кристаллизации и охлаждения тела отливки. Затем опоки раскрепляются и на специальной установке производится выбивка отливки из формы. Затем производятся обрубка и очистка, во время которых от отливки отделяется литниковая система с прибылями, удаляются остатки формовочной и стержневой смесей и осуществляется очистки поверхности отливки от различных дефектов. Проводимая после этого термическая обработка имеет целью устранить грубозернистую, дендритную структуру металла, литейные напряжения и подготовить металл отливки к механической обработке.

Специальные виды литья применяются для устранения недостатков литья в песчано-глинистые формы — низкой точности размеров и чистоты поверхности, приводящих к большим припускам на механическую обработку и потерям металла в стружку. Недостатками являются также невысокая производительность и плохие санитарно-гигиенические условия труда из-за большой запыленности и шума на рабочих местах. Ниже описываются сущность и понятие о наиболее распространенных специальных видах литья.

При литье в металлические формы — кокили — форма изготовляется из чугуна или стали. Основными преимуществами являются высокие точность размеров и чистота поверхности отливки, а также мелкое зерно металла отливки, что снижает металлоемкость изделий и повышает прочность металла.

Центробежное литье — литье в быстровращающиеся металлические формы (рис. 2.2). Таким способом отливаются короткие (*а*) или длинные (*б*) тела вращения — трубы, втулки и другие аналогичные им изделия. Преимущества те же, что при кокильном литье, однако качество внутренней поверхности вследствие усадочных явлений хуже наружной. Из-за ненадобности стержней экономятся ресурсы затраты на их изготовление.

При литье под давлением жидкий металл вводится в замкнутую металлическую пресс-форму под значительным давлением и кристаллизуется, оставаясь под давлением (рис. 2.3), что, устраняя пористость и рыхлость, улучшает металлургическое качество отливки.

На рис. 2.3 соответственно показаны: подача металла в предкамеру (*а*), нагнетание металла в рабочую полость (*б*) и выбивка отливки (*в*). Заметим, что в одной пресс-форме может располагаться несколько рабочих полостей, питаемых одновременно. Таким образом, литье под давлением является самым высококачественным, точным, чистым и производительным видом литья.

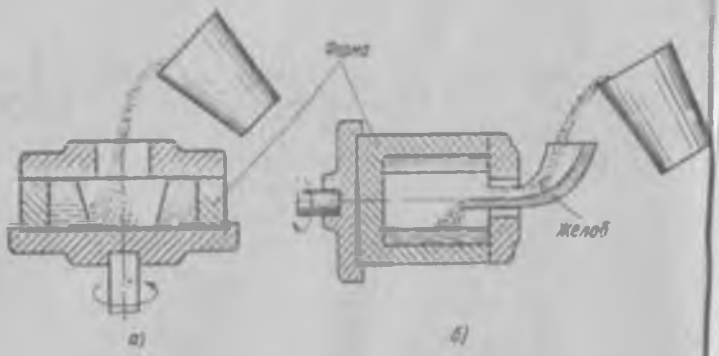


Рис. 2.2. Схема центробежного литья

При литье в оболочковые формы литейная форма собирается из двух частей, изготовляемых на специальной установке (рис. 2.4) из смеси, состоящей из мелкого кварцевого песка и синтетической термореактивной смолы — пульвер-бакелита.

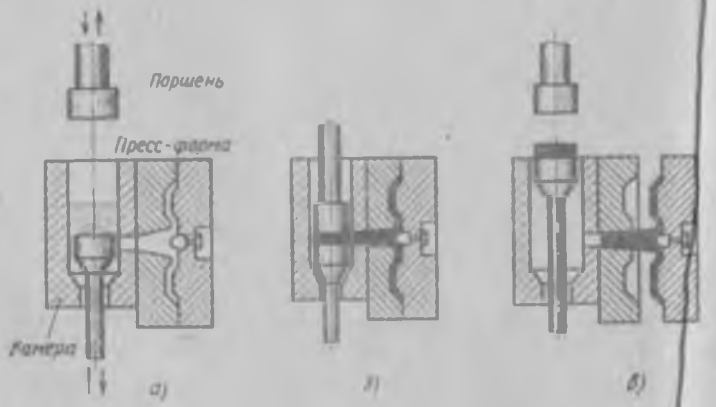


Рис. 2.3. Схема литья под давлением

Подмодельная плита *1* с закрепленными на ней моделями отливки и литниковой системы *2* нагревается до 200—250 °С и покрывается формовочной смесью. Во время небольшой (30—40 с) выдержки

расплавившаяся смола склеивает песчинки и образуется пока еще мягкая оболочка *5* толщиной до 15 мм. Затем непрореагировавшая смесь ссыпается из рамки *4* и вся установка в течение минуты выдерживается в камере при температуре около 300 °С для окончательного отверждения оболочки *5*. Удаленная с помощью толкателей-съемников *3* оболочка идет на сборку формы. Преимущества метода: более высокие, чем при литье в песчано-глинистые формы, точность размеров, чистота поверхности отливок и производительность. Недостаток — выделение токсичных фенолсодержащих газов, что требует мощной вентиляции.

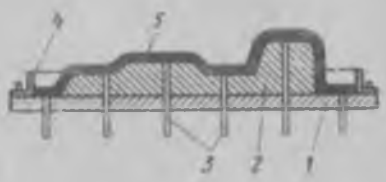


Рис. 2.4. Схема получения оболочковой полуформы

Литье по выплавляемым моделям — один из самых точных видов литья, который применяется для получения сложных по очертаниям изделий из обычных материалов, а также инструмента и других изделий из твердых, труднообрабатываемых режущим инструментом материалов. Изготовленные данным способом изделия не требуют механической обработки. Рассмотрим технологию данного вида литья. Вначале в специальной пресс-форме (рис. 2.5, *а*) изготовляется от одной до нескольких десятков моделей изготовляемой детали-отливки (рис. 2.5, *б*) из смеси парафина со стеарином (по 50 % каждого). В размерах моделей учитываются только размеры деталей и литейная усадка материала отливки. Припуск на мехобработку не дается, поскольку она не производится.

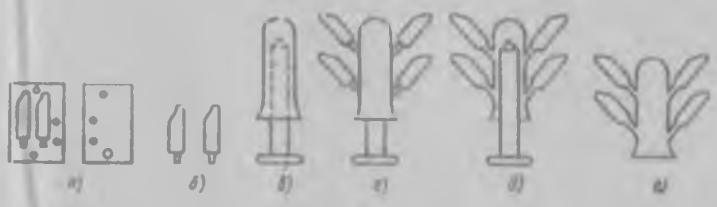


Рис. 2.5. Схема литья по выплавляемым моделям

Как правило, из моделей составляется блок (рис. 2.5, *г*) с единой литниковой системой (рис. 2.5, *в*), позволяющей одновременно получить несколько десятков отливок. Блок покрывается путем окунания клейкой сметанообразной суспензией, состоящей из маршаллита и гидролизованного этилсиликата. Затем он посыпается кварцевым песком и сушится. Для того чтобы вокруг модельного блока

получился достаточно прочный слой, окунания в суспензию и посыпка песком с последующей сушкой повторяются 3—5 раз.

В дальнейшем из покрытого образовавшейся коркой модельного блока одним из способов выплавляется (удаляется) модельный состав. Получившаяся таким образом корка (рис. 2.5, *д*) заформовывается песком в какой-нибудь емкости или опоке и прокаливается при температуре 850—900 °С. При этом корка упрочняется, становится газопроницаемой, так как из нее выгорают остатки модельного состава.

После этого, не ожидая снижения температуры, в корку заливают подготовленный сплав. Закристаллизовавшийся и остывший блок (рис. 2.5, *е*) выбирается из опоки и освобождается от корки. Затем каждая деталь-отливка отделяется от стояка.

Основное преимущество литья по выплавляемым моделям — самая высокая точность размеров и чистота поверхности отливок, а также высокая производительность.

§ 2.2. Сварка металлов

Сварка — технологический процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями изделия при их местном или общем нагреве, пластическом деформировании, а также при совместном действии того и другого факторов.

В зависимости от состояния металла в сварочной зоне все способы сварки делятся на две группы: плавлением и давлением (в соответствии с ГОСТ 2601—74). Сварное соединение, полученное сваркой плавлением (рис. 2.6, *а*), состоит из свариваемого металла

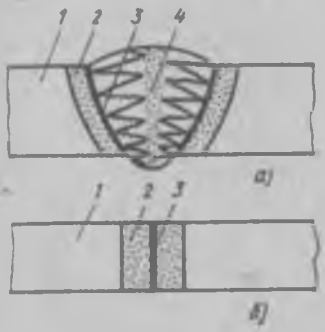


Рис 2.6. Схема сварного соединения

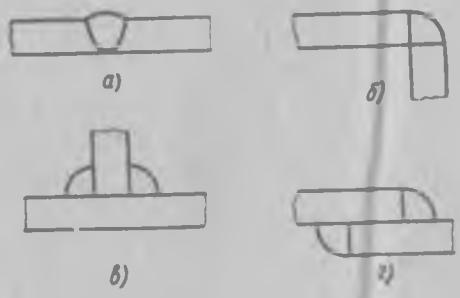


Рис 2.7. Виды сварных соединений

1, не изменившего своих свойств при сварке; зоны термического влияния *2*, структура и свойства металла этой части сварного соединения изменились в результате фазовых превращений или ре-

кристаллизации под воздействием нагрева от 500 °С до $T_{пл}$; зоны сплавления *3* с частично оплавленными зернами свариваемого металла; сварного шва *4*, образовавшегося в результате кристаллизации сварочной ванны (расплавленного свариваемого и присадочного металла) и имеющего дендритное строение. Соединение, выполненное сваркой давлением (рис. 2.6, *б*), состоит из свариваемого металла *1*, зоны термомеханического влияния *3* и зоны соединения *2*, где образовались межатомные связи между свариваемыми металлами.

К сварке плавлением относятся следующие способы: дуговая, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная, газовая, термитная, а к сварке давлением — контактная, диффузионная, холодная, ультразвуковая, взрывом и др.

Сварные соединения могут быть (рис. 2.7): стыковыми — *а* (выполняются с помощью стыковых швов), угловыми — *б*, тавровыми — *в*, нахлесточными — *г* (выполняются с помощью угловых швов).

Общие сведения о дуговой сварке (ДС). Впервые дугу для сварки применил Н.Н. Бенардос в 1881 г. (для сварки он использовал дугу между угольным электродом и металлом), а Н. Г. Славянов в 1888 г. предложил дуговую сварку металлическим плавящимся электродом, которая нашла наибольшее применение среди других способов сварки. При ручной дуговой сварке (РДС) плавящимся электродом (рис. 2.8) дуга между стержнем электрода *7* и свариваемым металлом *1* способствует их плавлению, капли *8* расплавляемого электрода переносятся в сварочную ванну *4* через дуговой промежуток. Вместе со стержнем плавится электродное покрытие *6*, создавая газовую защиту вокруг дуги *5* и жидкую шлаковую ванну, которая вместе с расплавленным металлом образует сварочную ванну. При передвижении дуги металл сварочной ванны затвердевает и превращается в сварной шов *2*, на поверхности которого образуется шлаковая корка *3*, удаляемая после остывания сварного шва.

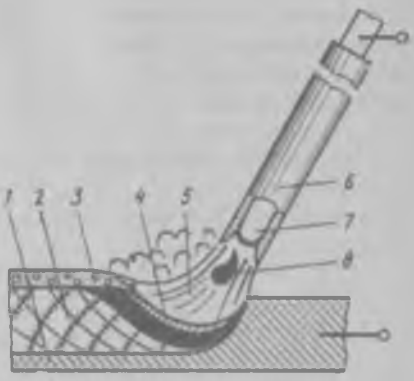


Рис. 2.8. Схема процесса ручной дуговой сварки

Сварочная дуга является устойчивым электрическим разрядом в ионизированной смеси газов и паров материалов, применяемых при сварке. Дуга может гореть при использовании источников питания (ИП) постоянного тока прямой (электрод подключен к отрицательному полюсу ИП и называется катодом, а изделие — к положительному и называтся анодом) и обратной полярности (изде-

получился достаточно прочный слой, окунания в суспензию и посыпка песком с последующей сушкой повторяются 3—5 раз.

В дальнейшем из покрытого образовавшейся коркой модельного блока одним из способов выплавляется (удаляется) модельный состав. Получившаяся таким образом корка (рис. 2.5, *д*) заформовывается песком в какой-нибудь емкости или опоке и прокаливается при температуре 850—900 °С. При этом корка упрочняется, становится газопроницаемой, так как из нее выгорают остатки модельного состава.

После этого, не ожидая снижения температуры, в корку заливают подготовленный сплав. Закристаллизовавшийся и остывший блок (рис. 2.5, *е*) выбирается из опоки и освобождается от корки. Затем каждая деталь-отливка отделяется от стояка.

Основное преимущество литья по выплавляемым моделям — самая высокая точность размеров и чистота поверхности отливок, а также высокая производительность.

§ 2.2. Сварка металлов

Сварка — технологический процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями изделия при их местном или общем нагреве, пластическом деформировании, а также при совместном действии того и другого факторов.

В зависимости от состояния металла в сварочной зоне все способы сварки делятся на две группы: плавлением и давлением (в соответствии с ГОСТ 2601—74). Сварное соединение, полученное сваркой плавлением (рис. 2.6, *а*), состоит из свариваемого металла

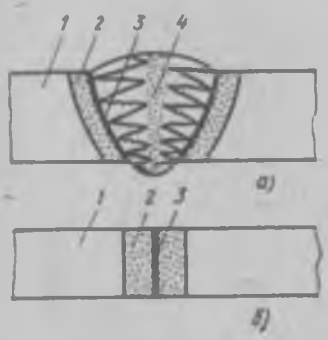


Рис 2.6. Схема сварного соединения

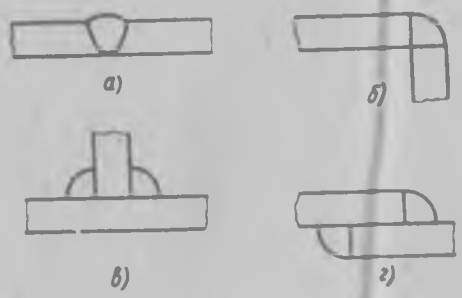


Рис. 2.7 Виды сварных соединений

1, не изменившего своих свойств при сварке; зоны термического влияния *2*, структура и свойства металла этой части сварного соединения изменились в результате фазовых превращений или ре-

кристаллизации под воздействием нагрева от 500 °С до $T_{пл}$; зоны сплавления *3* с частично оплавленными зернами свариваемого металла; сварного шва *4*, образовавшегося в результате кристаллизации сварочной ванны (расплавленного свариваемого и присадочного металла) и имеющего дендритное строение Соединение, выполненное сваркой давлением (рис. 2.6, *б*), состоит из свариваемого металла *1*, зоны термомеханического влияния *3* и зоны соединения *2*, где образовались межатомные связи между свариваемыми металлами.

К сварке плавлением относятся следующие способы: дуговая, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная, газовая, термитная, а к сварке давлением — контактная, диффузионная, холодная, ультразвуковая, взрывом и др.

Сварные соединения могут быть (рис. 2.7), стыковыми — *а* (выполняются с помощью стыковых швов), угловыми — *б*, тавровыми — *в*, нахлесточными — *г* (выполняются с помощью угловых швов).

Общие сведения о дуговой сварке (ДС). Впервые дугу для сварки применил Н.Н. Бенардос в 1881 г. (для сварки он использовал дугу между угольным электродом и металлом), а Н. Г. Славянов в 1888 г. предложил дуговую сварку металлическим плавящимся электродом, которая нашла наибольшее применение среди других способов сварки При ручной дуговой сварке (РДС) плавящимся электродом (рис. 2.8) дуга между стержнем электрода *7* и свариваемым металлом *1* способствует их плавлению, капли *8* расплавляемого электрода переносятся в сварочную ванну *4* через дуговой промежуток. Вместе со стержнем плавится электродное покрытие *6*, создавая газовую защиту вокруг дуги *5* и жидкую шлаковую ванну, которая вместе с расплавленным металлом образует сварочную ванну. При передвижении дуги металл сварочной ванны затвердевает и превращается в сварной шов *2*, на поверхности которого образуется шлаковая корка *3*, удаляемая после остывания сварного шва.

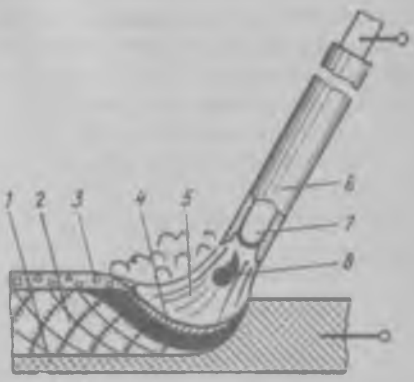


Рис 2.8. Схема процесса ручной дуговой сварки

Сварочная дуга является устойчивым электрическим разрядом в ионизированной смеси газов и паров материалов, применяемых при сварке. Дуга может гореть при использовании источников питания (ИП) постоянного тока прямой (электрод подключен к отрицательному полюсу ИП и называется катодом, а изделие — к положительному и называтся анодом) и обратной полярности (изде-

лие — катод, а электрод — анод), а также переменного тока промышленной частоты.

Возбуждение дуги при ДС производится следующим образом:

1) подача от осциллятора, включенного в сварочную цепь, импульса тока высокого напряжения и высокой частоты ($U = 2000 \div 3000$ В; $f = 15 \cdot 10^4$ Гц) с переходом искрового разряда в дуговой (используется при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом);

2) нагрев газов и паров металлов в дуговом промежутке за счет теплоты, выделяющейся при замыкании электрода и изделия (применяется при сварке плавящимся электродом).

Дуговой разряд имеет три области: катодную (КО), являющуюся источником термоэлектронов, которые ускоряются электрическим полем КО и, попадая в столб дуги, ионизируют находящиеся в нем газы; анодную (АО) и столб дуги. Напряжение сварочной дуги представляет собой сумму падений напряжений в этих областях $U_д = U_к + U_а + U_с$, или $U_д = a + bl_д$, где $a = U_к + U_а$; $b = j_с\rho_с$ ($j_с$ — плотность тока в столбе дуги; $\rho_с$ — электрическое сопротивление столба; $l_с$ — длина столба дуги, равная в связи с малой протяженностью КО и АО длине дуги $l_д$).

При сварке плавящимся (стальным) электродом температура катода составляет 2200—2400 °С; анода — 2500—2700 °С; в столбе дуги — 5000—6000 °С.

Вольт-амперная характеристика дуги (ВАХ) — это зависимость $U_д$ от сварочного тока $I_{св}$ (рис. 2.9, *а*), она имеет три участка: *I* — с увеличением $I_{св}$ растет степень ионизации дугового разряда,

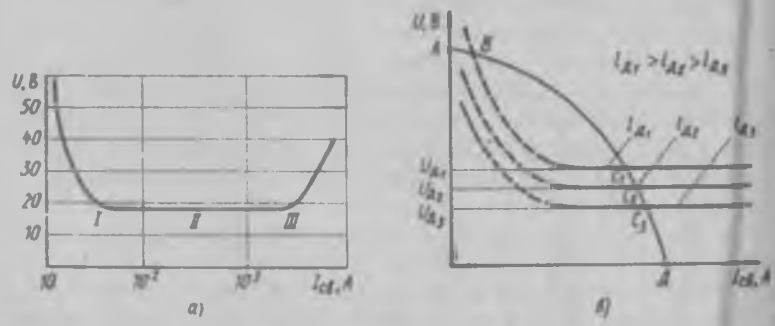


Рис. 2.9. Вольт-амперная характеристика дуги (*а*) и внешняя характеристика источников питания для дуговой сварки (*б*)

что приводит к уменьшению $\rho_с$ и соответственно $U_с$, а при практических постоянных $U_к$ и $U_а$ — к снижению $U_д$; *II* — увеличение $I_{св}$ сопровождается ростом площади столба дуги при практически постоянных $\rho_с$, $j_с$ и $U_г$; *III* — на этом участке дуговой разряд распространен по всему торцу электрода ($\rho_с$ постоянно); следо-

вательно, увеличение $I_{св}$ приводит к росту I_c и соответственно $U_д$. Наибольшее применение находят режимы ДС, соответствующие участкам: *II* — для РДС, автоматической сварки под флюсом (АДСФ), сварки плавящимся электродом в защитных газах; *III* — для АДСФ, сварки в защитных газах, электрошлаковой сварки.

Источники питания для дуговой сварки. Источники питания для РДС и АДСФ должны иметь падающую или пологую внешнюю характеристику (рис. 2.9, *б*) — зависимость напряжения на выходных клеммах ИП от тока в сварочной цепи: $U_п = f(I_{св})$. Режим устойчивого горения дуги определяется точкой *C* пересечения ВАХ и $U = f(I_{св})$; точка *A* — режим холостого хода ИП ($U_{хх} = 60 \div 80$ В); точка *B* — режим неустойчивого горения дуги; точка *D* — режим короткого замыкания ($U_д = 0$). Источники питания с такими падающими или пологими характеристиками необходимы для обеспечения зажигания дуги и устойчивого ее горения; для сохранения практически постоянной ее мощности (колебания длины дуги и соответственно $U_д$ не приводят к значительному изменению $I_{св}$) и для ограничения тока короткого замыкания ($I_{кз} \leqslant 1{,}5 I_{св}$). Для питания сварочной дуги применяют ИП переменного тока (сварочные трансформаторы) и постоянного (сварочные генераторы и выпрямители постоянного тока).

Сварочные трансформаторы — это понижающие трансформаторы (вторичное напряжение $U_2 = 60 \div 80$ В), падающая характеристика которых создается за счет повышенного магнитного рассеяния или включения в сварочную цепь индуктивного сопротивления (дросселя). Электрическая схема сварочного трансформатора с повышенным магнитным рассеянием представлена на рис. 2.10, *а*. Катушки первичной *1* и вторичной *2* обмоток расположены попарно на обоих стержнях сердечника трансформатора *3*. Первичная обмотка неподвижна и закреплена в нижней части сердечника, вторичная перемещается по нему с помощью винтового механизма. При прохождении тока по обмоткам возникают магнитные потоки: основной $\Phi_т$, создаваемый намагничивающей силой обмоток *1* и *2*, и потоки рассеяния этих же обмоток $\Phi_{р1}$ и $\Phi_{р2}$, дающие суммарный поток $\Phi_р$, который наводит в трансформаторе реактивную ЭДС, определяющую его индуктивное сопротивление $X_п$. При рабочей нагрузке трансформатора его ЭДС уравновешивается падением напряжения дуги $U_д$ и реактивной ЭДС $E_р$, а при коротком замыкании — $U_д = I_{кз} X_т$; следовательно, такой ИП имеет падающую характеристику. Сварочный ток регулируется изменением расстояния между обмотками *1* и *2* (при его увеличении поток $\Phi_р$ растет, а сварочный ток уменьшается).

Сварочные генераторы — это специальные генераторы, падающая характеристика которых получается изменением магнитного потока генератора в зависимости от $I_{св}$. Электрическая схема сварочного генератора с независимым возбуждением и размагничивающей последовательной обмоткой представлена на рис. 2.10,*б*. Генера-

тор имеет обмотку независимого возбуждения НО, питаемую через выпрямитель, и размагничивающую обмотку РО, включенную в сварочную цепь последовательно с обмоткой якоря. Магнитный поток $\Phi_н$, создаваемый обмоткой НО, индуцирует в якоре ЭДС $E = U_{xx} = c\Phi_н$, где c — постоянная генератора. Магнитный поток $\Phi_р$, создаваемый обмоткой РО, противоположен по направлению потоку $\Phi_н$ и растет с увеличением $I_{св}$. Результирующий поток $\Phi_{рез} = \Phi_н + \Phi_р$ и ЭДС генератора с ростом $I_{св}$ будут падать: следовательно, внешняя характеристика его будет падающей. Регулировка сварочного тока осуществляется ступенчато секционированием числа витков РО и плавно — изменением тока в цепи обмотки НО с помощью реостата (R). Сварочные генераторы приводятся в действие электродвигателем или двигателем внутреннего сгорания.

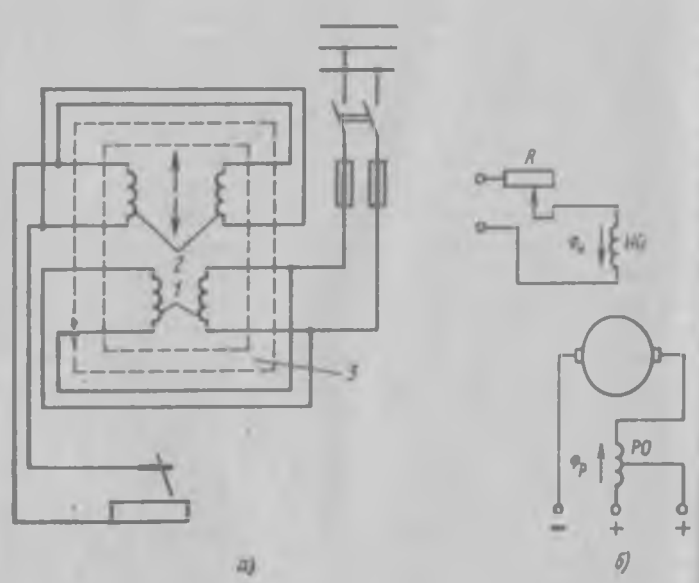


Рис. 2.10. Электрические схемы

Ручная дуговая сварка (РДС). РДС используется для изготовления сварных соединений практически всех типов из металлов толщиной от 2 до 60 мм. При РДС используют сварочные электроды, которые подаются в дугу и перемещаются вдоль изделия сварщиком вручную. Плавящиеся электроды изготовляются в соответствии с ГОСТ 2246—70 из сварочной проволоки: углеродистой (Св-08; Св-08А; Св-10ГА и др.) и легированной (Св-10Г2СА; Св-10Х18Н10Т; Св-12Х11НМФ и др.), где в написании марок про-

волоки обозначают: Св — сварочная; цифры, следующие далее, содержание углерода в сотых долях процента; дальнейшая расшифровка марок проводится аналогично соответствующим маркам сталей. Для электродов используются металлические стержни (проволока) диаметром 1,6–12 мм и длиной 200–450 мм, на которые наносится слой покрытия толщиной от 0,5 до 2—3 мм. В состав покрытия для качественных электродов вводят компоненты, которые в соответствии с их назначением можно разбить на группы: стабилизирующие; содержащие металлы с малым потенциалом ионизации (мел, поташ, диоксид титана); газообразующие, предназначенные для защиты расплавленного металла от кислорода и азота воздуха средой восстановительных газов, образующихся при сгорании органических веществ (крахмал, декстрин, целлюлоза); шлакообразующие (полевой и плавиковый шпат, мел, марганцевая руда); легирующие и раскисляющие, вводимые в виде ферросплавов Mn, Si, Ti; связующие (жидкое стекло).

Стандарты на электроды (для углеродистых и легированных сталей ГОСТ 9467—75) определяют типы электродов: Э42; Э42А; Э55 и др. Цифры в обозначениях типов электродов означают гарантированный предел прочности металла сварного шва (соответственно $\sigma_в$ = 420; 550 МПа); для электродов типа Э42 использована проволока Св-08, а типа Э42А — Св-08А.

Автоматическая дуговая сварка под флюсом (АДСФ). АДСФ—способ сварки, при котором дуга горит под слоем сварочного флюса (неметаллического сыпучего материала), обеспечивающего хорошую защиту металла сварочной ванны от газов воздуха (рис. 2.11). Дуга *10* горит между электродной проволокой *2* и свариваемым металлом *11* под слоем флюса *4*, подаваемого из бункера. Часть окружающего дугу флюса расплавляется, образуя на поверхности сварочной ванны *8* слой жидкого шлака *5*, под которым создается полость *9*, заполненная парами металла, флюса и газами. По мере перемещения дуги происходит затвердевание металла и шлака — образуется сварной шов *7*, покрытый шлаковой коркой 6. Подача проволоки в дугу $V_{эл}$ и перемещение автомата вдоль изделия $V_{св}$ осуществляются с помощью механизмов подачи электродной проволоки *1* и перемещения автомата. Ток под-

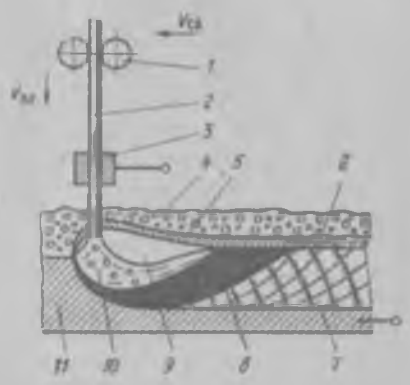


Рис. 2.11. Схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом

водится к проволоке через токопровод *3* от сварочного ИП (вылет электрода, находящегося под током, равен 40—50 мм, что позволяет использовать большие сварочные токи).

АДСФ применяют в заводских и монтажных условиях для сварки швов большой протяженности в нижнем положении и кольцевых поворотных швов. Сваривают стали, алюминий, титан, медь и их сплавы толщиной от 2 до 300 мм.

Преимуществами АДСФ являются: высокая производительность (в 5—10 раз выше, чем при РДС) благодаря применению больших токов, большей глубины проплавления, отсутствию потерь металла на угар и разбрызгивание, а также механизации процесса; высокое качество сварных швов за счет хорошей защиты металла в процессе сварки и равномерного их формирования; улучшение условий труда сварщиков и др. Недостатки АДСФ заключаются в трудности сварки коротких швов, а также швов, расположенных в сложных пространственных положениях и труднодоступных местах.

Дуговая сварка в защитных газах. В этом случае дуга горит в струе газа, подаваемого через сварочную горелку и защищающего расплавленный и остывающий металл от вредного воздействия газов воздуха.

Аргонодуговая сварка (ДАС) неплавящимся вольфрамовым электродом в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах используется для сварки активных металлов (Al, Mg) и легированных сталей толщиной от 0,5 до 3 мм без присадочного металла, а при толщине от 3 до 60 мм — с присадочным металлом.

Сварку в среде защитных газов плавящимся электродом проводят с использованием больших сварочных токов в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Для Al, Mg, Ti, Cu и их сплавов, а также для легированных сталей в качестве защитной среды применяется аргон, а для углеродистых и низколегированных сталей — углекислый газ. При сварке в углекислом газе необходимо использовать сварочную проволоку, содержащую раскислители Mn и Si (Св-10Г2СА и др.).

Электрошлаковая сварка (ЭШС). ЭШС — способ сварки плавлением, при котором для плавления металла используется теплота, выделяющаяся при прохождении электрического тока через электропроводный шлак (расплавленный флюс). В начале процесса возбуждают дугу, с помощью которой расплавляют флюс, засыпаемый в полость, образованную кромками свариваемых деталей *2*, формирователей *5* и начальной технологической планкой *8* (рис. 2.12, *а*, *б*). После образования шлаковой ванны *3* дуга гаснет и процесс дуговой переходит в электрошлаковый. В нагретом до 2000 °С шлаке плавится электрод *1* и оплавляются кромки свариваемых деталей, устанавливаемых с зазором 20—50 мм. Для формирования сварного шва *7* и удержания шлаковой и металлической *4* ванн от вытекания используют формирователи — медные ползуны, охлаждаемые водой

6 и перемещающиеся вместе со сварочным аппаратом по боковым поверхностям деталей. Кристаллизующийся в нижней части металлической ванны металл образует сварной шов.

Главное преимущество ЭШС — возможность сварки за один проход металла (сталей, алюминиевых и титановых сплавов) практически любой толщины (от 20 до 2000 - 3000 мм), поэтому производительность ЭШС в 5—15 раз выше, чем у АДСФ. ЭШС позволяет выполнять вертикальные швы, а также кольцевые (при этом свариваемые детали — обечайки — вращаются на специальном роликовом стенде относительно неподвижных сварочного аппарата и формирователей).

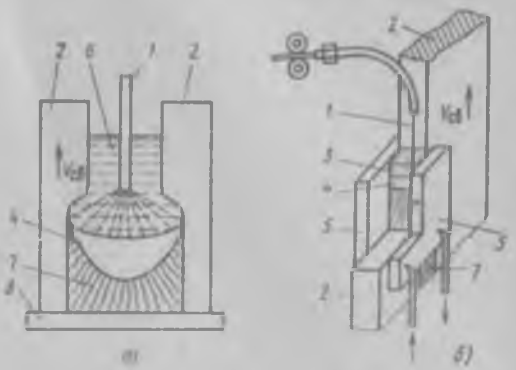


Рис. 2.12. Схема процесса электрошлаковой сварки

Газовая сварка (ГС). ГС — способ сварки плавлением, при котором металл в сварочной зоне нагревается пламенем газа (ацетилена, метана), сжигаемого для этой цели в смеси с кислородом в сварочных горелках. Преимущество ГС — это ее универсальность. С помощью ГС можно сваривать металлы различной толщины с различными свойствами (стали, чугуны, цветные металлы). Недостатками ГС являются трудность автоматизации процесса и длительное тепловое воздействие на металл, что приводит к изменению структуры и формы сварного соединения.

Контактная сварка (КС). КС — основной способ сварки давлением. При КС для нагрева металла в сварочной зоне используется теплота, выделяемая при прохождении тока в месте контакта свариваемых деталей. Особенностью КС является использование кратковременных ($t = 0{,}003 \div 10$ с) импульсов тока большого значения ($I = 1 \div 100$ кА) при напряжении $U = 2 \div 12$ В и давлении $P = 10 \div 150$ МПа. Питание сварочным током осуществляется от понижающего трансформатора. Максимальное количество теплоты выделяется в зоне контакта деталей, где металл нагревается до пластического состояния или до плавления. Под действием сжимающих усилий неровности сминаются, а оксидные пленки выдавливаются из стыка — происходит сближение нагретых деталей до межатомных расстояний, т. е. сварка. Основными видами КС являются точечная, шовная (роликовая) и стыковая.

Точечная сварка (рис. 2.13, *а*) осуществляется для соединения металлов (различных сталей, сплавов Al, Ti, Cu) тол-

щиной 0,6—2,5 мм. Свариваемые детали *2* и *3* соединяют внахлестку и зажимают между подвижным *1* и неподвижным *4* электродами машины и пропускают через них ток, нагревающий металл в месте стыка до плавления, а прилегающую к ядру сварочной точки *5* зону — до пластического состояния. После кристаллизации сварочной точки давление снимается. Этот способ обладает большой производительностью и обеспечивает требуемую прочность сварных соединений (корпуса автомашин, вагонов, холодильников, деталей радиоэлектроники и др.).

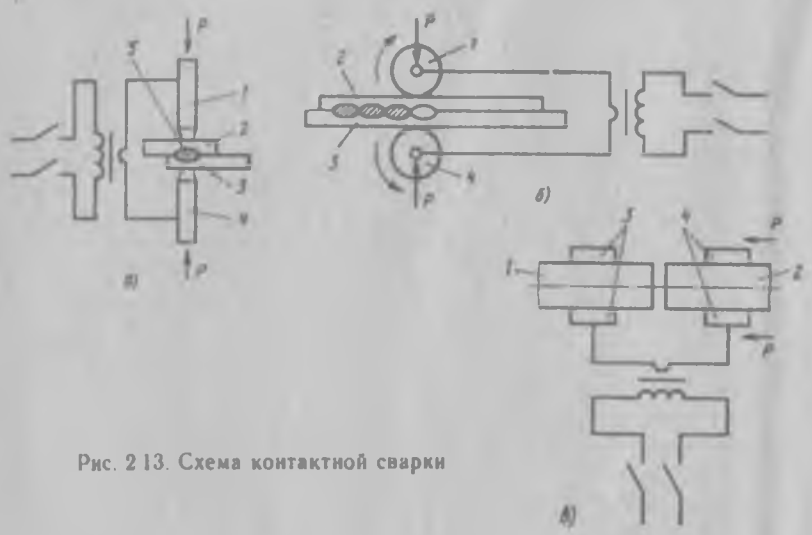


Рис. 2.13. Схема контактной сварки

Шовная (роликовая) сварка (рис. 2.13, *б*) осуществляется для соединения внахлестку металлов (сталей, сплавов Al, Ti и Cu) толщиной 0,6—3 мм. При сварке детали *2* и *3* зажимают между вращающимися электродами (роликами) *1* и *4*, с помощью которых происходят передача усилия к деталям, подвод тока и перемещение деталей. При шовной сварке образование непрерывного (герметического) и прочного шва происходит перекрытием последующей точки предыдущей, что делает возможным применение этого способа для изготовления различных емкостей.

Стыковая сварка (рис. 2.13, *в*) осуществляется по двум схемам (сварка сопротивлением и оплавлением) с использованием однотипного оборудования. Свариваемые детали *1* и *2* (стержни, трубы, рельсы) закрепляют в неподвижном *3* и подвижном *4* зажимах — электродах сварочной машины, к которым подводится ток. При сварке сопротивлением тщательно зачищенные торцы деталей соединяют под небольшим давлением, а после включения тока и разогрева металла в стыке давление повышают. Так сваривают

малоуглеродистые стали и цветные металлы небольшого сечения (до 200—250 мм²). При стыковой сварке плавлением стык свариваемых деталей разогревается до оплавления, а следующая за этим осадка способствует выдавливанию из стыка жидкого металла, что обеспечивает получение высокого качества сварных соединений. Сварка оплавлением позволяет сваривать изделия из углеродистых и легированных сталей, чугуна, сплавов Al и Ti сечением до 100 000 мм

Особые способы сварки. Термитная сварка (ТС) осуществляется при помощи теплоты, получаемой при сгорании порошкообразных оксида (Fe_2O_3) и элементов с большой активностью по отношению к кислороду (Al, Mg). Если в тигель из огнеупорного материала поместить смесь, состоящую из Al и Fe_2O_3 (алюминиевый термит), и зажечь с помощью термоспичек, то происходит экзотермическая реакция $Fe_2O_3 + 2Al_2O_3 + 2Fe$. Температура образующего расплава составляет 2200—2600 °С, а составляющие этот расплав Fe и Al_2O_3 разделяются в соответствии с их плотностью (железо внизу). Аккумулированный этим расплавом запас теплоты может быть использован для сварки плавлением и давлением. При ТС плавлением нагрев установленных в форме свариваемых деталей и плавление их кромок в месте образуемого стыка осуществляются жидким расплавом железа, служащим одновременно и присадочным металлом При ТС давлением на подготовленное для сварки соединение с плотно сжатыми торцами одевают форму. В форму заливается сначала расплав Al_2O_3, который смачивает свариваемый металл и создает на его поверхности пленку, препятствующую его свариванию с термитным металлом, а затем расплав Fe, который разогревает свариваемый металл. После этого применяют сдавливание деталей (осадку) с помощью стяжных прессов. В основном используется ТС плавлением для сварки рельсов, ремонта стальных и чугунных деталей с помощью алюминиевого термита и стальных проводов с помощью магниевого термита.

Диффузионная сварка — сварка давлением, при которой свариваемые детали подвергаются общему электронагреву в вакуумных камерах до температуры $(0,4 \div 0,8)T_{пл}$, длительной выдержке при этой температуре и сжатию с давлением до 25 МПа. Такие условия сварки способствуют протеканию процессов диффузии атомов в поверхностных слоях свариваемых металлов. Диффузионную сварку применяют для соединения трудносвариваемых металлов и сплавов (сталь с Al, Ti, W и Mo; Cu с Al, Ti), а также металлокерамических изделий.

Сварка трением — способ сварки давлением, при котором местный нагрев металла в стыке до температуры, близкой к $T_{пл}$, осуществляется благодаря работе сил трения, возникающих при перемещении друг относительно друга свариваемых деталей, сжатых осевой силой. Помимо нагрева металла трение способствует разрушению оксидных пленок в свариваемом стыке. При сварке

трением получают сварные соединения круглого сплошного или трубчатого сечений

Холодная сварка (ХС) — сварка давлением, осуществляемая без нагрева за счет пластической деформации металла в сварочной зоне. Для проведения ХС необходимо удалить оксиды со свариваемых поверхностей и сблизить их на расстояние параметра кристаллической решетки для образования межатомных связей между ними. Холодной сваркой можно получать соединения из пластичных металлов (Al, Cu, Ag, Au и их сплавов) внахлестку толщиной 0,2—15 мм и встык сечением до 700 мм².

Резка металлов. Резка металлов — отделение частей (заготовок) от сортового или листового металла способами кислородной, дуговой и воздушно-дуговой резки.

Кислородная резка — процесс сгорания металла в струе кислорода. Процесс резки начинается с нагрева металла в начальной точке реза до температуры, достаточной для воспламенения в кислороде с помощью подогревающего пламени, затем на нагретое место направляют струю чистого кислорода, который принято называть «режущим». «Режущий» кислород вызывает интенсивное окисление верхних слоев металла, которые, сгорая, выделяют дополнительное количество теплоты и нагревают лежащие ниже слои металла, в результате чего процесс горения металла в кислороде распространяется по всей толщине металла. Образующиеся при сгорании металла оксиды увлекаются струей «режущего» кислорода и выдуваются ею из зоны реза. Кислородная резка применима лишь для тех металлов, у которых: температура воспламенения ниже температуры плавления; температура плавления оксидов металла ниже температуры плавления самого металла; оксиды жидкотекучи; количества теплоты, выделяющейся при сгорании металла в кислороде, достаточно для поддержания непрерывного процесса резки; малая теплопроводность. Этим условиям удовлетворяют железо и малоуглеродистые стали. Для резки легированных сталей применяют кислородно-флюсовую резку. Флюс (порошок железа) сгорает в струе кислорода и повышает температуру в зоне реза настолько, что образующиеся тугоплавкие оксиды остаются в жидком состоянии и, будучи разбавлены продуктами сгорания железа, дают жидкотекучие, легкоудаляемые шлаки.

§ 2.3. Обработка металлов давлением

Во всех случаях обработки давлением требуемая форма и необходимые размеры изделию (заготовке) придаются пластической деформацией исходной заготовки, имеющей форму слитка или болванки, уже прошедшей предварительную обработку давлением. Таким образом, сущность обработки металла давлением состоит в целенаправленной пластической деформации, придающей ему определенные форму и размеры, в ходе которой разрушается грубозер-

нистая литая структура, устраняются пористость и рыхлость, улучшается металлургическое качество и создается благоприятная ориентировка вновь образовавшихся структурных составляющих металла.

Вследствие благоприятных структурных изменений, происходящих при обработке давлением, металл получает более высокий комплекс прочностных и пластических свойств по сравнению с литым. При горячей обработке давлением, когда металл обладает большой пластичностью при малой прочности, его зерна вытягиваются и трансформируются в волокна.

Волокнистое строение металла обеспечивает важные преимущества по сравнению с обычной зернистой структурой, поскольку прочность деформированного металла на разрыв вдоль волокон оказывается значительно выше, чем в поперечном направлении.

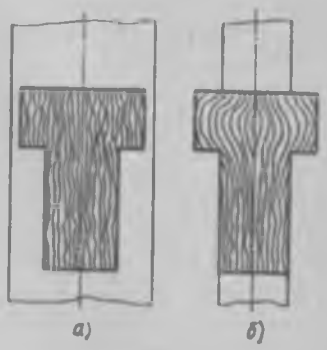


Рис. 2.14 Схемы силовых болтов:
а — точечного; *б* — с кованой головкой

То же можно сказать и о сопротивлении срезающим нагрузкам: прочность на срез поперек волокон значительно выше, чем вдоль них. Зная характер нагружения отдельных элементов деталей в эксплуатационных условиях, можно еще при изготовлении заготовок придавать волокнам наивыгоднейшую ориентировку, отвечающую характеру нагружения соответствующих элементов деталей, и этим обеспечивать большой запас прочности деталей. Например, показанный на рис. 2.14, *б* болт, изготовленный с соблюдением данного принципа, прочнее изображенного на рис. 2.14, *а*, где головка легко срезается.

Заготовка для деталей, полученные обработкой давлением, принято называть *поковками*. Исходными заготовками для крупных поковок, как правило, служат стальные слитки. Заготовки для мелких поковок получают путем разрезки на мерные куски-болванки так называемых прокатных профилей — металлических балок или прутков различной формы поперечного сечения, получаемых прокаткой.

Прокатка. Прокатка представляет собой процесс деформирования слитка или иной продолговатой металлической заготовки между двумя вращающимися валками, расстояние между рабочими поверхностями которых меньше высоты заготовки (рис. 2.15). Целью прокатки является получение разнообразной продукции, различающейся профилями и размерами поперечного сечения, а также длинами балок, прутков и составляющей так называемый сортамент проката. Сортамент стального проката включает следующие пять основных групп (рис. 2.16):

сортовой прокат простого и фасонного профиля. Простой профиль (рис. 2.16, *а*) используется для порезки на заготовки, которые идут либо на дальнейшую обработку давлением — ковку или штамповку, либо на механическую обработку для изготовления различных деталей. Фасонный профиль (рис. 2.16, *б*) главным образом используется для различных строительных конструкций, включая железнодорожные пути;

листовой прокат делится на толстолистовую сталь толщиной свыше 4 мм и тонколистовую 0,2—3,75 мм;

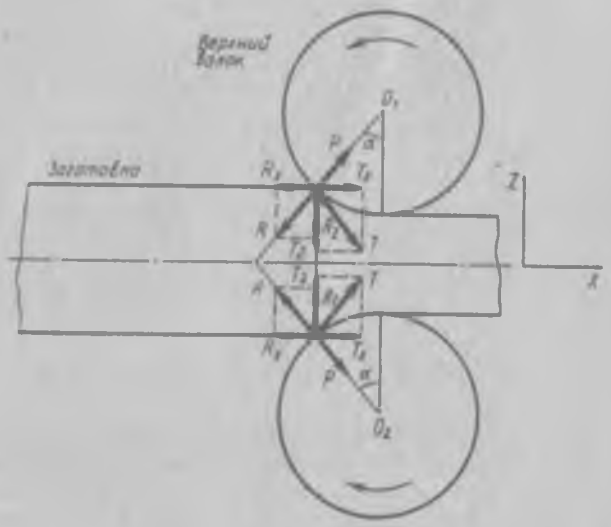


Рис 2 15. Схема прокатки с указанием действующих сил

трубы бесшовные различного диаметра с разной толщиной стенок, разнообразного назначения;

специальный прокат включает в себя вагонные колеса, шпунтовые сваи, автоободья и т. д.;

периодический прокат (рис. 2.16, *в*) — прокат с периодически изменяющимся по длине профилем. Он используется в качестве заготовок для штамповки (например, заготовок шатунов автомобильных двигателей) или непосредственно для механической обработки.

Существуют также специально разработанные сортаменты для выпуска проката из цветных металлов и сплавов — меди, алюминия, латуни, дюраля в виде листов, ленты, труб, прутков и других изделий. Важнейшей особенностью деформации металла при прокатке является получение волокнистой структуры металла с ори-

ентировкой волокон вдоль направления прокатки, т. е. перпендикулярно осям вращения валков.

Это объясняется тем, что при сдавливании сечения заготовки между валками вытяжка металла в основном происходит в направлении наименьшего сопротивления, т. е. в наружную сторону. Деформации и вытяжке в поперечном направлении препятствуют трение о поверхности валков. Так как общая вытяжка металла заготовки складывается из вытяжек его отдельных зерен, то последние должны превратиться в волокна. Заготовка захватывается в рабочее пространство между валками и перемещается силами трения, возникающими между нею и валками (см. рис. 2.15).

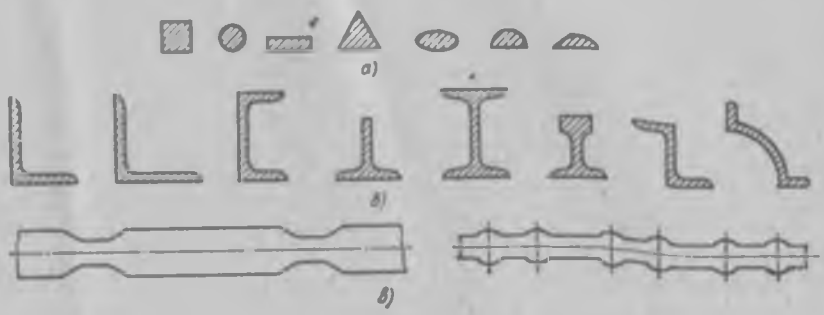


Рис. 2.16. Сортамент стального проката

Действительно, при подходе заготовки к валкам в точках первичного контакта возникают, с одной стороны, радиально ориентированные активные P и равные им реактивные (действующие на заготовку) R силы, а с другой — силы трения T, касательные к поверхности валков в точках упомянутого контакта. Каждая из сил трения равна произведению нормальной активной силы P на коэффициент трения f, т. е. $T = Pf = Rf$. Рассмотрим проекции сил R и T на продольное (горизонтальное) направление X и вертикальное — Z. При этом заметим, что силы R_x выталкивают заготовку из рабочего пространства, а силы T_x — втягивают в него (захватывают заготовку). Условием захвата заготовки валками и осуществления прокатки будет неравенство $T_x > P_x$. Но так как $T_x = T \cos\alpha = Rf \cos\alpha$, а $P_x = R \sin\alpha$, то условием прокатки будет $Rf \cos\alpha > R \sin\alpha$. Разделив обе части неравенства на $R \cos\alpha$, получим $f > \operatorname{tg}\alpha$, где α — угол захвата.

Таким образом, условием захвата заготовки валками и осуществление процесса прокатки является превышение коэффициента трения над тангенсом угла захвата. Заметим, что обжимающими или кующими заготовку силами являются силы T_z и R_z.

Прокатка металлов осуществляется на прокатных станах. Основными рабочими элементами прокатных станов являются валки, имеющие цилиндрическую форму. Валки размещаются в основной

части прокатного стана — рабочей клети. Рабочая часть валка называется *бочкой* Бочки могут быть гладкими или ручьевыми. Первые применяются для прокатки листов и лент, а вторые — для сортового металла. Ручьи представляют собой кольцевые вырезы на поверхности валка. Совпадающие ручьи верхнего и нижнего валков образуют калибры, с помощью которых сортовому прокату постепенно придаются требуемые профили.

Прокатные станы классифицируются по ряду признаков, основным из которых является род выпускаемой продукции. В связи с этим можно выделить следующие наиболее распространенные виды станов: сортопрокатные для выпуска сортового проката; листовые и полосовые станы горячей прокатки; трубопрокатные станы; станы холодной прокатки стали и цветных металлов (тонколистовые, лентопрокатные, фольгопрокатные и т. д.); деталепрокатные станы для выпуска специального или периодического проката.

Холодная прокатка ленты из алюминиевых сплавов АМц, Д1, Д16 производится из горячекатаных листов толщиной около 6 мм. Ленту толщиной до 0,5—0,6 мм катают без промежуточного умягчающего отжига Заготовками для холодной прокатки лент из меди и латуни Л62 служат свернутые в рулоны полосы толщиной 5—6 мм, полученные горячей прокаткой из слитков. Отожженные и протравленные рулоны прокатываются на специальных станах до толщины 0,01—0,2 мм в течение четырех-пяти операций холодной прокатки, чередующихся умягчающими отжигами и травлением для удаления окалины.

Тонкие листы и ленту из меди или латуни получают холодной прокатной из горячекатаных заготовок толщиной 10—15 мм с предварительно удаленными фрезерованием поверхностными дефектами. Прокатку ведут до требуемой толщины в несколько обжатий, применяя промежуточные отжиги при 450—800 °С для восстановления пластичности металла.

Для холодной прокатки предпочтительнее однофазные латуни с содержанием цинка менее 30%, как обладающие большим запасом пластичности. Для предотвращения налипания меди и латуни на стальные валки применяют жидкую смазку (трансформаторное масло, керосин, веретенное масло и т. д).

Ковка и штамповка. При ковке деформирование металла заготовки осуществляется путем целенаправленно наносимых ударов или нажатий. В зависимости от используемого оборудования ковка делится на свободную и ковку в штампах (штамповку).

Свободная ковка состоит в том, что происходящая формообразующая пластическая деформация металла направляется в основном искусством оператора-кузнеца, от которого требуется высокая квалификация. Придание заготовке требуемых формы и размеров осуществляется за счет выполнения ряда простейших ковочных операций, для реализации которых может применяться несложный кузнечный инструмент.

При штамповке требуемые формы и размеры заготовки получаются в результате принудительной деформации металла в ручье специального приспособления — штампа (рис. 2.17). В штампе по периферии ручья *3* на стыке нижней *1* и верхней *2* частей штампа выполняется заусенечная канавка для выхода избыточного металла, образующего удаляемый после штамповки заусенец (рис. 2.18).

Несложные заготовки штампуются в одноручьевых штампах, а сложные — в многоручьевых, в которых при переходе от ручья к ручью поковка постепенно приобретает требуемые размеры

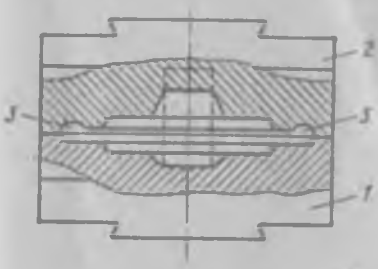


Рис. 2.17. Схема штамповки

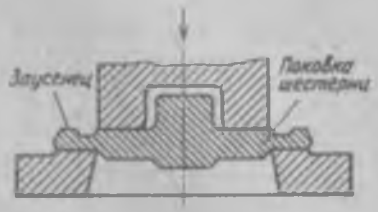


Рис. 2.18 Схема обрезки заусенца

и форму. Исходные заготовки для штамповки отрезаются от сортового проката. Ими могут служить изделия периодического проката. Перед штамповкой металл нагревается до определенной, зависящей от рода металла температуры с целью повышения его пластичности и уменьшения усилий при обработке. Свободная ковка и штамповка производятся с помощью специальных ковочных или штамповочных молотов и прессов.

Вследствие интенсивной теплоотдачи в атмосферу и теплопередачи в стенки ручья штампа происходит быстрое охлаждение заготовки, что приводит к наклепу и охрупчиванию ее металла. Во избежание образования трещин это требует дополнительных промежуточных нагревов цветных заготовок. При штамповке латуни следует иметь в виду, что при температуре выше 680 °С из нее интенсивно возгоняется цинк в виде порошка ZnO. Это влечет изменение ее химического состава и прочностных характеристик. Следует также учитывать, что при горячей штамповке латуни более хрупкая при комнатной температуре β-фаза оказывается пластичнее α-фазы. Поэтому для горячей штамповки однофазных латуней следует выбирать марки с предельным для α-латуней содержанием цинка — до 39 %. После нагрева в результате $\alpha \rightarrow \beta$-превращения их структура состоит из $\alpha + \beta$- или только β-зерен и имеет более высокую пластичность, чем у латуней с меньшим содержанием цинка, не претерпевающих $\alpha \rightarrow \beta$-превращений.

Ковка и штамповка дюралюминия производится при температуре около 380 °С со степенями деформации соответственно 3—5 и 2—3 %

С целью экономии металла при обработке давлением осваиваются и внедряются более рациональные ее виды.

Так, в прокатном производстве применяются так называемые облегченные, тонкостенные, сложные, фасонные и другие экономичные профили проката. Прокаткой получаются экономичные профильные заготовки и изделия: шары, валы, зубчатые колеса, сверла, винты, различные виды периодического проката (для экономии металла при штамповке).

Применяется так называемая безоблойная штамповка, т. е. штамповка с отсутствующим или минимальным по размерам заусенцам.

§ 2.4. Обработка металлов резанием

Процесс резания металлов заключается в срезании с обрабатываемой заготовкой слоя металла — припуска, специально оставленного на обработку, с целью получения детали с заданными чертежом формой, размерами и шероховатостью поверхностей.

Основными видами обработки резанием являются точение, строгание, сверление, фрезерование и шлифование. Обработка металлов резанием осуществляется на металлорежущих станках — токарных, строгальных, сверлильных, фрезерных и шлифовальных — с использованием различных режущих инструментов — резцов, сверл, фрез, шлифовальных кругов.

Удаляемый в процессе резания металл — припуск — превращается в стружку, при этом наличие стружки является характерным признаком всех разновидностей процесса резания металлов.

Для осуществления процесса резания необходимо иметь главное движение резания и движения подачи (рис. 2.19, *а*). Главное движение резания (главное движение) $Д_r$ имеет наибольшую скорость и называется *скоростью резания*. Движение подачи $Д_s$ имеет скорость меньшую, чем скорость главного движения резания, и предназначено для срезания припуска со всей поверхности, подлежащей обработке. Это движение называется *подачей*. Главное движение и движение подачи в зависимости от вида обработки могут быть вращательными или прямолинейно поступательными и совершаться как заготовкой, так и режущим инструментом.

При точении главное движение $Д_r$ — вращательное движение заготовки, движение подачи $Д_s$ — прямолинейное поступательное движение режущего инструмента — резца (рис. 2.19, *а*). Перемещением резца относительно заготовки срезается ее исходная поверхность, которая называется обрабатываемой поверхностью *1*, и образуется новая поверхность, которая называется обработанной поверхностью *3*. Временно существующая поверхность в процессе

резания между обрабатываемой и обработанной поверхностями называется поверхностью резания *2*. Расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное в направлении, перпендикулярном обработанной поверхности, определяется глубиной резания Δ. При точении глубина резания выражается уравнением $\Delta = (D - d)/2$, где D и d — диаметры обрабатываемой и обработанной поверхностей, мм.

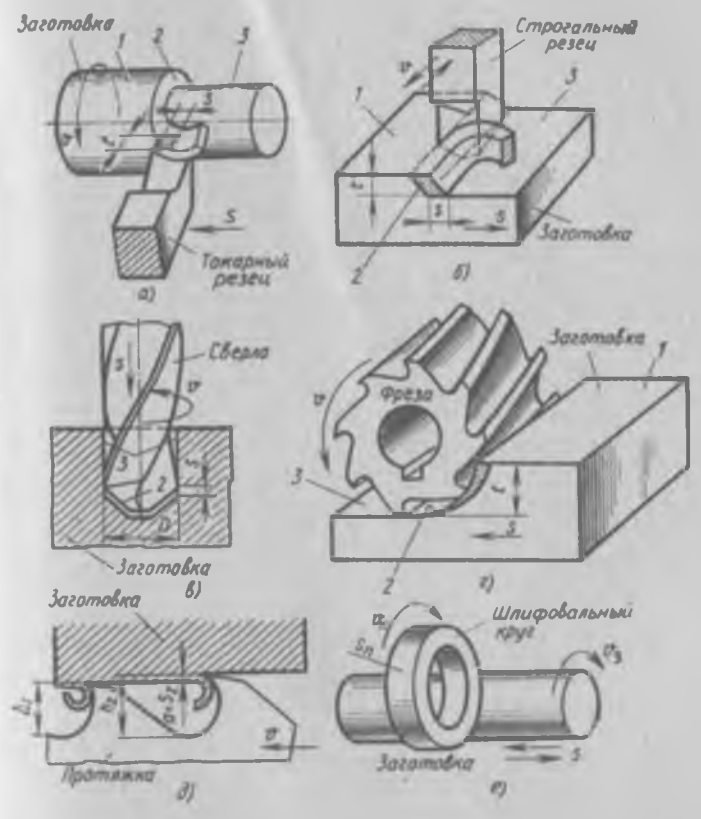


Рис. 2.19. Схема основных видов обработки металлов резанием

Скорость резания при точении v — линейная скорость точек обрабатываемой поверхности заготовки, м/мин, которая определяется следующим уравнением: $v = 10^{-3}\pi Dn$, где D — диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм; n — частота вращения заготовки, об/мин. Подача s при точении количественно оценивается расстоянием, на которое перемещается режущий инструмент — резец — в направлении движения подачи за один оборот заготовки, и имеет размерность мм/об.

Скорость резания v, подача s и глубина резания Δ являются параметрами режима резания при точении.

При строгании главное движение сообщается резцу, а движение подачи — заготовке (рис. 2.19, *б*) или как главное движение, так и движение подачи сообщается только резцу.

При сверлении (зенкеровании и развертывании) как главное движение, так и движение подачи обычно сообщается режущему инструменту — сверлу (зенкеру, развертке) (рис. 2.19, *в*), однако есть схемы сверления, в которых главное движение сообщается заготовке.

При фрезеровании главное движение сообщается режущему инструменту — фрезе, а движение подачи — заготовке (рис. 2.19, *г*), однако есть схемы фрезерования, согласно которым как главное движение, так и движение подачи сообщается фрезе.

При круглом (рис. 2.19, *д*) и плоском (рис. 2.19, *е*) шлифовании главное движение сообщается режущему инструменту — шлифовальному кругу, а движение подачи — заготовке.

Скорость резания v при сверлении (зенкеровании и развертывании), фрезеровании и шлифовании определяется, так же как и при точении, только диаметром режущего инструмента. Скорость резания v при шлифовании имеет вид $v = 10^{-3}\pi Dn/60$ м/с).

Скорость резания v при строгании (м/мин) является линейной скоростью перемещения резца или заготовки.

Подача s и глубина резания Δ определяются аналогично точению, только при строгании подача s имеет размерность мм/дв. ход (дв. ход — двойной ход резца или заготовки), а при сверлении (зенкеровании, развертывании) и фрезеровании также рассматривается подача на режущую кромку (зуб) режущего инструмента s_z, которая определяется уравнением $s_z = s/z$, где z — количество режущих кромок (зубьев) инструмента. При фрезеровании рассматривается также минутная подача s, которая численно оценивается значением перемещения фрезы относительно заготовки за минуту и имеет размерность мм/мин. При шлифовании подача s (мм/об) определяется в долях ширины шлифовального круга B: $s = kB$, где B — ширина шлифовального круга, мм, а k — коэффициент, принимаемый в зависимости от точности обработки 0,2—0,8.

Режущим инструментом называется инструмент для обработки металлов резанием. Наиболее распространенный режущий инструмент — резец — состоит из режущей части Б и стержня А (рис. 2.20). Режущая часть имеет переднюю поверхность *1* и несколько задних поверхностей *3* и *4*, из которых одна называется главной задней поверхностью *4*, а остальные — вспомогательными задними поверхностями *3*. Передняя поверхность *1* обращена по ходу главного движения в сторону срезаемого слоя на обрабатываемой заготовке и по ней перемещается стружка. Главная задняя поверхность *4* обращена к поверхности резания, вспомогательная задняя поверхность *3* — к обработанной поверхности заготовки.

Передняя и задние поверхности, пересекаясь, образуют главную *6* и вспомогательную *2* режущие кромки. Точка пересечения главной и вспомогательной режущих кромок образует вершину *5* режущей части резца. Режущие кромки и примыкающие к ним контактные поверхности на передней и задних поверхностях образуют соответственно главное и вспомогательное лезвия. На всех инструментах лезвия в поперечном сечении имеют форму клина.

Положение поверхностей и кромок режущей части инструмента координируется относительно его державки угловыми размерами, называемыми геометрическими параметрами. Геометрические пара-

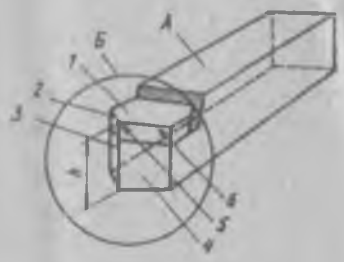


Рис. 2.20. Конструкция резца

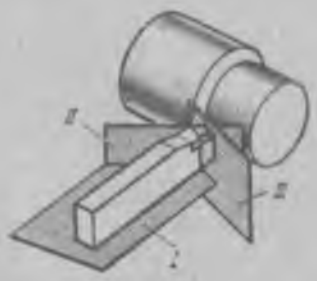


Рис. 2.21. Вспомогательные плоскости при точении

метры инструмента рассматриваются с использованием основной плоскости, а также плоскостей резания и главной секущей (рис. 2.21).

Основная плоскость *I* — плоскость, параллельная продольной и поперечной подачам и совпадающая с основанием державки резца.

Плоскость резания *II* — плоскость, касательная к поверхности резания и проходящая через главную режущую кромку.

Главная секущая плоскость *III* — плоскость, перпендикулярная проекции главной режущей кромки на основную плоскость.

Главные углы рассматриваются в главной секущей плоскости (рис. 2.22, *а*).

Главный передний угол γ — угол между передней поверхностью инструмента и плоскостью, перпендикулярной плоскости резания и проходящей через главную режущую кромку. Главный задний угол α — угол между главной задней поверхностью и плоскостью резания. Угол заострения β — угол между передней и главной задней поверхностями. Угол резания δ — угол между плоскостью резания и передней поверхностью.

Углы в плане измеряются в основной плоскости (рис. 2.22, *б*).

Главный угол в плане φ — угол между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи.

Вспомогательный угол в плане φ_1 — угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи.

Инструментальные материалы. Металлорежущий инструмент может производить срезание слоя материала с поверхности заготовки в том случае, если его режущая часть изготовлена или оснащена инструментальным материалом, обладающим высокой твердостью, прочностью, температуростойкостью и износостойкостью.

Под температуростойкостью $\Theta_к$ инструментального материала понимается наибольшая температура, при которой он сохраняет высокое значение твердости и прочности.

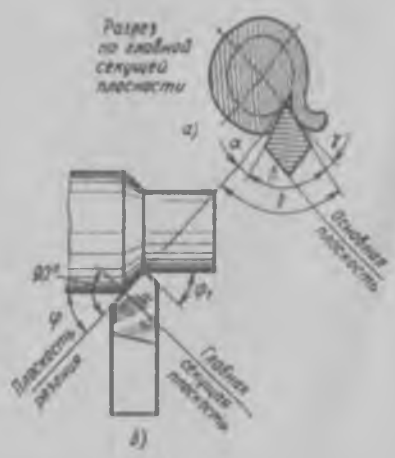


Рис. 2.22. Геометрические параметры резца

Износостойкость материала определяет его способность сопротивляться истирающему действию материала, с которым он находится в контакте.

В качестве инструментальных материалов для лезвийных инструментов используются быстрорежущие стали, твердые сплавы (металлокерамика), минералокерамические сплавы (керметы), сверхтвердые материалы, синтетические алмазы.

Быстрорежущие инструментальные стали являются высоколегированными сталями с добавками вольфрама (обозначается буквой Р), молибдена (М), ванадия (Ф), кобальта (К) при содержании примерно 4 % хрома и 1 % углерода. Наибольшее распространение в настоящее время находят следующие марки этих сталей: Р18, Р9Ф5, Р6М3, Р6М5, Р9К5, Р9К5Ф5. Твердость сталей находится в пределах HRA 62—64, температуростойкость 620—640 °С.

Твердые сплавы делятся на три группы: вольфрамокобальтовую (ВК), вольфрамотитанокобальтовую (ТК) и вольфрамотитанотанталокобальтовую (ТТК). При обозначении марок твердых сплавов процентное содержание карбидов титана (Т), суммарное содержание карбидов титана и тантала (ТТ) и металлического кобальта (К), остальным является карбид вольфрама. В твердых сплавах указанные порошкообразные карбиды соединяются в монолит металлическим кобальтом. В конце обозначения марки твердого сплава могут стоять буквы М, ОМ, Б, что означает зернистость: мелкозернистый, особо мелкозернистый и крупнозернистый.

Твердые сплавы группы ВК (ВК3М, ВК4, ВК6М, ВК6-ОМ, ВК8, ВК10-ОМ), группы ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4) и группы ТТ (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б).

Твердость указанных марок твердых сплавов составляет HRA 87—91, температуростойкость 800—1250 °С.

Покрытие твердых сплавов тонким слоем (5—15 мкм) карбидов (титана, ниобия), боридов, нитридов позволяет повысить их износостойкость в 5—6 раз.

Основой минералокерамических сплавов (керметов) является корунд—оксид алюминия Al_2O_3. Температуростойкость минералокерамики и керметов составляет 1500—1300 °С.

Сверхтвердые материалы являются синтетическими материалами на основе гексагонального или кубического нитрида бора, который по твердости превосходит керметы и уступает только синтетическому алмазу. Температуростойкость композитов и нитрида бора достигает 1300—1800 °С.

Синтетические алмазы образуются при спекании углерода под высоким давлением и при значительной температуре. В зависимости от технологии выращивания кристаллы алмазов имеют различное строение; следовательно, различные физико-механические свойства и по твердости приближаются к природным монокристаллам алмаза. Температуростойкость алмазов невелика — примерно 650 °С, но она компенсируется их чрезвычайно высокой твердостью, износостойкостью и теплопроводностью.

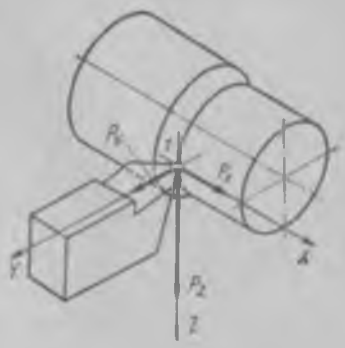


Рис 2.23. Составляющие силы резания

В процессе резания при перемещении режущего инструмента относительно заготовки ему приходится преодолевать силу сопротивления обрабатываемых материалов пластической деформации, силу сопротивления пластически деформированных слоев металла разрушению в местах возникновения новых (обработанных) поверхностей и силы трения стружки по передней поверхности инструмента и обработанной поверхности о его задние поверхности. Результирующая этих сил называется *силой резания P*. Для удобства расчетов силу резания P рассматривают в декартовой координатной системе XYZ с центром, совпадающим с вершиной разреза *1* (рис. 2.23), причем ось Y совпадает с геометрической осью державки резца, ось X параллельна оси вращения обрабатываемой заготовки, а ось Z совпадает с вектором скорости резания v и проходит через вершину резца — точку *1*. При этом опорная плоскость державки резца параллельна плоскости XY, а вектор скорости подачи v_s проходит через вершину резца — точку *1*.

Проекция силы P на оси ZYX называется соответственно вертикальной (главной) P_z, радиальной P_y и осевой P_x составляющей силы резания.

При угле $\varphi = 45°$ соотношение между составляющими $P_y : P_y : P_x = 1 : 0{,}4 : 0{,}25$. Зная составляющие P_z, P_y, P_x, можно вычислить силу резания по следующей зависимости: $P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x}$.

Инструментальные материалы. Металлорежущий инструмент может производить срезание слоя материала с поверхности заготовки в том случае, если его режущая часть изготовлена или оснащена инструментальным материалом, обладающим высокой твердостью, прочностью, температуростойкостью и износостойкостью.

Под температуростойкостью $\Theta_к$ инструментального материала понимается наибольшая температура, при которой он сохраняет высокое значение твердости и прочности.

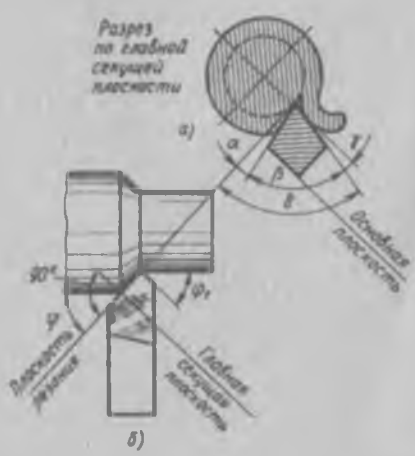


Рис. 2.22. Геометрические параметры резца

Износостойкость материала определяет его способность сопротивляться истирающему действию материала, с которым он находится в контакте.

В качестве инструментальных материалов для лезвийных инструментов используются быстрорежущие стали, твердые сплавы (металлокерамика), минералокерамические сплавы (керметы), сверхтвердые материалы, синтетические алмазы.

Быстрорежущие инструментальные стали являются высоколегированными сталями с добавками вольфрама (обозначается буквой Р), молибдена (М), ванадия (Ф), кобальта (К) при содержании примерно 4 % хрома и 1 % углерода. Наибольшее распространение в настоящее время находят следующие марки этих сталей: Р18, Р9Ф5, Р6М3, Р6М5, Р9К5, Р9К5Ф5. Твердость сталей находится в пределах HRA 62—64, температуростойкость 620—640 °С.

Твердые сплавы делятся на три группы: вольфрамокобальтовую (ВК), вольфрамотитанокобальтовую (ТК) и вольфрамотитанотанталокобальтовую (ТТК). При обозначении марок твердых сплавов процентное содержание карбидов титана (Т), суммарное содержание карбидов титана и тантала (ТТ) и металлического кобальта (К), остальным является карбид вольфрама. В твердых сплавах указанные порошкообразные карбиды соединяются в монолит металлическим кобальтом. В конце обозначения марки твердого сплава могут стоять буквы М, ОМ, Б, что означает зернистость: мелкозернистый, особо мелкозернистый и крупнозернистый.

Твердые сплавы группы ВК (ВК3М, ВК4, ВК6М, ВК6-ОМ, ВК8, ВК10-ОМ), группы ТК (Т5К10, Т15К6, Т30К4) и группы ТТ (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б).

Твердость указанных марок твердых сплавов составляет HRA 87—91, температуростойкость 800—1250 °С.

Покрытие твердых сплавов тонким слоем (5—15 мкм) карбидов (титана, ниобия), боридов, нитридов позволяет повысить их износостойкость в 5—6 раз.

Основой минералокерамических сплавов (керметов) является корунд—оксид алюминия Al_2O_3. Температуростойкость минералокерамики и керметов составляет 1500—1300 °С.

Сверхтвердые материалы являются синтетическими материалами на основе гексагонального или кубического нитрида бора, который по твердости превосходит керметы и уступает только синтетическому алмазу. Температуростойкость композитов и нитрида бора достигает 1300—1800 °С.

Синтетические алмазы образуются при спекании углерода под высоким давлением и при значительной температуре. В зависимости от технологии выращивания кристаллы алмазов имеют различное строение; следовательно, различные физико-механические свойства и по твердости приближаются к природным монокристаллам алмаза. Температуростойкость алмазов невелика — примерно 650 °С, но она компенсируется их чрезвычайно высокой твердостью, износостойкостью и теплопроводностью.

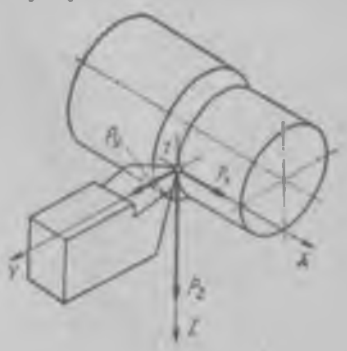


Рис. 2.23. Составляющие силы резания

В процессе резания при перемещении режущего инструмента относительно заготовки ему приходится преодолевать силу сопротивления обрабатываемых материалов пластической деформации, силу сопротивления пластически деформированных слоев металла разрушению в местах возникновения новых (обработанных) поверхностей и силы трения стружки по передней поверхности инструмента и обработанной поверхности о его задние поверхности. Результирующая этих сил называется *силой резания P*. Для удобства расчетов силу резания P рассматривают в декартовой координатной системе XYZ с центром, совпадающим с вершиной разреза *1* (рис. 2.23), причем ось Y совпадает с геометрической осью державки резца, ось X параллельна оси вращения обрабатываемой заготовки, а ось Z совпадает с вектором скорости резания v и проходит через вершину резца — точку *1*. При этом опорная плоскость державки резца параллельна плоскости XY, а вектор скорости подачи v_s проходит через вершину резца — точку *1*.

Проекция силы P на оси ZYX называется соответственно вертикальной (главной) P_z, радиальной P_y и осевой P_x составляющей силы резания.

При угле $\varphi = 45°$ соотношение между составляющими $P_y : P_y : P_x = 1 : 0{,}4 : 0{,}25$. Зная составляющие P_z, P_y, P_x, можно вычислить силу резания по следующей зависимости: $P = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x}$

Механическая работа, затрачиваемая на пластическую деформацию и разрушение металла в процессе стружкообразования и образования новой поверхности, а также работа сил трения по передней и задним поверхностям инструмента почти полностью превращается в теплоту. Теплота, выделяемая в зоне резания, нагревает стружку, обрабатываемую заготовку и режущий инструмент, в которых образуются температурные поля. Наибольшая температура, возникающая в процессе резания, не должна превышать температуростойкости инструментального материала.

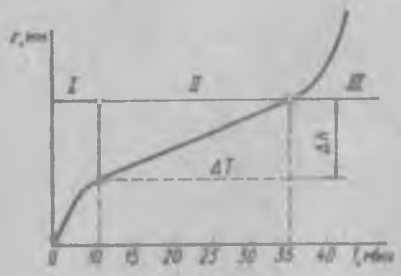


Рис. 2.24. Износ режущего инструмента во времени

В процессе резания происходит непрерывный износ режущего инструмента по передней и задним поверхностям.

Износ режущего инструмента во времени протекает монотонно, но не равномерно (рис. 2.24). В I период происходит приработка режущего инструмента, во II — его нормальный износ, а в III — катастрофический износ режущего инструмента вплоть до его разрушения. Так как разрушение режущего инструмента в процессе его работы недопустимо, необходимо прекратить им процесс резания до наступления периода его катастрофического износа и произвести переточку. Время работы режущего инструмента до его затупления $h_{зкр}$ называется *стойкостью*, при этом величина $h_{зкр}$ называется *критерием затупления* режущего инструмента.

Обработка на токарных станках. Точение производится на токарных станках и применяется для обработки наружных и внутренних тел вращения: цилиндрических, конических, сферических и фасонных.

При точении заготовка закрепляется в установленном на шпинделе станка патроне и вращается, а закрепленный в резцедержателе резец совершает поступательное движение в продольном $s_{пр}$ и поперечном $s_{поп}$ направлениях.

Токарно-винторезный станок общего назначения показан на рис. 2.25. На основании *1* закреплены станина *11* и корыто *12* для сбора стружки. На станине *11* размещены передняя бабка *3* с коробкой скоростей для вращения заготовки с различной частотой и коробка подач *2* для перемещения режущего инструмента с различными подачами $s_{пр}$ и $s_{поп}$. По направляющим станины *11* перемещается суппорт *6* с закрепленным в резцедержателе резцом и фартуком *9*, а также задняя бабка *7*, предназначенная для поддержания конца длинной заготовки. Привод станка — электродвигатель — установлен в основании *1* и закрыт кожухом.

Движение от коробки скоростей *2* передается механизмам фартука *9* через ходовой вал *8* (при точении) или через ходовой винт *10* (при нарезании резьбы резцом). На передних стенках передней бабки *3*, коробки передач *2* и фартука *9* расположены рукоятки управления станком. Экран *4* и щиток *5* обеспечивают безопасность работы на станке. Электрооборудование станка сосредоточено в электрошкафу *13*.

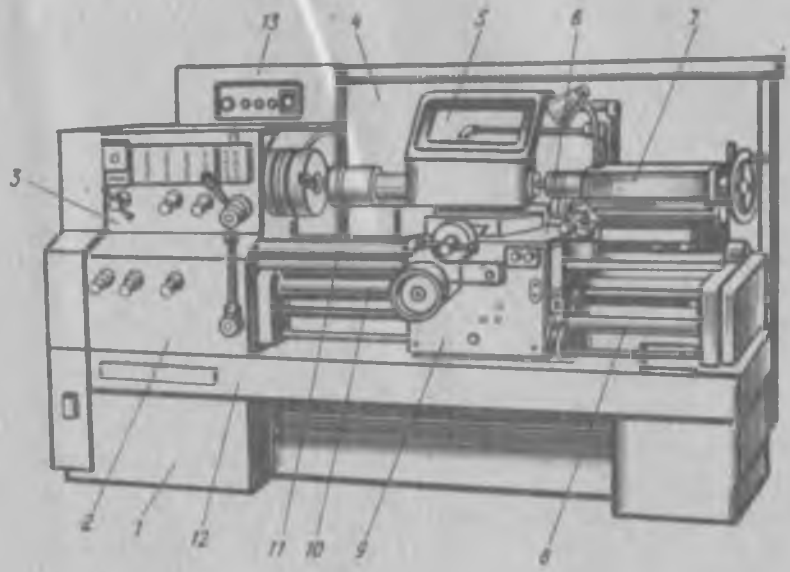


Рис. 2.25. Токарно-винторезный станок

Обработка на сверлильных станках. Сверлильные станки предназначены для изготовления отверстий в деталях. Для повышения точности и качества отверстий после их обработки используются зенкеры и развертки.

Сверла, зенкеры и развертки применяются для изготовления сквозных, глухих, ступенчатых и глубоких отверстий с отношением глубины отверстия к его диаметру более пяти.

На рис. 2.26 показаны основные части сверла (*а*), зенкера (*б*) и развертки (*в*). Режущая часть *1* у сверл имеет две режущие и поперечную кромки, у зенкеров — несколько режущих кромок (3—4 и более), у разверток режущая часть может иметь начальный конус *1* и заборный конус *2* с большим числом режущих кромок (6—12 и более).

Направляющая часть *2* у сверл имеет две ленточки и обратный конус ($D > D_1$) с углом $\varphi' = 1 \div 3°$ для уменьшения сил трения сверла о стенки разрабатываемого отверстия; у зенкеров направ-

ляющая часть *2* — несколько ленточек и угол $\varphi' = 1 \div 2°$; развертки кроме направляющей имеют калибрующую часть *3*, точное изготовление которой обеспечивает получение отверстий с высокой точностью и качеством обработанной поверхности.

Рабочая часть *3* у сверл и зенкеров включает режущую *1* и направляющую *2* части, а у разверток рабочая часть *5* дополнительно имеет обратный конус *4* с углом $\varphi_1 = 4 \div 5°$.

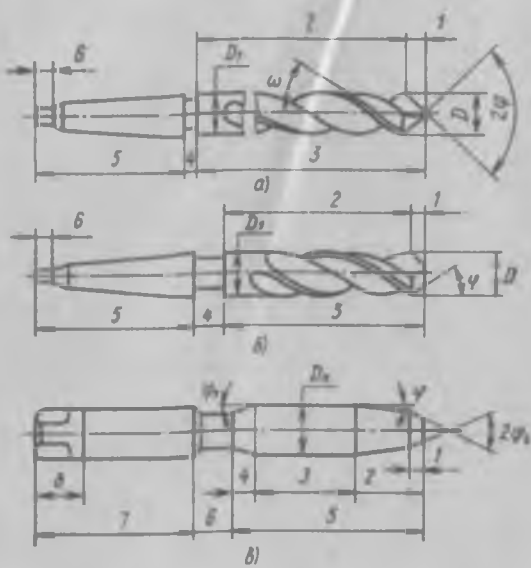


Рис. 2.26. Основные части и конструкции сверла (*а*), зенкера (*б*), развертки (*в*)

Шейка *4* у сверл и зенкеров и шейка *6* у разверток является переходной частью от рабочей части инструмента к его хвостику *5* (*7* у разверток). Лапка *6* предназначена для выбивания инструмента из патрона.

У сверл и зенкеров угол наклона винтовых канавок *8* для выхода стружки из обрабатываемого отверстия составляет соответственно 52—40 и 20—30°.

Угол при вершине сверла 2φ находится в пределах 60—140°, угол 2φ у зенкеров — в пределах 90—120°, угол $2\varphi_0$, разверток — 90°, а угол $\varphi = 1{,}5°$.

Обработку отверстий, как правило, производят на вертикально- и радиально-сверлильных станках с вертикальным расположением шпинделя.

Вертикально-сверлильный станок показан на рис. 2.27. Обрабатываемая деталь закрепляется на столе *2*, который с помо-

щью винта *1* устанавливается на определенную высоту в зависимости от высоты заготовки и закрепляется рукояткой *8* относительно станины *9*. Режущий инструмент закрепляется в шпинделе *3*, получающем вращательное движение от электродвигателя *7* через коробку скоростей *6* и движение подачи от коробки подач *5*. Вертикальное перемещение шпинделя *3* также может осуществляться вручную с помощью маховика *3*.

Радиально-сверлильные станки предназначены для обработки тяжелых и крупногабаритных заготовок, которые сложно или невозможно обработать на вертикально-сверлильных станках. Продольно-строгальные станки применяются для обработки крупногабаритных и тяжелых заготовок.

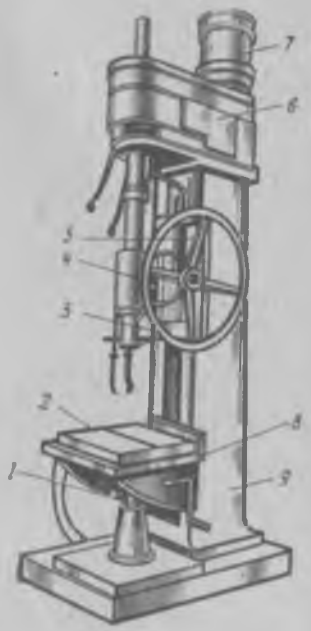


Рис. 2.27. Вертикльно-сверлильный станок

Обработка на фрезерных станках. Фрезерные станки предназначены для обработки плоских и фасонных поверхностей, пазов, канавок, выступов, зубчатых колес, наружных и внутренних резьб.

Фрезерование осуществляется режущим инструментом—фрезой, представляющей собой тело вращения, на образующей и(или) торцевой поверхности которого расположены режущие зубья. Главное движение при фрезеровании—вращение фрезы; движение подачи совершает заготовка (иногда фреза).

Фрезы (рис. 2.28) могут быть самых различных конструкций, из которых наиболее распространенными являются цилиндрические (*а*), дисковые (*б*), концевые (*в*), торцевые (*г*) и фасонные (*д*).

Из группы фрезерных станков наибольшее распространение находят горизонтально-фрезерные, вертикально-фрезерные и продольно-фрезерные.

В горизонтально-фрезерном станке (рис. 2.29) шпиндель *6* расположен горизонтально. На станине *2* размещен хобот *7*, несущий поддерживающую серьгу *8*. Фреза или набор фрез укрепляется в оправке, один конец которой устанавливается в шпиндель *6*, а второй—в отверстие серьги *8*. Консоль *1* перемещается в вертикальном направлении по направляющим станины *2*. По направляющим консоли *1* перемещаются салазки *3*. На консоли *7* установлена поворотная плита *5*. По направляющим плиты салазок *3* перемещается стол *4*, на котором закрепляется обрабатываемая заготовка.

Вертикально-фрезерный станок имеет вертикально расположенную шпиндельную головку, которая при обработке наклонных поверхностей может поворачиваться в вертикальной плоскости. Продольно-фрезерные станки предназначены для обработки крупногабаритных и тяжелых заготовок.

Обработка шлифованием. Шлифованием называется способ обработки материалов резанием, осуществляемый массовым скоростным ($v = 8 \div 50$ м/с и более) микрорезанием (царапанием) поверхностных слоев твердых тел большим числом мельчайших зерен, сцементированных в инструмент с помощью связки.

Процесс шлифования используется как завершающая чистовая обработка с получением размеров деталей с точностью по

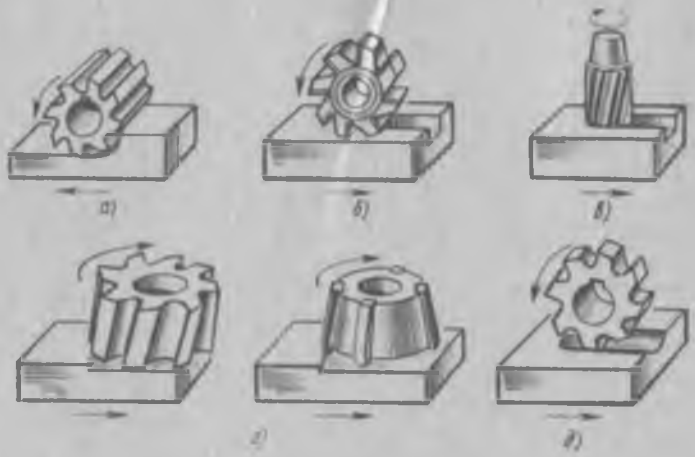


Рис. 2.28. Основные виды фрез

6—7-му квалитетам и шероховатостью поверхности $R_a = 0{,}08 \div 0{,}32$ мкм и как обдирочная обработка при очистке литья, поковок и т. д. Шлифование осуществляется особым видом инструментов — шлифовальными кругами.

Шлифовальный круг представляет собой геометрически правильное тело, состоящее из шлифовальных (абразивных) зерен, связки и промежутков (пор) между ними. В зависимости от процентного содержания абразивных зерен в объеме шлифовальных кругов их структура может быть плотной (62—56 %), средней (54—46 %), открытой (44—38 %) и очень открытой (36—22 %). Структура круга обозначается номером: соответственно 0—3, 4—8, 9—12, 13—20.

Шлифовальные круги имеют различную форму и изображены на рис. 2.30.

Для изготовления шлифовальных кругов используют следующие искусственные абразивные материалы: электрокорунд (кристаллы оксида алюминия Al_2O_3 с добавками), нормальный ко-

рунд (условное обозначение 12А, 13А, ..., 16А), белый корунд (22А, ..., 25А), хромистый корунд (с добавками соединений хрома 32А, ..., 34А), монокорунд (кристаллы Al_2O_3 правильной формы 43А, ..., 45А), карбиды кремния (SiC) черный (53С, ..., 55С) и зеленый (63С, 64С), алмазы природные (А) и синтетические (АС), нитрид бора (эльбор, ЛО и ЛП).

Абразивные зерна в зависимости от размеров делятся на следующие группы: шлифзерна (№200—16), шлифпорошки (№ 12—4), микропорошки (М40—М5).

Связки шлифовальных кругов делятся на неорганические и органические. Наиболее распространенная из неорганических связок керамическая (условное обозначение К), состоящая из огнеупорной глины, жидкого стекла, полевого шпата и других компонентов, а из органических — бакелитовая (Б) и вулканитовая (В), основой которых соответственно являются бакелит и каучук.

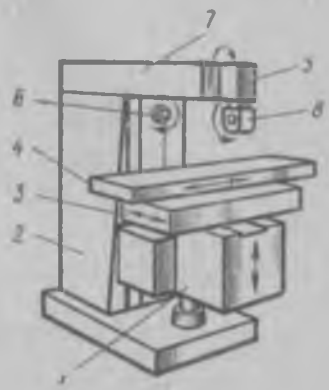


Рис. 2.29. Горизонтально-фрезерный станок

Шлифовальные круги обладают способностью частично или полностью самозатачиваться, т. е. самоудаляться под действием сил резания затупившихся абразивных зерен и обнажать острые грани зерен следующего ряда. Это свойство шлифовальных кругов характеризуется твердостью. Под твердостью шлифовального круга понимают сопротивляемость выравниванию абразивных зерен под действием сил резания. По твердости шлифовальные круги делятся на мягкие (М), среднемягкие (СМ), средние (С), среднетвердые (СТ), твердые (Т), весьма твердые (ВТ) и чрезвычайно твердые (ЧТ), при этом чем мягче круг, тем легче могут быть вырваны из связки абразивные зерна, и наоборот. Для шлифования деталей с высокой твердостью используют мягкие круги, и наоборот.

Шлифовальные станки подразделяются на станки для круглого шлифования и станки для плоского шлифования.

На рис. 2.31 показан круглошлифовальный станок, реализующий схему круглого шлифования (см. рис. 2.19). По направляющим станины *1* возвратно-поступательно перемещается стол *3* с передней *6* и задней *4* бабками, между центрами которых размещается обрабатываемая деталь, имеющая вращательное движение от привода передней бабки *6*. Вращательное движение детали совместно с ее возвратно-поступательным перемещением обеспечивает обработку всей ее цилиндрической поверхности вращающимся кругом, установленным на шлифовальной бабке *6*. Шлифовальная бабка размещена на поперечных салазках, которые с помощью маховика *9*

получают поперечное относительно детали перемещение для установки заданной глубины шлифования. Для автоматического реверсирования поступательного перемещения стола *3* служат кулачки *2*, взаимодействующие с рычагом *8* управления станком; ручное перемещение стола *3* осуществляется маховиком *7*. Для шлифования конических деталей стол *3* поворачивается на определенный угол в горизонтальной плоскости.

Станки с числовым программным управлением. Более 70 % изделий в машиностроении изготовляется в условиях серийного и мелкосерийного производства. Эффективным средством автоматизации мелкосерийного и серийного производства является использование систем числового программного управления (ЧПУ) металлорежущими станками. В станках с ЧПУ управление рабочими органами в процессе обработки производится автоматически по заранее разработанной программе без непосредственного участия человека.

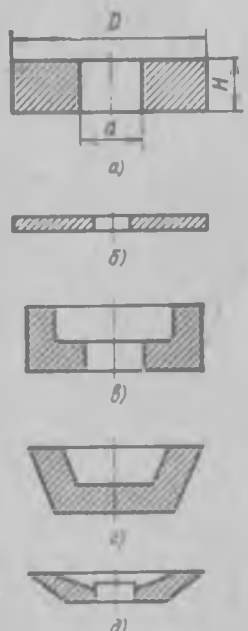


Рис 2.30. Типовые формы шлифовальных кругов:

а — ПП (плоский прямой); *б* — Д (дисковый); *в* — ЧЦ (чашечный цилиндрический); *г* — ЧК (чашечный конический); *д* — Т (тарельчатый)

По заданной программе происходит перемещение исполнительных органов станка на необходимую величину, а также происходит смена режущего инструмента. Производительность труда при работе на станках с ЧПУ увеличивается в 3 — 5 раз по сравнению с универсальными станками без автоматического управления при изготовлении продукции в мелкосерийном и серийном производстве. Эффективность использования станков с ЧПУ в этих производствах обусловлена незначительным временем, необходимым для переналадки системы для обработки другого типа — размера детали.

При механической обработке заготовок должна быть обеспечена определенная последовательность рабочих и холостых движений в станках, которая называется программой. При автоматическом управлении программа должна выполняться без непосредственного участия человека. Запись программы в станках с ЧПУ, как правило, осуществляется на перфоленту.

Перфолентой называется специального типа лента, на которой пробиты в определенном порядке отверстия. Перфолента имеет восемь дорожек, ширину 25,4 мм с шагом перфорации 2,5 мм. Перфолента может быть бумажной или пластмассовой.

Станки с ЧПУ имеют такую же компоновку, как и рассмотренные ранее станки с ручным управлением.

На рис. 2.32 показан многооперационный станок с ЧПУ с автоматической сменой режущего инструмента, предназначенный для обработки призматических и корпусных деталей с разных сторон и выполнения операций сверления, зенкерования, развертывания, нарезания резьбы, фрезерования, подрезания торцов и др. Стойка *8* перемещается по горизонтальным направляющим станины в направлении, параллельном оси шпинделя *1* станка. Стол станка выполнен из двух частей: нижняя часть *10* перемещается по горизон-

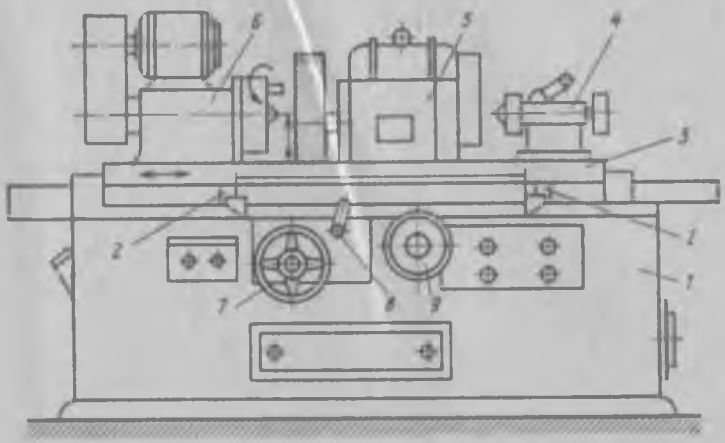


Рис. 2.31. Круглошлифовальный станок

тальным направляющим станины в направлении, перпендикулярном оси шпинделя *1* станка; верхняя часть *11* выполнена поворотной. Шпиндельная бабка *2* перемещается в вертикальном направлении по направляющим стойки *3*. Выполненный в виде бесконечной ленты инструментальный магазин *5* несет гнезда, в которых размещаются оправки с различными инструментами. Автоматическая смена режущего инструмента производится с помощью автооператора *4*, который по команде системы ЧПУ станка извлекает из соответствующего гнезда магазина *5* необходимый режущий инструмент и перемещает его в шпиндель для закрепления. Приспособление-спутник *7* с закрепленной на нем заготовкой *6* размещается на установленном на станине *8* дополнительном столе *9*. В начале цикла обработки приспособление-спутник *7* с заготовкой *6* перемещается по столу *9* в направлении установленного в положении загрузки стола *10*. Затем приспособление-спутник *7* с заготовкой *6* размещается на поворотной части *11* стола, фиксируется относительно него, стол перемещается в зону обработки и заготовка обрабатывается со всех сторон. Во время обработки заготовки *6* на дополнительном столе *12* готовится к обработке следующая заготовка *6*. После обработки

получают поперечное относительно детали перемещение для установки заданной глубины шлифования. Для автоматического реверсирования поступательного перемещения стола *3* служат кулачки *2*, взаимодействующие с рычагом *8* управления станком; ручное перемещение стола *3* осуществляется маховиком *7*. Для шлифования конических деталей стол *3* поворачивается на определенный угол в горизонтальной плоскости.

Станки с числовым программным управлением. Более 70 % изделий в машиностроении изготовляется в условиях серийного и мелкосерийного производства. Эффективным средством автоматизации мелкосерийного и серийного производства является использование систем числового программного управления (ЧПУ) металлорежущими станками. В станках с ЧПУ управление рабочими органами в процессе обработки производится автоматически по заранее разработанной программе без непосредственного участия человека.

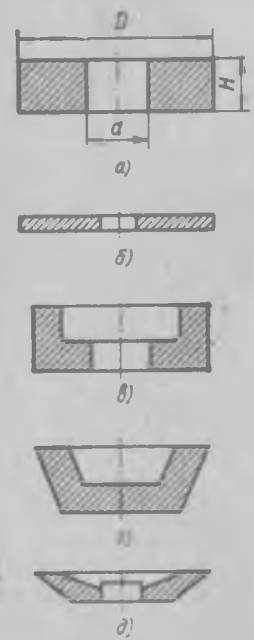


Рис 2.30. Типовые формы шлифовальных кругов:

а — ПП (плоский прямой); *б* — Д (дисковый); *в* — ЧЦ (чашечный цилиндрический); *г* — ЧК (чашечный конический); *д* — Т (тарельчатый)

По заданной программе происходит перемещение исполнительных органов станка на необходимую величину, а также происходит смена режущего инструмента. Производительность труда при работе на станках с ЧПУ увеличивается в 3 — 5 раз по сравнению с универсальными станками без автоматического управления при изготовлении продукции в мелкосерийном и серийном производстве. Эффективность использования станков с ЧПУ в этих производствах обусловлена незначительным временем, необходимым для переналадки системы для обработки другого типа — размера детали.

При механической обработке заготовок должна быть обеспечена определенная последовательность рабочих и холостых движений в станках, которая называется программой. При автоматическом управлении программа должна выполняться без непосредственного участия человека. Запись программы в станках с ЧПУ, как правило, осуществляется на перфоленту.

Перфолентой называется специального типа лента, на которой пробиты в определенном порядке отверстия. Перфолента имеет восемь дорожек, ширину 25,4 мм с шагом перфорации 2,5 мм. Перфолента может быть бумажной или пластмассовой.

Станки с ЧПУ имеют такую же компоновку, как и рассмотренные ранее станки с ручным управлением.

На рис. 2.32 показан многооперационный станок с ЧПУ с автоматической сменой режущего инструмента, предназначенный для обработки призматических и корпусных деталей с разных сторон и выполнения операций сверления, зенкерования, развертывания, нарезания резьбы, фрезерования, подрезания торцов и др. Стойка *8* перемещается по горизонтальным направляющим станины в направлении, параллельном оси шпинделя *1* станка. Стол станка выполнен из двух частей: нижняя часть *10* перемещается по горизон-

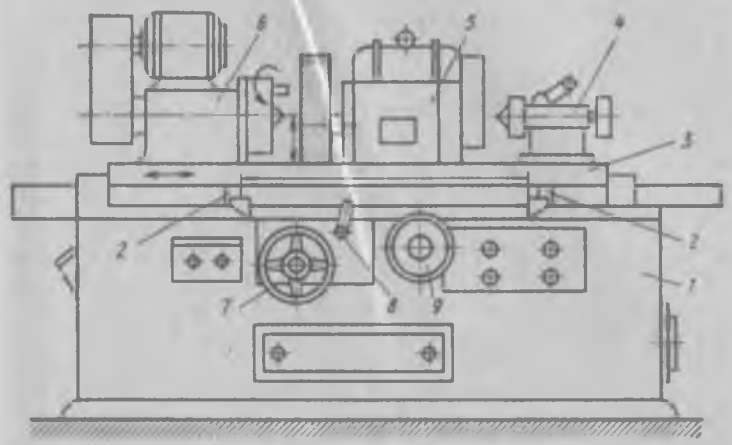


Рис. 2.31. Круглошлифовальный станок

тальным направляющим станины в направлении, перпендикулярном оси шпинделя *1* станка; верхняя часть *11* выполнена поворотной. Шпиндельная бабка *2* перемещается в вертикальном направлении по направляющим стойки *3*. Выполненный в виде бесконечной ленты инструментальный магазин *5* несет гнезда, в которых размещаются оправки с различными инструментами. Автоматическая смена режущего инструмента производится с помощью автооператора *4*, который по команде системы ЧПУ станка извлекает из соответствующего гнезда магазина *5* необходимый режущий инструмент и перемещает его в шпиндель для закрепления. Приспособление-спутник *7* с закрепленной на нем заготовкой *6* размещается на установленном на станине *8* дополнительном столе *9*. В начале цикла обработки приспособление-спутник *7* с заготовкой *6* перемещается по столу *9* в направлении установленного в положении загрузки стола *10*. Затем приспособление-спутник *7* с заготовкой *6* размещается на поворотной части *11* стола, фиксируется относительно него, стол перемещается в зону обработки и заготовка обрабатывается со всех сторон. Во время обработки заготовки *6* на дополнительном столе *12* готовится к обработке следующая заготовка *6*. После обработки

деталь *6* возвращается на дополнительный стол *9*, а заготовка *6* со стола *12* аналогично описанному перемещается в зону резания.

Промышленные роботы и роботизированные технологические комплексы (РТК). Станок с ЧПУ является полуавтоматом, так как рабочий цикл обработки детали осуществляется автоматически по программе, записанной на перфоленте или магнитной ленте. Участие человека в работе станка с ЧПУ сводится в основном к пере-

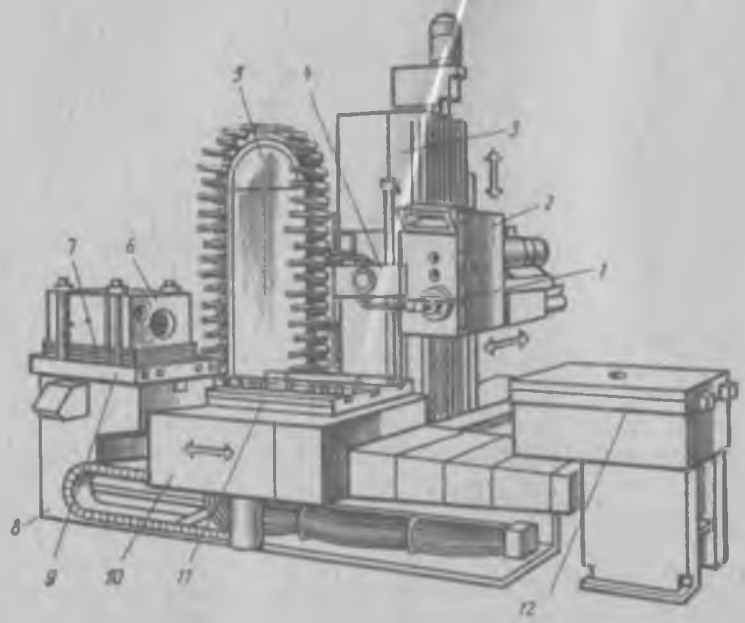


Рис. 2.32. Многооперационный станок с ЧПУ

мещению детали в зону закрепления детали и после автоматической обработки детали — к ее раскреплению и перемещению из зоны обработки. Действия рабочего при работе на станке с ЧПУ в настоящее время успешно заменяются действиями автоматической машины — промышленного робота.

Промышленный робот — автоматическая машина, заменяющая функции человека при перемещении предметов производства и (или) технологической оснастки.

Промышленные роботы повышают производительность труда, позволяют осуществить комплексную автоматизацию производства, освобождают человека от монотонных, тяжелых, опасных и вредных работ. Важным достоинством промышленных роботов является возможность их быстрой переналадки в условиях частой смены объектов производства, т. е. в условиях серийного и мелкосерий-

ного производства в комплексе со станками с ЧПУ; они называются роботизированными технологическими комплексами.

Роботизированный технологический комплекс (РТК) состоит из станка с ЧПУ, промышленного робота и тактового стола. Тактовый стол предназначен для хранения запаса заготовок и подачи их в зону захвата промышленного робота.

Гибкие производственные системы. Любое изделие, используемое в народном хозяйстве морально, устаревает, т. е. становится не соответствующим настоящему уровню развития науки и техники и должно быть заменено на более совершенное изделие. Кроме того, каждое предприятие, как правило, изготовляет целую номенклатуру изделий и для их выпуска должно в определенный календарный срок переходить с изготовления одного изделия на другое. Для эффективного перехода с изготовления одного изделия на другое широко начинают использоваться гибкие производственные системы.

Гибкая производственная система (ГПС) — совокупность нескольких или отдельной единицы технологического оборудования и системы обеспечения ее функционирования в автоматическом режиме, которая обладает свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.

ГПС представляет собой комплекс, состоящий из ЭВМ, нескольких станков с ЧПУ, устройств транспортирования, загрузки заготовок и разгрузки деталей, контрольно-измерительной системы и системы замены режущего инструмента.

ГПС является мощным средством совершенствования производства и имеет высокую производительность, низкую себестоимость массового производства и мобильность мелкосерийного производства, обеспечивает работу технологического оборудования в режиме «безлюдной технологии», повышает качество продукции и уменьшает количество рабочих, занятых в производстве.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы обработки металлов?
2. Из каких основных этапов складывается схема литья?
3. Что такое прокатка, ковка, штамповка?
4. Что такое сварка?
5. Какие существуют виды сварки?
6. В чем заключается сущность пайки металлов?
7. Какие существуют виды обработки металлов и сплавов резанием?

деталь *6* возвращается на дополнительный стол *9*, а заготовка *6* со стола *12* аналогично описанному перемещается в зону резания.

Промышленные роботы и роботизированные технологические комплексы (РТК). Станок с ЧПУ является полуавтоматом, так как рабочий цикл обработки детали осуществляется автоматически по программе, записанной на перфоленте или магнитной ленте. Участие человека в работе станка с ЧПУ сводится в основном к пере-

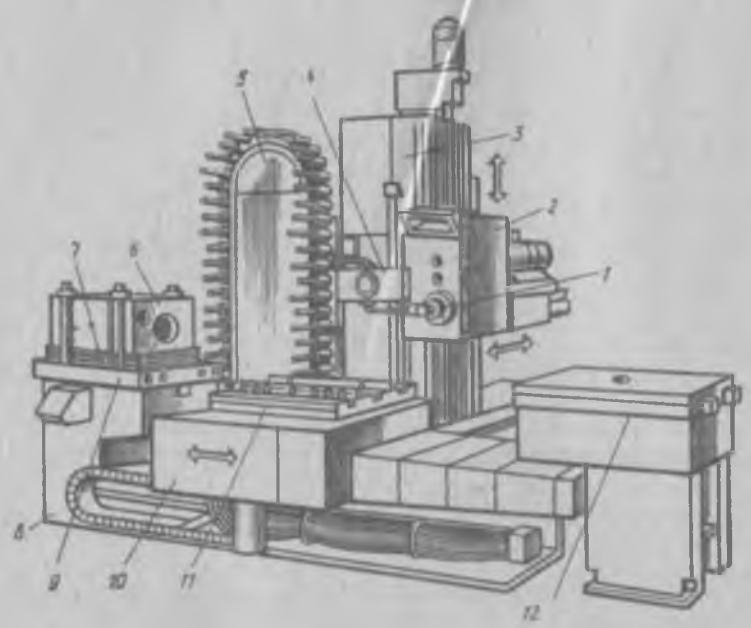


Рис. 2.32 Многооперационный станок с ЧПУ

мещению детали в зону закрепления детали и после автоматической обработки детали — к ее раскреплению и перемещению из зоны обработки. Действия рабочего при работе на станке с ЧПУ в настоящее время успешно заменяются действиями автоматической машины — промышленного робота.

Промышленный робот — автоматическая машина, заменяющая функции человека при перемещении предметов производства и (или) технологической оснастки.

Промышленные роботы повышают производительность труда, позволяют осуществить комплексную автоматизацию производства, освобождают человека от монотонных, тяжелых, опасных и вредных работ. Важным достоинством промышленных роботов является возможность их быстрой переналадки в условиях частой смены объектов производства, т. е. в условиях серийного и мелкосерий-

ного производства в комплексе со станками с ЧПУ; они называются роботизированными технологическими комплексами.

Роботизированный технологический комплекс (РТК) состоит из станка с ЧПУ, промышленного робота и тактового стола. Тактовый стол предназначен для хранения запаса заготовок и подачи их в зону захвата промышленного робота.

Гибкие производственные системы. Любое изделие, используемое в народном хозяйстве морально, устаревает, т. е. становится не соответствующим настоящему уровню развития науки и техники и должно быть заменено на более совершенное изделие. Кроме того, каждое предприятие, как правило, изготовляет целую номенклатуру изделий и для их выпуска должно в определенный календарный срок переходить с изготовления одного изделия на другое. Для эффективного перехода с изготовления одного изделия на другое широко начинают использоваться гибкие производственные системы.

Гибкая производственная система (ГПС) — совокупность нескольких или отдельной единицы технологического оборудования и системы обеспечения ее функционирования в автоматическом режиме, которая обладает свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.

ГПС представляет собой комплекс, состоящий из ЭВМ, нескольких станков с ЧПУ, устройств транспортирования, загрузки заготовок и разгрузки деталей, контрольно-измерительной системы и системы замены режущего инструмента.

ГПС является мощным средством совершенствования производства и имеет высокую производительность, низкую себестоимость массового производства и мобильность мелкосерийного производства, обеспечивает работу технологического оборудования в режиме «безлюдной технологии», повышает качество продукции и уменьшает количество рабочих, занятых в производстве.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы обработки металлов?
2. Из каких основных этапов складывается схема литья?
3. Что такое прокатка, ковка, штамповка?
4. Что такое сварка?
5. Какие существуют виды сварки?
6. В чем заключается сущность пайки металлов?
7. Какие существуют виды обработки металлов и сплавов резанием?

Энергетические зоны, образованные совокупностью энергетических уровней, называют *зонами разрешенных значений энергии* или *разрешенными зонами*. Разрешенные зоны обычно отделены друг от друга запрещенными зонами, т. е. промежутками значений энергии, которыми электрон в данном кристалле обладать не может.

Разрешенные зоны, соответствующие внутренним электронным орбитам в атомах твердого тела, обычно полностью заполнены электронами и поэтому не рассматриваются при изучении электрических свойств твердых тел. Электрический ток в твердых телах мо-

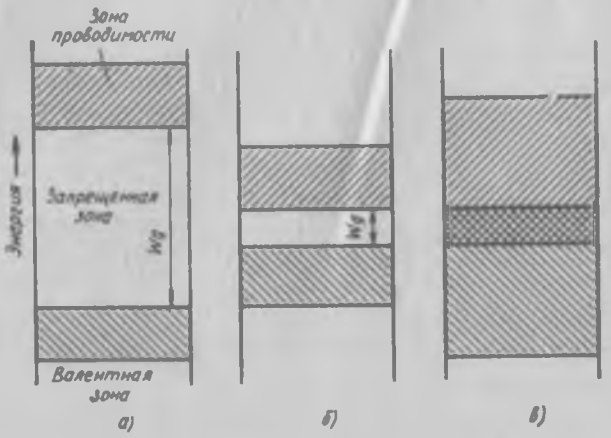


Рис. 3.2. Картина энергетических зон:
а — в изоляторе; *б* — в полупроводнике; *в* — в металле

жет быть обусловлен электронами, перемещающимися в зоне, соответствующей валентной электронной оболочке, — валентной зоне, или электронами в разрешенной зоне, расположенной над валентной — в зоне проводимости. У проводников и твердых диэлектриков валентная зона при температуре абсолютного нуля и в темноте полностью заполнена электронами, а отделенная от нее запрещенной зоной зона проводимости полностью свободна (рис. 3.2). У полупроводников ширина запрещенной зоны обычно меньше 3 эВ. При отсутствии в полупроводнике свободных электронов приложенное к нему электрическое поле не вызовет тока. Если электрон в валентной зоне приобретает (тепловым, оптическим или иным путем) достаточную энергию для преодоления запрещенной зоны, то он оказывается в зоне проводимости. Среди электронов в валентной зоне образовалось вакантное место. Если приложено внешнее электрическое поле, то один из электронов (в валентной зоне) в соседнем атоме приобретает достаточную энергию, чтобы занять вакантное место, оставив вместо себя также вакантное место. Таким образом, соседний электрон при воздействии внешнего поля заполнит вновь созданную вакансию, т. е. начнется непрерывный процесс.

Этот процесс можно рассматривать как движение вакантного места в валентной зоне, которое обычно называют *дыркой*. Следует отметить, что дырка — это не просто отсутствие электрона, это отсутствие электрона в полной в других отношениях ковалентной связи между атомами кристалла. Ковалентная связь образуется между электронами соседних атомов, каждый из которых владеет этими электронами совместно с другими атомами. Все электроны в валентной зоне — это электроны, участвующие в ковалентных связях.

Более наглядно движение дырок в кристалле можно представить себе на примере кинозала, в котором все места, кроме одного, заняты. Если сидящий на соседнем месте пересядет на свободное кресло, оставив свое пустым, которое займет его ближайший сосед, то, сосредоточив свое внимание лишь на свободном месте, легко видеть, что оно будет перемещаться по кинозалу. Движение дырки подобно движению пустого места. Удобнее говорить о движении дырок в валентной зоне, чем о движении электронов в этой же зоне. Так как дырка — это отсутствие электрона в ковалентной связи, то можно связать отсутствие отрицательного заряда с наличием положительного заряда.

При последующем изложении материала мы будем рассматривать оба вида носителей тока — электроны и дырки.

ГЛАВА 3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 3.1. Общие сведения

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает магнитный момент. Для характеристики намагничивания вещества вводятся величины: B — магнитная индукция (Тл), H — напряженность магнитного поля (А/м), J — намагниченность (А/м), k_m — магнитная восприимчивость, μ — магнитная проницаемость, Φ — магнитный поток (Вб).

Намагниченность связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$J = k_m H. \tag{3.1}$$

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

$$B = B_0 + B_{вн} = \mu_0 H + \mu_0 J = \mu_0 (H + J), \tag{3.2}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$ — магнитная постоянная, Гн/м.

Объединяя (3.1) и (3.2), получим

$$B = \mu_0 H (1 + k_m) = \mu_0 \mu_r H, \tag{3.3}$$

где $\mu_r = k_m + 1$ или $\mu_r = B/(\mu_0 H)$ — относительная магнитная проницаемость (в дальнейшем для краткости — магнитная проницаемость).

В соответствии с магнитными свойствами все материалы делятся на следующие группы: диамагнитные (диамагнетики), парамагнитные (парамагнетики), ферромагнитные (ферромагнетики), антиферромагнитные (антиферромагнетики), ферримагнитные (ферримагнетики).

Диамагнетизм наблюдается во всех веществах и связан с тем, что внешнее магнитное поле оказывает влияние на орбитальное движение электронов, вследствие чего индуцируется магнитный момент, направленный навстречу внешнему полю. После снятия внешнего магнитного поля индуцированный магнитный момент диамагнетика исчезает. Магнитная восприимчивость диамагнетиков k_d (отрицательная) по абсолютному значению очень мала; она не зависит ни от температуры, ни от напряженности магнитного поля.

К диамагнитным веществам относятся инертные газы, водород, медь, цинк, свинец (вещества, состоящие из атомов с полностью заполненными электронными оболочками).

Парамагнитные вещества отличаются тем, что состоят из атомов с не полностью заполненными оболочками, т. е. обладающих магнитными моментами. Но такие атомы находятся друг от друга достаточно далеко, так что взаимодействие между ними отсутствует. Потому у парамагнетиков магнитные моменты атомов ориентируются в направлении внешнего магнитного поля и усиливают его.

Магнитная восприимчивость парамагнетиков положительна, имеет небольшое значение от 10^{-5} до 10^{-2} и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля, но зависит от температуры.

Ферромагнитные вещества содержат атомы, обладающие магнитным моментом (незаполненные электронные оболочки), однако расстояние между ними не так велико, как в парамагнетиках, в результате чего между атомами возникает взаимодействие, которое называется *обменным* (предполагается, что соседние атомы обмениваются электронами). В результате такого взаимодействия энергетически выгодным в зависимости от расстояния становится параллельная ориентация магнитных моментов соседних атомов (ферромагнетизм) либо антипараллельная (антиферромагнетизм).

Под действием обменных сил параллельная ориентация магнитных моментов атомов ферромагнитного вещества происходит в определенных областях, называемых *доменами*. В пределах домена материал в отсутствие внешнего поля намагничен до насыщения благодаря обменному взаимодействию отдельных атомов. Это взаимодействие действует только до определенной критической температуры, которая называется *температурой Кюри*. Выше температуры Кюри домены разрушаются и ферромагнетик переходит в парамагнитное состояние. Ферромагнитные вещества легко намагничиваются в слабых магнитных полях. Магнитная проницаемость и

магнитная восприимчивость ферромагнетиков велики (до 10^6) и сильно зависят от температуры, а также от напряженности магнитного поля. Не так давно необходимым условием существования ферромагнетизма считалось наличие кристаллической решетки, в настоящее время, однако, известны аморфные ферромагнетики.

Антиферромагнетиками называют материалы, в которых во время обменного взаимодействия соседних атомов происходит антипараллельная ориентация их магнитных моментов. Так как магнитные моменты соседних атомов взаимно компенсируются, антиферромагнетики не обладают магнитным моментом, а характеризуются магнитной восприимчивостью, которая близка к восприимчивости парамагнетиков. Выше некоторой критической температуры, которая получила название температуры Нееля (аналогична температуре Кюри), магнитоупорядоченное состояние антиферромагнетика разрушается и он переходит в парамагнитное состояние.

К ферримагнетикам относят вещества, в которых обменное взаимодействие осуществляется не непосредственно между магнитоактивными атомами, как в случае ферромагнетизма, а через немагнитный ион кислорода. Такое взаимодействие называют *косвенным обменным* или *сверхобменным*. Это взаимодействие в большинстве случаев в ферримагнитных веществах приводит к антипараллельной ориентации магнитных моментов соседних ионов (т. е. к антиферромагнитному упорядочению). Однако количество ионов с магнитными моментами, ориентированными условно вверх и вниз, а также величины их моментов неодинаковы. Поэтому магнитные моменты ионов не полностью компенсируются и ферримагнитные вещества обладают магнитным моментом и имеют доменную структуру, которая исчезает выше температуры Кюри.

Диа-, пара- и антиферромагнитные вещества относятся к слабомагнитным, ферро- и ферримагнитные вещества являются сильномагнитными.

В качестве магнитных материалов техническое применение в электротехнике находят ферромагнитные и ферримагнитные вещества.

§ 3.2. Процессы технического намагничивания и перемагничивания магнитных материалов

В ферромагнитных материалах реализуется такая доменная структура, для которой полная свободная энергия системы является минимальной.

Полная свободная энергия состоит из следующих основных видов энергий: магнитостатической, магнитной анизотропии, магнитострикции, обменной.

Минимум магнитостатической энергии, связанной с полями рассеивания или с возникновением полюсов на концах магнита, наблюдается в том случае, когда магнитный поток замкнут внутри мате-

риала. Однодоменное состояние является невыгодным, так как это приводит к возникновению магнитных полюсов, которые создают внешнее поле (поле рассеивания). Магнитостатическая энергия уменьшается, если тело состоит из нескольких доменов, и становится равной нулю при образовании замыкающих доменов (рис. 3.3), магнитный поток замкнут внутри тела, за его пределами магнитное поле равно нулю.

Деление образца на домены ограничивается энергией, затрачиваемой на образование границ между доменами. Линейный размер

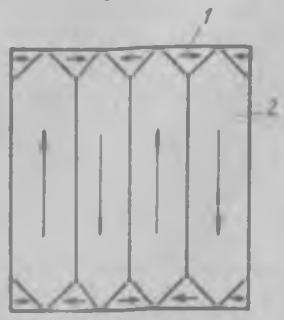


Рис. 3.3. Доменная структура магнитных материалов:

1 — замыкающие домены; 2 — основные домены

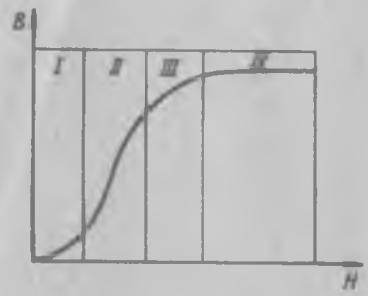


Рис. 3.4 Основная кривая намагниченности ферромагнетика

доменов имеет порядок от 10^{-2} до 10^{-3} см. Толщина доменной границы достигает нескольких сотен нанометров.

При наложении внешнего магнитного поля происходит рост объема доменов, которые имеют направление намагниченности, совпадающее или близкое к направлению напряженности поля. Зависимость магнитной индукции ферромагнитного вещества от напряженности внешнего поля называют *кривой намагничивания*, она имеет вид, показанный на рис. 3.4. Кривую намагничивания ферромагнетиков можно разделить на несколько участков, которые характеризуются определенными процессами намагничивания. В области слабых полей (область *I*) магнитные восприимчивость и проницаемость не изменяются. Изменение магнитной индукции в этой области происходит в основном за счет обратимых процессов, которые обусловлены смещением границ доменов.

Кривая намагничивания в области *II* характеризуется тем, что здесь происходит неупругое смещение границ доменов, т. е. процесс не является обратимым. В области приближения к насыщению (область *III*) изменение индукции объясняется в основном процессом вращения, когда направление вектора намагниченности самопроизвольных областей приближается к направлению внешнего поля. Полная ориентация намагниченности по полю соответствует

техническому насыщению (область III). На последнем участке кривой индукции (область *IV*) наблюдается слабый рост индукции с увеличением поля. Увеличение индукции происходит за счет роста намагниченности самого домена, т. е. ориентации спиновых моментов отдельных электронов, направление которых не совпадает с направлением внешнего поля вследствие дезориентирующего влияния теплового движения.

Используя основную кривую намагничивания можно построить зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего

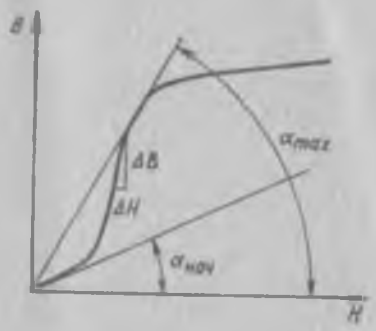


Рис. 3.5 Кривая намагниченности и углы α, характеризующие различные типы магнитной проницаемости

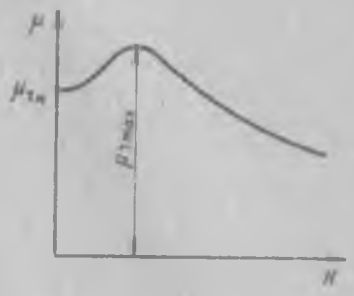


Рис. 3.6. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля

магнитного поля. Статическая магнитная проницаемость, определяемая по формуле $\mu = B/(\mu_0 H)$, пропорциональна тангенсу угла $\alpha_{нач}$ наклона прямой, проведенной из начала координат через точку на основной кривой намагничивания (рис. 3.5).

Зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля представлена на рис. 3.6. Значение магнитной проницаемости $\mu_{rн}$ в области слабых полей ($H \to 0$) называют начальной магнитной проницаемостью, экспериментально ее определяют в полях ~0,1 А/м. Наибольшее значение магнитной проницаемости называют максимальной проницаемостью μ_{rmax}.

Магнитная проницаемость магнитных материалов растет с увеличением температуры и имеет максимум при температуре Кюри. Значения температуры Кюри для ряда магнитных материалов приведены в табл. 3.1.

Если намагничивать ненамагниченный материал во внешнем магнитном поле, то индукция возрастает при непрерывном увеличении напряженности магнитного поля H и достигает значения индукции насыщения B_s. Если после этого уменьшить напряженность внешнего поля H, то намагниченность уменьшится, но этому значению напряженности будет соответствовать уже другое, большее, значение индукции, чем при начальном намагничивании.

риала. Однодоменное состояние является невыгодным, так как это приводит к возникновению магнитных полюсов, которые создают внешнее поле (поле рассеивания). Магнитостатическая энергия уменьшается, если тело состоит из нескольких доменов, и становится равной нулю при образовании замыкающих доменов (рис. 3.3), магнитный поток замкнут внутри тела, за его пределами магнитное поле равно нулю.

Деление образца на домены ограничивается энергией, затрачиваемой на образование границ между доменами. Линейный размер

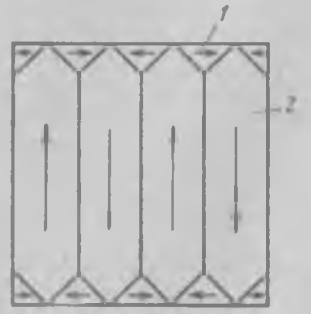


Рис. 3.3. Доменная структура магнитных материалов:

1 — замыкающие домены; 2 — основные домены

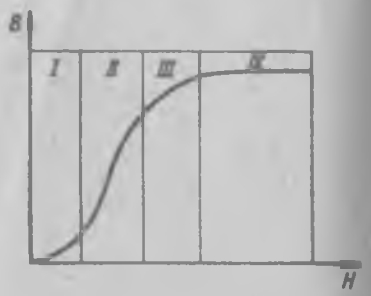


Рис. 3.4. Основная кривая намагниченности ферромагнетика

доменов имеет порядок от 10^{-2} до 10^{-5} см. Толщина доменной границы достигает нескольких сотен нанометров.

При наложении внешнего магнитного поля происходит рост объема доменов, которые имеют направление намагниченности, совпадающее или близкое к направлению напряженности поля. Зависимость магнитной индукции ферромагнитного вещества от напряженности внешнего поля называют *кривой намагничивания*, она имеет вид, показанный на рис. 3.4. Кривую намагничивания ферромагнетиков можно разделить на несколько участков, которые характеризуются определенными процессами намагничивания. В области слабых полей (область *I*) магнитные восприимчивость и проницаемость не изменяются. Изменение магнитной индукции в этой области происходит в основном за счет обратимых процессов, которые обусловлены смещением границ доменов.

Кривая намагничивания в области *II* характеризуется тем, что здесь происходит неупругое смещение границ доменов, т. е. процесс не является обратимым. В области приближения к насыщению (область *III*) изменение индукции объясняется в основном процессом вращения, когда направление вектора намагниченности самопроизвольных областей приближается к направлению внешнего поля. Полная ориентация намагниченности по полю соответствует

техническому насыщению (область III). На последнем участке кривой индукции (область *IV*) наблюдается слабый рост индукции с увеличением поля. Увеличение индукции происходит за счет роста намагниченности самого домена, т. е. ориентации спиновых моментов отдельных электронов, направление которых не совпадает с направлением внешнего поля вследствие дезориентирующего влияния теплового движения.

Используя основную кривую намагничивания можно построить зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего

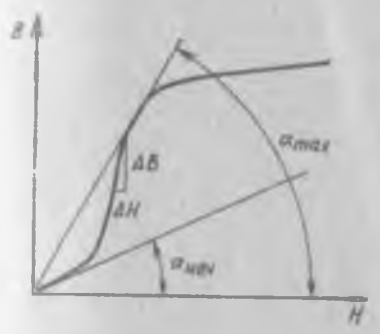


Рис. 3.5. Кривая намагниченности и углы α, характеризующие различные типы магнитной проницаемости

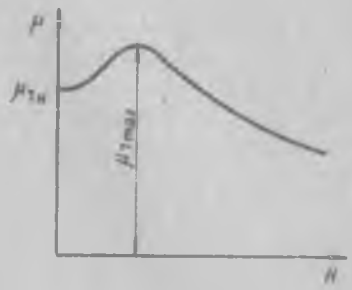


Рис. 3.6. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля

магнитного поля. Статическая магнитная проницаемость, определяемая по формуле $\mu = B/(\mu_0 H)$, пропорциональна тангенсу угла $\alpha_{нач}$ наклона прямой, проведенной из начала координат через точку на основной кривой намагничивания (рис. 3.5).

Зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля представлена на рис. 3.6. Значение магнитной проницаемости $\mu_{rн}$ в области слабых полей ($H \to 0$) называют начальной магнитной проницаемостью, экспериментально ее определяют в полях ~0,1 А/м. Наибольшее значение магнитной проницаемости называют максимальной проницаемостью μ_{rmax}.

Магнитная проницаемость магнитных материалов растет с увеличением температуры и имеет максимум при температуре Кюри. Значения температуры Кюри для ряда магнитных материалов приведены в табл. 3.1.

Если намагничивать ненамагниченный материал во внешнем магнитном поле, то индукция возрастает при непрерывном увеличении напряженности магнитного поля H и достигает значения индукции насыщения B_s. Если после этого уменьшить напряженность внешнего поля H, то намагниченность уменьшится, но этому значению напряженности будет соответствовать уже другое, большее, значение индукции, чем при начальном намагничивании.

Таблица 3.1

Материал	T_K, °C	$\mu_{гн}$	B, Тл
Fe	1316	250	2,15
Ni	904	100	0,61
Fe_3O_4	1131	120	0,5
$NiFe_2O_4$	1131	44	0,31
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe_2O_4$	796	330	0,4

Это означает, что кривые $B = f(H)$ при увеличении и уменьшении напряженности поля не тождественны вследствие явления гистерезиса. *Магнитным гистерезисом* называется явление отставания изменения магнитной индукции от вызывающей эти изменения напряженности магнитного поля (рис. 3.7). При уменьшении H до нуля в образце остается остаточная индукция B_r. Если направление поля изменить на противоположное и начать его увеличивать, то можно уменьшить индукцию до нуля. В этом случае значение H_c называется *коэрцитивной (задерживающей) силой*. По значению коэрцитивной силы материалы делятся на магнитомягкие (с малым значением H_c и большой магнитной проницаемостью) и магнитотвердые (с большой коэрцитивной силой и относительно небольшой магнитной проницаемостью).

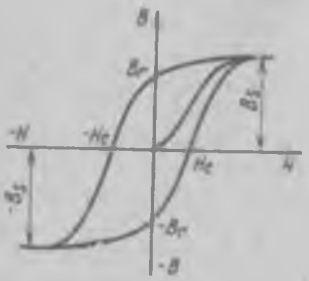


Рис. 3.7. Петля магнитного гистерезиса

Значение индукции насыщения определяется в поле H_s, которое принимается равным $5H_c$. Кривая изменения индукции при изменении напряженности внешнего магнитного поля от $+H_s$ до $-H_s$ и обратно называется *предельной петлей гистерезиса*, которая является важной характеристикой материала, на ее основе можно определить основные параметры материала — коэрцитивную силу H_c, индукцию насыщения B_s, остаточную индукцию B_r и др.

Для магнитомягких материалов желательно, с точки зрения их применения, чтобы площадь петли гистерезиса была как можно меньше. Магнитотвердые материалы обладают широкой петлей гистерезиса.

Экспериментально установлено, что намагничивание магнитных материалов существенно зависит от направления магнитного поля в кристалле, т. е. вдоль одних осей кристалла намагничивания протекает быстрее всего (оси легкого намагничивания), а вдоль других — труднее (оси трудного намагничивания). Так, например, у

железа, имеющего структуру объемно центрированного куба, ось легкого намагничивания совпадает с ребром куба, а ось трудного намагнничивания — с диагональю куба. Для никеля, имеющего структуру гранецентрированного куба, наоборот, ось легкого намагничивания совпадает с диагональю куба, а ось трудного намагничивания — с ребром куба.

Поликристаллические материалы, у которых нет ярко выраженных осей, в силу того что кристаллиты ориентированы произвольно, но обладающие анизотропией магнитных свойств, имеют магнитную текстуру, которая, как правило, наводится путем внешних воздействий на материал (прессование в магнитном поле, прокатка и др.). Текстурованные материалы имеют повышенные магнитные характеристики и широко используются в технике.

При намагничивании магнитных материалов наблюдается изменение их размеров и формы,такое явление носит название *магнитострикции*. Магнитострикция может быть объемной (изменение объема тела) и линейной (изменение размеров тела).

По своей природе линейная магнитострикция анизотропна. Так, например, для монокристаллического железа, намагниченного в направлении ребра куба, линейные размеры в этом направлении уменьшаются, при намагничивании вдоль диагонали куба увеличиваются, т. е. магнитострикция может быть как положительной, так и отрицательной.

Процесс перемагничивания магнитных материалов в переменном магнитном поле связан с тепловыми потерями части энергии магнитного поля, что внешне проявляется в нагреве материала. Потери в магнитном материале характеризуются удельными магнитными потерями $P_{уд}$ или тангенсом угла магнитных потерь $\operatorname{tg} \delta_м$.

По механизму возникновения различают потери на гистерезис и динамические. Потери на гистерезис связаны с явлением магнитного гистерезиса и с необратимым перемещением границ доменов. Они пропорциональны площади петли гистерезиса и частоте переменного поля. Мощность потерь, расходуемая на гистерезис, определяется следующей формулой:

$$P_г = \eta B_m^n f V, \tag{3.4}$$

где η — коэффициент, зависящий от свойств материала; B_m — максимальная индукция в течение цикла; $n = 1{,}6 \div 2{,}0$ — показатель степени, принимающий значения в зависимости от B; f — частота; V — объем образца.

Динамические потери вызываются вихревыми токами и потерями на магнитное последствие или магнитной вязкостью, которые учитывают в слабых магнитных полях; они обусловлены оставанием магнитной индукции от изменения напряженности магнитного поля.

Потери на вихревые токи вызываются электрическими токами, которые магнитный поток индуцирует в магнитном материале;

они зависят от электрического сопротивления магнитного материала. Увеличение сопротивления приводит к уменьшению потерь. Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты магнитного поля, поэтому применение магнитных материалов с низким электрическим сопротивлением имеет ограничение на высоких частотах. Мощность потерь на вихревые токи можно записать в виде

$$P_f = \xi B_m^2 f^2 V, \qquad (3.5)$$

где ξ — коэффициент, зависящий от типа магнитного материала и его формы.

Для работы в переменных магнитных полях используют материалы с узкой петлей гистерезиса, т. е. с очень малой коэрцитивной силой. Например, коэрцитивная сила высоконикелевых легированных пермаллоев лежит в пределах 1,0—5,0 А/м. Для уменьшения потерь применяются, кроме того, специальные меры. Так, например, для уменьшения потерь на вихревые токи стараются повысить удельное электрическое сопротивление магнитных материалов. В электротехнических сталях повышение электрического сопротивления достигается легированием кремнием. Применение в магнитопроводах тонких листов ферромагнитных материалов, изолированных друг от друга лаком или окалиной, уменьшает потери на вихревые токи. В порошковых магнитных материалах частицы самого магнитного материала покрыты электроизоляционной связкой.

Магнитомягкие материалы используют в производстве сердечников трансформаторов, электромагнитов, электрических машин, в измерительных приборах и других различных аппаратах.

Магнитотвердые материалы применяют для производства постоянных магнитов, в машинах малой мощности, различных аппаратах и приборах.

§ 3.3. Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы должны иметь высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу, большую индукцию насыщения, узкую петлю гистерезиса, малые магнитные потери.

Магнитомягкие материалы можно разделить на следующие группы: технически чистое железо (низкоуглеродистая сталь); кремнистая электротехническая сталь; сплавы с высокой начальной магнитной проницаемостью; сплавы с большой индукцией насыщения; ферриты.

Технически чистое железо (низкоуглеродистая сталь). Железо представляет собой магнитомягкий материал, свойства которого сильно зависят от содержания примесей.

Технически чистое железо содержит не более 0,1 % углерода, серы, марганца и других примесей и обладает сравнительно малым удельным электрическим сопротивлением, что ограничивает его применение. Используется оно в основном для магнитопроводов

постоянных магнитных потоков и приготовляется рафинированием чугуна в мартеновских печах. Магнитные свойства железа сильно зависят от его чистоты и способа обработки.

В зависимости от способа получения чистого железа различают железо электролитическое и карбонильное.

Электролитическое железо получают путем электролиза сернокислого или хлористого железа, оно применяется в постоянных полях. Карбонильное железо получают термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$. Карбонильное железо получают в виде порошка, и его удобно использовать для изготовления сердечников для повышенных частот. Свойства упомянутых разновидностей технически чистого железа приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Материал	$\mu_{rн}$	μ_{rmax}	B_s, Тл	H_c, А/м	ρ, мкОм·м
Технически чистое железо	250—400	3500—4500	2,18	50—100	0,1
Электролитическое железо	600	15 000	2,18	30	0,1
Карбонильное железо	2000—3000	20 000—21 500	2,18	6,4	0,1
Железо, обработанное в водороде особо тщательно	60 000	200 000	2,18	2,4	0,1
Электротехническая сталь	200—600	3000—8000	1,95 2,02	10—65	0,17—0,6
Низконикелевые пермаллои	1500—4000	15 000—60 000	1,0—1,6	5—32	0,45—0,9
Высоконикелевые пермаллои	7 000—100 000	50 000—300 000	0,65—1,05	0,65—6	0,16—0,85
Супермаллой (пермаллой, легированный молибденом и марганцем)	100 000	1 500 000	0,8	0,3	0,6
Альсифер	34 500	117 000	1,0	1,8	0,8

Кремнистая электротехническая сталь содержит углерода менее 0,05 % и кремния от 0,7 до 4,8 % и относится к магнитомягким материалам широкого потребления. Легирование стали кремнием приводит к существенному повышению удельного электрического сопротивления, которое растет линейно от 0,1 мкОм·м при нулевом содержании кремния до 0,60 мкОм·м при содержании кремния 5,0 %, к увеличению $\mu_{rн}$ и μ_{rmax}, уменьшению H_c, снижению потерь на гистерезис. Сталь с содержанием кремния 6,8 % обладает наивысшей магнитной проницаемостью, но в промышленности

сталь применяют с содержанием кремния не выше 5 %. Так как кремний ухудшает механические свойства стали, она становится непригодной для штамповки.

Свойства стали можно значительно улучшить путем холодной прокатки, которая вызывает преимущественную ориентацию кристаллитов, и отжига в среде водорода при температуре 900—1000 °С, снимающего механические напряжения и способствующего укрупнению кристаллических зерен, причем оси легкого намагничивания кристаллитов ориентируются вдоль направления проката; о такой стали говорят, что она обладает ребровой текстурой. Магнитные свойства вдоль направления прокатки существенно выше.

В соответствии с ГОСТ 21427.0—75 сталь маркируется четырьмя цифрами. В марке стали цифры означают: первая — структурное состояние и вид прокатки (*1* — горячекатаная изотропная, *2* —холоднокатаная изотропная, *3* — холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой); вторая — примерное содержание кремния; третья — основные нормируемые характеристики: 0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$), 1 — при индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,5/50}$), 2 — при индукции 1 Тл и частоте 400 Гц ($P_{1/400}$), 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$), 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10}). Вместе первые три цифры означают тип стали, четвертая — порядковый номер типа стали. Удельное электрическое сопротивление стали зависит от концентрации кремния. Магнитные характеристики некоторых марок сталей приведены в табл. 3.3 и 3.4.

Электротехническая сталь выпускается в виде отдельных листов, рулонов или ленты и предназначается для изготовления магнитопроводов. На сталь может быть нанесено электроизоляционное покрытие.

Таблица 3.3

Марка стали	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная инструкция при напряженности магнитного поля, А/м, не менее					Электросопротивление мкОм·м
	$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10000	30000	
1211	3,3	7,7	—	1,53	1,64	1,76	2,00	0,25
1212	3,1	7,2	—	1,50	1,52	1,75	1,98	0,25
1513	1,25	2,9	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,6
1514	1,15	2,7	1,28	1,44	1,55	1,69	1,89	0,6
2010	3,5	8,0	1,49	1,60	1,70	1,81	2,02	0,1
2013	2,50	5,6	1,54	1,65	1,75	1,85	—	0,1
2212	2,20	5,0	1,42	1,60	1,68	1,77	2,00	0,25
2312	1,75	4,1	1,40	1,56	1,66	1,74	1,96	0,40
2411	1,6	3,6	1,37	1,49	1,60	1,73	1,93	0,5

Таблица 3.4

Марка стали	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, при напряженности магнитного поля, А/м, не менее			Электросопротивление мкОм·м
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500	
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	—	—	1,75	0,5
	0,35	0,80	1,75	2,50	—	—	1,75	0,5
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88	0,5
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88	0,5
3416	0,28	—	0,89	1,30	1,61	1,70	1,90	0,5

Качество электротехнической стали можно повысить путем уменьшения примесей в ее составе, путем разработки оптимальной технологии производства стали с ребровой структурой и получения стали с повышенным содержанием кремния (до 6,3 %).

Пермаллои. Они относятся к магнитомягким материалам, обладающим высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, и представляют собой железоникелевые сплавы. Такие сплавы характеризуются тем, что магнитная анизотропия и магнитострикция практически отсутствуют; это является одной из причин особенно легкого намагничивания пермаллоев. Пермаллои подразделяются на высоконикелевые (72—80 % никеля) и низконикелевые (40—50 % никеля).

В настоящее время в большей мере используются сплавы, легированные молибденом, хромом, медью, марганцем, кремнием, а также другими элементами. На рис. 3.8 показана зависимость свойств нелегированных пермаллоев от содержания никеля. Классический пермаллой с концентрацией никеля 78,5 % имеет наибольшее значения $\mu_{r\max}$ и $\mu_{rн}$. Высокие магнитные свойства классического пермаллоя получаются в результате высокотемпературного отжига при 1300 °С в чистом сухом водороде и длительном отпуске при 400—500 °С.

Магнитные свойства пермаллоев сильно зависят от химического состава и наличия примесей в сплаве. Отрицательно на свойства пермаллоев влияют примеси, которые не образуют твердых растворов со сплавом, такие, как углерод, сера и кислород; кроме того, свойства резко изменяются от режимов термообработки.

На основе данных табл. 3.2 и рис. 3.8 можно сделать следующие выводы: магнитная проницаемость высоконикелевых пермаллоев выше, чем низконикелевых, и значительно превосходит проницаемость электротехнических сталей, но индукция насыщения пермаллоев в 1,5—2 раза меньше; следовательно, их нецелесообразно применять в силовых трансформаторах и других устройствах, в которых используется большой магнитный поток. Удельное электрическое

сопротивление низконикелевых пермаллоев в два раза выше высоконикелевых, поэтому они могут работать на более высоких частотах.

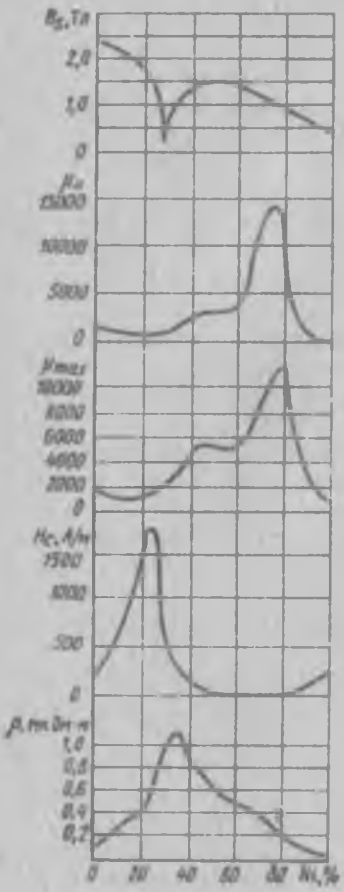


Рис 3.8. Зависимость индукции насыщения, начальной и максимальной магнитных проницаемостей, коэрцитивной силы и удельного электрического сопротивления сплавов FeNi от концентрации никеля

Стоимость высоконикелевых пермаллоев больше низконикелевых, в то же время они менее технологичны.

Для улучшения свойств пермаллоев их легируют различными добавками. Легирование молибденом и хромом увеличивает удельное электрическое сопротивление и начальную проницаемость, позволяет упростить технологию получения, уменьшает чувствительность к механическим напряжениям и снижает индукцию насыщения. Медь благоприятно сказывается на температурной стабильности и стабильности магнитной проницаемости при изменении напряженности внешнего поля. Кремний и марганец увеличивают удельное сопротивление.

Из железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью можно выделить следующие группы:

1) нелегированные низконикелевые пермаллои — марки 45 Н и 50 Н (содержание никеля 45 и 50 %);

2) сплавы, обладающие текстурой и прямоугольной петлей гистерезиса, — 50 НП, 65 НП, 34 НКП;

3) низконикелевые пермаллои (50 % Ni), легированные хромом и кремнием, — 50 НХС;

4) высоконикелевые пермаллои, легированные соответственно молибденом, хромом и кремнием, хромом и медью,—79 НМ, 80 НХС, 76 НХД.

Все сплавы содержат в небольших количествах марганец и кремний. В марках пермаллоев буква Н означает никель, М — марганец, Х — хром, Д — медь, К — кобальт, С — кремний, П — прямоугольную петлю гистерезиса. Сплавы с улучшенными свойствами обозначают дополнительно буквой У.

Сплавы изготовляются в виде холоднокатаных лент (толщиной 0,02—2,5 мм, шириной 30—250 мм), горячекатаных листов, горячекатаных и кованых прутков.

Сплавы 45 Н и 50 Н обладают наиболее высокой индукцией насыщения, поэтому они применяются для сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей и деталей магнитных цепей, которые работают при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием. Сплав 50НХС обладает повышенным сопротивлением и используется для сердечников импульсных трансформаторов и устройств связи звуковых и высоких частот.

Высоконикелевые сплавы 79 НМ, 80 НХС, 76 НХД применяются для сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов, при толщине 0,02 мм — для сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей.

Недостатками пермаллоев являются их относительно высокая стоимость, сильная зависимость магнитных свойств от механических напряжений.

Альсифер — тройной сплав, состоящий из алюминия, кремния и железа. Сплав оптимального состава (9,6 % Si, 5,4 % Al, остальное Fe) по своим свойствам не отличается от пермаллоев и имеет следующие характеристики: $\mu_{rн} = 35\,500$, $\mu_{rmax} = 120\,000$, $H_c = 18$ А/м, $\rho = 0{,}8$ мкОм·м. Такие характеристики получаются только при строгом соблюдении состава, промышленные образцы имеют более низкие характеристики. Альсифер получают как литой, нековкий материал, с высокой твердостью и хрупкостью, поэтому изделия из альсифера изготовляются методом литья с толщиной стенок не менее 2—3 мм. Область применения альсифера — магнитные экраны, корпуса приборов машин, детали магнитопроводов для работы в постоянных или медленно меняющихся магнитных полях. Вследствие того что альсифер хрупок, его можно размалывать в порошок и применять для изготовления прессованных сердечников и магнитодиэлектриков.

Магнитные сплавы с особыми свойствами. В ряде случаев требуются материалы с повышенным постоянством магнитной проницаемости в слабых магнитных полях. Материалы с такими свойствами необходимы для создания магнитных элементов с большим магнитным потоком, в частности в некоторых дросселях, трансформаторах тока, аппаратуре телефонной связи, измерительных приборов и др. Выше рассматривалось, что магнитная проницаемость может быть обусловлена как обратимыми, так и необратимыми процессами намагничивания. Постоянство проницаемости наблюдается при обратимых процессах намагничивания; следовательно, такие материалы должны обладать обратимой проницаемостью в достаточно большом интервале магнитных полей.

Экспериментально установлено, что постоянством проницаемости обладают материалы на основе Fe—Ni, Fe—Co, Fe—Ni—Co сплавов. Тройной сплав (25 % Co, 45 % Ni, остальное — Fe) называют *перминваром*. Магнитная проницаемость перминвара после специальной термической обработки в вакууме становится равной

300 и остается практически постоянной в интервале полей от 0 до 160 А/м. Индукция насыщения перминваров достигает 1,55 Тл. Применение перминвара ограничивается сложностью технологии получения и высокой стоимостью.

Значительно большая стабильность магнитной проницаемости но при меньшем ее значении ($\mu_{гн} = 30 \div 80$) получается в сплаве изотерм, который состоит из железа, никеля, алюминия и меди. После холодной прокатки в этих материалах постоянство магнитной проницаемости сохраняется в полях до 500 А/м.

Применяется сплав в производстве телефонной аппаратуры.

Для различных сердечников, полюсов электромагнитов, работающих в магнитных полях с напряженностью 24 000 А/м и выше, необходимы материалы с особо высокой индукцией насыщения. Такими свойствами обладает Fe—Co — сплав *пермендюр*, который состоит из 30—50 % кобальта, 1,5—2 % ванадия и остальное — железо. Этот сплав обладает наивысшей из всех известных ферромагнетиков индукцией насыщения до 2,43 Тл.

Пермендюр применяется из-за его высокой стоимости только в специализированной аппаратуре, в частности для изготовления мембран телефонов, осциллографах и т. д. К числу недостатков пермендюра относится малое удельное электрическое сопротивление, которое приводит к значительным потерям на вихревой ток при работе в переменных магнитных полях.

В электротехнике используют материалы с большой зависимостью магнитной проницаемости от температуры для температурной компенсации (термокомпенсации) магнитных цепей. Из них изготавливаются магнитные шунты, с помощью которых достигается температурная стабильность магнитных свойств цепей с постоянным магнитом. С увеличением температуры магнитный поток в рабочем зазоре основного магнита падает. Это изменение компенсируется возрастанием магнитного сопротивления шунта. Термомагнитный материал шунта должен иметь магнитную проницаемость, которая сильно зависит от температуры в рабочем диапазоне от —70 до +80 °С, и точку Кюри, близкую к рабочей температуре установки.

В качестве термомагнитных материалов для магнитных шунтов применяют следующие сплавы: медно-никелевый сплав — кальмаллой, железоникелевый — термаллой, железоникель-хромовый — компенсатор.

С изменением концентрации меди в *кальмаллое* от 3 до 40 % изготовляют сплавы, которые компенсируют изменение в магнитных цепях в пределах температур 20—80 °С и от —50 до +10 °С. Недостатком кальмаллоя является низкая индукция насыщения, для повышения ее в кальмаллой добавляют присадки железа. *Термаллой* содержит никель от 28,5 до 33,5 %, по сравнению с кальмаллоями они обладают более высокой индукцией насыщения, которая резко зависит от температуры. Недостатками термаллоя являются наличие значительного температурного гистерезиса в области низких температур, сравнительно низкий предел отрицательных температур, а также сильное влияние состава на свойства материала.

Для расширения работы в области низких температур железоникелевые сплавы легируют хромом. Такие сплавы называют *компенсаторами*, свойства их в меньшей степени зависят от состава, хорошо обрабатываются и имеют достаточно высокую индукцию насыщения.

Методами порошковой металлургии разработаны термомагнитные сплавы на основе Fe—Ni—Mo. Магнитные свойства их близки к сплавам-компенсаторам, но отличаются эти материалы более высокой воспроизводимостью свойств.

Аморфные магнитные материалы. В последнее время уделяется большое внимание вопросам получения и применения аморфных магнитных материалов (АММ). Такие материалы получаются при быстром охлаждении из расплавленного состояния без кристаллизации. Быстрое охлаждение расплавленного сплава достигается различными технологическими приемами, среди которых есть непрерывные или полунепрерывные методы. Аморфная структура получается при скорости охлаждения расплава до 10^6 °С/с. Современными методами можно изготовить из аморфного материала проволоку или ленту различного профиля непосредственно из расплава со скоростью до 1800 м/мин. АММ обладает очень высокими магнитными характеристиками наряду с повышенным сопротивлением. Перспективными высокопроницаемыми материалами являются аморфные сплавы железа и никеля с добавками хрома, молибдена, бора, кремния, фосфора, углерода или алюминия с магнитной проницаемостью до 500, коэрцитивной силой H_c около 1 А/м и индукцией насыщения B_s от 0,6 до 1,2 Тл.

АММ можно использовать в различных типах специальных трансформаторов, в магнитных усилителях, воспроизводящих и записывающих головках, магнитных запоминающих устройствах, электродвигателях.

Магнитодиэлектрики. Это такие материалы, которые состоят из конгломерата частиц низкокоэрцитивного магнитного материала, изолированных между собой органическим или неорганическим диэлектриком, который играет роль и связующего элемента. Благодаря тому что частицы ферромагнитной фазы изолированы, магнитодиэлектрики обладают высоким удельным сопротивлением и малыми потерями на вихревой ток, но имеют пониженное значение магнитной проницаемости. Кроме того, магнитодиэлектрики характеризуются незначительными потерями на гистерезис и высокой стабильностью проницаемости.

Электрическая изоляция ферромагнитных частиц производится жидким стеклом, различными смолами, например полистиролом, фенолформальдегидной смолой или другими связующими. Размеры ферромагнитных частиц составляют $d = 10^{-2} \div 10^{-4}$ см.

Наиболее широкое распространение получили магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа, альсифера и молибденового пермаллоя.

Технология изготовления изделий из магнитодиэлектриков состоит из приготовления ферромагнитного порошка, прессования изделия и обработки.

Магнитодиэлектрики предназначаются для работы в слабых магнитных полях, близких по значению к коэрцитивной силе, и используются в высокочастотной проводной связи, радиоэлектронике и других областях.

Магнитная проницаемость магнитодиэлектрика слабо зависит от частоты. Для магнитодиэлектрика на основе карбонильного железа начальная магнитная проницаемость находится в пределах 10—20, на основе альсифера — 20—94, на основе пермаллоев — 60—250. Изделия из магнитодиэлектриков изготовляются в виде кольцевых и броневых сердечников или других конфигураций.

Ферриты. Основным достоинством ферритов является сочетание высоких магнитных параметров с большим электрическим сопротивлением, которое превышает сопротивление ферромагнитных металлов и сплавов в 10^3—10^{13} раз, и, следовательно, они имеют относительно малые потери в области повышенных частот, что позволяет использовать их в высокочастотных электромагнитных устройствах. Химический состав ферритов с высокой магнитной проницаемостью может быть записан химической формулой $MeO \cdot Fe_2O_3$ или $Me^{2+}Fe_2^{3+}O_4^{2-}$, где в качестве металла используются двухвалентные ионы Mn^{2+}, Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+} и др. Ионы двухвалентного металла характеризуют феррит, который получает название по характеризующему металлическому иону, например $NiFe_2O_4$ — никелевый феррит, $ZnFe_2O_4$ — цинковый феррит. Кристаллическая структура приведенных ферритов аналогична структуре природного минерала — благородной шпинели $MgAl_2O_4$, поэтому их называют ферритами со структурой шпинели или феррошпинели. Такая структура представляет собой гранецентрированную плотноупакованную кубическую решетку, в которой плотнейшую упаковку образуют относительно большие ионы кислорода (ионный радиус 0,132 нм). Металлические ионы, имеющие меньший ионный радиус (0,04—0,1 нм), располагаются в промежутках (узлах) между ионами кислорода. В структуре типа шпинели существует два типа промежутков: тетраэдрические, образованные четырьмя ионами кислорода, и октаэдрические, образованные шестью ионами кислорода. В центрах этих промежутков находятся ионы металла. В элементарной кубической ячейке содержится 64 тетраэдрических и 32 октаэдрических промежутка. В структуре шпинели ионами металла занято восемь тетраэдрических (*A*-узлы) и 16 октаэдрических (*B*-узлы) промежутка.

Распределение ионов двух- и трехвалентного металла по узлам кристаллической решетки оказывает существенное влияние на маг-

нитные свойства ферритов. В зависимости от распределения ионов металла рассматривают три типа шпинелей:

а) нормальная шпинель — в A-узлах размещены ионы двухвалентного металла, а в B-узлах — ионы трехвалентного железа. Химическая формула нормальной шпинели записывается следующим образом:

$$Me^{2+}[Fe_2^{3+}]O_4^{2-};$$

б) обращенная шпинель — A-узлах находится часть ионов трехвалентного железа, а в B-узлах — оставшаяся часть ионов и ионы двухвалентного металла, что соответствует химической формуле

$$Fe^{3+}[Me^{2+}Fe_{2-x}^{3+}]O_4^{2-},$$

где x — доля ионов железа в А-узлах:

в) смешанная шпинель — ионы двух- и трехвалентного металла появляются одновременно в A и B узлах:

$$Me_{1-x}^{2+}Fe_{1+x}^{3+}[Me_{1+x}^{2+}Fe_{1-x}^{3+}]O_4^{2-}.$$

Распределение ионов по A- и B-узлам определяется следующими факторами: а) ионным радиусом; б) конфигурацией электронных оболочек ионов; в) электростатической энергией (зарядом ионов).

Выше отмечалось, что в ферритах осуществляется косвенное обменное взаимодействие, которое приводит к антипараллельной ориентации магнитных моментов соседних ионов. В феррошпинелях соседними ионами оказываются ионы, находящиеся в A- и B-узлах (A—B-взаимодействие). В этом случае решетку можно представить как состоящую в магнитном отношении из двух подрешеток A и B, причем внутри подрешеток магнитные моменты ионов оказываются параллельны друг другу. Таким образом, суммарная намагниченность феррита может быть представлена как разность намагниченностей подрешеток — октаэдрической Мв (B) и тетраэдрической Ма (A), т. е. $M_s = |M_в - M_а|$.

Если намагниченности подрешеток неодинаковы, как это наблюдается в случае ферритов, возникает спонтанная намагниченность.

Цинковый и кадмиевый ферриты, которые обладают структурой нормальной шпинели, немагнитны. В этом случае диамагнитные ионы Zn^{2+} и Cd^{2+} занимают A-узлы, тем самым взаимодействие A—B ликвидируется, взаимодействие в подрешетке B (B—B-взаимодействие) мало и не в состоянии создать упорядочение магнитных моментов.

При повышении температуры магнитное упорядочение разрушается и спонтанная намагниченность уменьшается. Зависимость спонтанной намагниченности феррошпинелей с увеличением температуры в большинстве случаев монотонно убывающая и аналогична зависимости для металлических магнитных материалов.

Технология получения ферритов. Ферриты получают методом керамической технологии. В промышленности в основном используются метод смешивания оксидов или карбонатов нерастворимых в воде и метод термического разложения солей различных металлов. Наиболее простым является метод смешивания оксидов или карбонатов. Технология получения ферритов по этому методу состоит в следующем: исходные оксиды взвешивают, подвергают первому помолу и тщательному перемешиванию в шаровых или вибрационных мельницах. Затем после сушки и прессования брикетов (или гранулирования) осуществляют предварительный обжиг при температуре на несколько сотен градусов ниже температуры окончательного обжига. После этого следует второй помол и порошок используют для получения изделий.

Изделия из ферритов формуются путем прессования в стальных пресс-формах, выдавливания через мундштук, горячего литья под давлением, горячего прессования. Для улучшения пластичности при изготовлении изделий в ферритовый порошок вводят пластификаторы (вода, поливиниловый спирт, парафин и др.). Изделие подвергают окончательному обжигу при температуре 1100—1400 °С. В процессе обжига происходит спекание частиц и заканчивается начавшийся при предварительном обжиге процесс ферритизации (химическая реакция, протекающая между частицами, находящимися в твердой фазе при нагреве) по типу $MeO + Fe_2O_3 \rightarrow MeFe_2O_4$.

Ферритовые спеченные изделия отличаются высокой твердостью и хрупкостью. Механическую обработку ферритов можно производить абразивным инструментом из синтетических алмазов или выполнить операции — резку, шлифовку и полировку.

В ферритовых изделиях можно пробивать отверстия ультразвуком; кроме того, ультразвук позволяет производить пайку ферритов между собой и с металлом. Ферритовые детали склеивают полистироловым, эпоксидным или другими клеями. Ферриты по своим свойствам делятся на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие ферриты используют для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, магнитных антенн, статоров и роторов высокочастотных небольшой мощности электрических моторов, деталей отклоняющих систем телевизионной аппаратуры. Ферриты обладают более низкой индукцией насыщения, чем металлические ферромагнетики, поэтому в сильных полях их применять нецелесообразно, однако в высокочастотных полях ферриты могут иметь более высокую индукцию, так как отсутствует размагничивающее действие вихревых токов.

Наиболее распространенными промышленными магнитомягкими ферритами являются твердые растворы простых ферритов следующих видов:

а) никель-цинковые, представляющие твердые растворы никелевого феррита $NiFe_2O_4$, и феррита цинка $ZnFe_2O_4$. Химическая

формула такого феррита: $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$, где x доля концентрации цинка в феррите.

Увеличение концентрации цинка до некоторого предела ($x = 0,4 \div 0,6$) приводит к увеличению намагниченности насыщения, индукции и магнитной проницаемости и постоянному уменьшению температуры Кюри (рис. 3.9);

б) марганец-цинковые, представляющие собой твердые растворы марганцевого феррита $MnFe_2O_4$ и цинкового феррита $ZnFe_2O_4$. Такие ферриты имеют меньший тангенс угла потерь в области частот 1 МГц, чем никель-цинковые ферриты, что объясняется меньшими потерями на гистерезис. Кроме того, марганец-цинковые ферриты имеют более высокие температуру Кюри и индукцию насыщения. Недостатком марганец-цинковых ферритов является меньшее значение рабочей частоты (до нескольких мегагерц), в то время как никель-цинковые ферриты работают до 100 МГц;

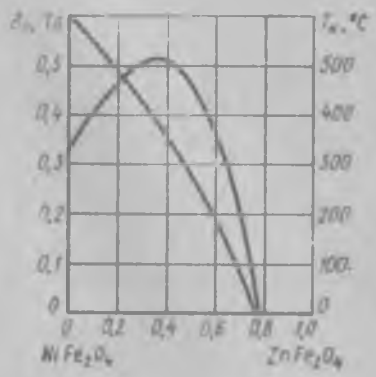


Рис 3.9. Зависимость температуры Кюри и индукции насыщения для ферритов $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ от концентрации цинка (температура обжига 1320 °C)

в) литиевые типа $Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$, в которых в качестве двухвалентного металла используется комплекс ионов $\frac{1}{2}(Li^{1+} + Fe^{3+})$. Литиевые ферриты обладают структурой обращенной шпинели, имеют наиболее высокую индукцию насыщения и используются на частотах до 200 МГц.

Магнитомягкие ферриты маркируются следующим образом: на первом месте примерное значение магнитной проницаемости, затем идут буквы, определяющие частотный диапазон. Ферриты для частот 0,1—50 МГц обозначают буквой Н (низкочастотные), для диапазона 50—600 МГц высокочастотные ферриты обозначаются ВЧ. Далее в маркировке следуют буквы, означающие состав материала: М — марганец-цинковые, Н — никель-цинковые и т. д. Никель-цинковые ферриты маркируются также маркой ВЧ.

Магнитные свойства ряда магнитомягких ферритов приведены в табл. 3.5. Для оценки допустимого частотного диапазона, где может использоваться ферритовый материал, вводят понятие критической частоты $f_{кр}$, тангенс угла магнитных потерь при которой достигает значение 0,1.

Таким образом, можно сделать вывод, что чем выше значение начальной магнитной проницаемости ферритов, тем меньше их удельное электрическое сопротивление и тем ниже их критическая частота.

Таблица 3.5

Марка материала	$\mu_{гн}$	$\mu_{гmax}$	H_c, А/м	B_r, Тл	$T_к$, °С	$f_{кр}$, МГц	ρ, Ом·м
20000НМ	15 000	35 000	0,24	0,11	110	0,01	0,001
10000НМ	8000—1500	17 000	4,0	0,11	110	0,3	0,01
6000НМ	4800—8000	10 000	8,0	0,11	130	0,01	0,1
2000НМ	1700—2500	3 500	24	0,12	200	65	0,5
2000НМ	1800—2000	6 000	8	0,1	70	0,02	10
600НМ	500—800	1 500	40	0,12	110	1,2	10^3
400НМ	320—500	600	56	0,13	120	2,0	10^3
150ВЧ	130—170	350	250	0,15	400	250	10^4
50ВЧ2	45—65	170	500	0,20	450	70	10^4
20ВЧ2	16—24	45	1000	0,1	450	120	10^4

На рис. 3.10 приведена зависимость начальной магнитной проницаемости никель-цинковых и марганец-цинковых ферритов от температуры. Характерно, что с увеличением температуры μ повышается и затем резко падает.

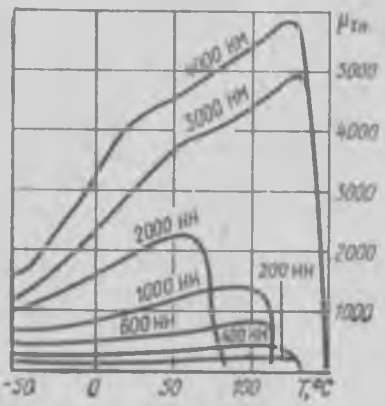


Рис. 3.10. Зависимость начальной магнитной проницаемости от температуры для никель-цинковых и марганец-цинковых ферритов

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) особенно важны в устройствах автоматического управления аппаратуры телеграфной связи, вычислительной техники, коммутирующих дросселей.

Важным показателем свойств материалов с ППГ является коэффициент прямоугольности петли гистерезиса $k_{пу}$, который определяется как отношение остаточной индукции к максимальной магнитной индукции: $k_{пу} = B_r/B_{max} < 1$.

Материалы с ППГ должны обладать малым временем перемагничивания (время изменения знака индукции с $+B_r$ на $-B_r$, которое должно быть примерно 10^{-7}—10^{-9} с), иметь высокую температурную стабильность магнитных параметров.

ППГ имеют некоторые металлические сплавы железа и никеля (пермаллои) и сплавы железо—никель—кабальт с содержанием кобальта от 30 до 55 %, легированные медью или другими металлами. Они изготовляются в виде лент толщиной от единиц до несколь-

ких сотен микрометров, их коэффициент прямоугольности от 0,85 до 0,98. Прокатка микронной ленты, ее термообработка и изготовление сердечников сложнее, чем производство изделий из ферритов, поэтому ферриты с ППГ находят более широкое применение. ППГ в ферритах реализуется при определенном составе и условиях их спекания.

Промышленностью освоен выпуск свыше 25 марок ферритов с ППГ. Широкое распространение получили магний-марганцевые и литиевые ферриты со структурой шпинели. Для улучшения свойств используются легирование их ионами цинка, кальция, меди, натрия и др. Основные характеристики ферритов с ППГ следующие: коэффициент прямоугольности $k_{пу} = 0{,}9 \div 0{,}94$; остаточная индукция $B_r = 0{,}15 \div 0{,}25$ Тл, температура Кюри $T_К = 110 \div 250$ °С (для магний-марганцевых ферритов); $550 \div 630$ °С (для литиевых). Коэрцитивная сила для ферритов, используемых в схемах автоматического управления, лежит в пределах 10—20 А/м, для материалов, используемых в вычислительной технике, — 100—1200 А/м.

Ферриты с ППГ выпускаются в виде кольцевых сердечников различных типоразмеров или ферритовых пластин (плат) с большим количеством отверстий, выполняющих роль сердечников, например для запоминающих устройств выпускаются платы размером 15×15 мм, которые содержат $16 \cdot 16 = 256$ отверстий.

К недостаткам ферритов с ППГ относится меньшая температурная стабильность параметров, чем металлических сплавов.

§ 3.4. Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы в отличие от магнитомягких имеют существенно большие коэрцитивную силу, которая расположена в пределах от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$ А/м, и площадь петли гистерезиса. Такие магнитные материалы применяются для изготовления постоянных магнитов — источников постоянных магнитных полей, которые практически во многих случаях выгоднее, чем электромагнитные.

Постоянные магниты имеют рабочий воздушный зазор; следовательно, на разомкнутых концах возникают полюсы, создающие размагничивающее поле с напряженностью H_d, снижающее индукцию внутри магнита до B_d, которая меньше остаточной индукции B_r. Остаточная индукция B_r характеризует материал в том случае, если магнит находится в замкнутом состоянии и предварительно намагничен до насыщения в сильном внешнем магнитном поле.

На рис. 3.11 приведены кривые, характеризующие свойства магнитотвердых материалов: кривая размагничивания (*1*) — участок гистерезисной петли, расположенный во втором квадрате; кривая энергии магнита в зазоре (*2*). Удельная магнитная энергия поля,

создаваемого в воздушном зазоре магнита, определяется выражением

$$W_d = B_d H_d/2. \qquad (3.6)$$

Индукция разомкнутого магнита B_d уменьшается с увеличением зазора. При замкнутом магните $B_d = B_r$, магнитная энергия равна нулю, так как $H_d = 0$, если зазор между полюсами велик, то напряженность магнитного поля в зазоре равна коэрцитивной силе материала H_c, а $B_d = 0$; следовательно, и в этом случае магнитная энергия $W_d = 0$. При некоторых значениях B_d и H_d энергия достигает максимального значения

$$W_{max} = B_{d_{max}} H_{d_{max}}/2. \qquad (3.7)$$

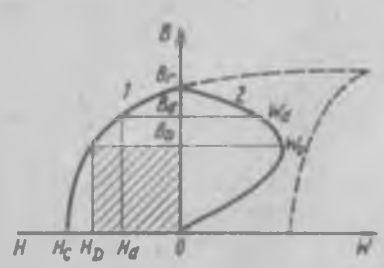


Рис. 3.11. Кривые размагничивания (*1*) и магнитной энергии (*2*) в воздушном зазоре

Величина W_{max} является важнейшей при оценке качества материала. Форма кривой размагничивания характеризуется коэффициентом выпуклости $\gamma = BH_{max}/(B_r H_c)$.

Коэффициент выпуклости приближается к единице с увеличением прямоугольности петли гистерезиса. Максимальная энергия магнита тем больше, чем больше остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_c и коэффициент выпуклости γ.

Магнитотвердые материалы по составу и способу получения подразделяют на следующие группы: 1) литые высококоэрцитивные сплавы; 2) металлокерамические материалы; 3) магнитотвердые ферриты; 3) сплавы на основе редкоземельных элементов; 5) прочие магнитотвердые материалы (мартенситные сплавы, пластически деформируемые сплавы и др.).

Литые высококоэрцитивные сплавы. Наибольшее распространение получили магнитотвердые материалы на основе железоникель-алюминиевых и железоникель-кобальт-алюминиевых сплавов, легированных различными добавками.

Высококоэрцитивное состояние таких сплавов обусловливается механизмом дисперсионного твердения (иногда такие сплавы называются сплавами дисперсионного твердения). При высоких температурах (1200—1300 °С) растворимость элементов неограничена и Fe—Ni—Al-сплавы находятся в однородном состоянии (α-фаза). При медленном охлаждении до определенной температуры происходит дисперсионный распад равновесной фазы на две (α_1 и α_2) фазы, причем α_1-фаза по своему составу близка к чистому железу и является сильномагнитной, другая фаза состоит из Ni—Al и является слабомагнитной. Таким образом, сильномагнитная α_1-фаза в виде однодоменных включений распределена в немагнитной

α_2-фазе. Материалы, имеющие такую структуру, обладают большим значением коэрцитивной силы. Высококоэрцитивное состояние сплавов Fe—Ni—Al получается при концентрации никеля 20—33 % и алюминия 11—17 %. Для улучшения магнитных свойств сплавы обязательно легируются, легирование медью повышает коэрцитивную силу и улучшает механические свойства, но приводит к снижению остаточной индукции. Легирование кобальтом позволяет существенно улучшить коэрцитивную силу и повышает индукцию насыщения и коэффициент выпуклости. В качестве легирующих элементов используются также титан, кремний и ниобий. Коэрцитивная сила H_c сплавов достигает 50 кА/м, а магнитная энергия $(BH)_{max}$ — 12 кДж/м³.

Магнитотвердые материалы типа Al—Ni—Co представляют собой сплав железа с никелем (12—26 %), кобальтом (2—40 %) и алюминием (6—13 %), содержащие, кроме того, с целью улучшения магнитных свойств легирующие добавки меди (2—8 %), титана (0—9 %) и никеля (0—3 %). Сплавы, содержащие более 15 % кобальта, подвергают термомагнитной обработке, которая заключается в охлаждении сплава от высоких температур 1250—1300 °С в сильном магнитном поле, при этом возникает магнитная текстура и сплав становится магнитоанизотропным. Изотропные сплавы имеют магнитную энергию W_{max} до 6 кДж/м³, анизотропные — до 16 кДж/м³.

Для улучшения магнитных свойств сплавы подвергают кристаллической текстуре, которая создается при направленной кристаллизации сплава (особые условия охлаждения сплава), в результате возникает микроструктура в виде ориентированных столбчатых кристаллов. При этом наблюдается увеличение всех магнитных параметров. Магнитная энергия $(BH)_{max}$ повышается на 60—70 % по сравнению с обычной кристаллизацией и достигает 40 кДж/м³.

Магнитные свойства ряда сплавов приведены в табл. 3.6. Марки сплавов обозначаются буквами: Б — ниобий, Д — медь, К — ко-

Таблица 3.6

Марка сплава	W, кДж/м³	H_c, кА/м	B_r, Тл
ЮНД4	3,6	40	0,50
ЮНД8	5,1	44	0,60
ЮНКД15	6,0	48	0,75
ЮНКД18	9,7	55	0,90
ЮНКД24	18	52	1,15
ЮН13ДК25БА	28	48	1,40
ЮНДК31Т3БА	32	92	1,15
ЮНДК34Т5	14	92	0,75
ЮНДК35Т5	18	110	0,75
ЮНДК35Т5БА	36	110	1,02

бальт, Н — никель, Т — титан, Ю — алюминий, А — столбчатая структура. Цифры указывают процентное содержание элемента.

Изделия из сплавов получают в основном методом литья. Недостатками сплавов являются особая хрупкость и высокая твердость, поэтому обработка их на металлорежущих станках затруднена. Механической обработке в виде грубой обдирки резанием с применением твердосплавных резцов поддаются сплавы, не содержащие кобальта. Детали из всех сплавов можно шлифовать на плоскошлифовальных или круглошлифовальных станках в два приема: грубая шлифовка — до термической обработки, чистовая — после термической обработки. Для грубой обработки применяют также электроискровой метод обработки.

Бескобальтовые сплавы являются дешевыми и не содержат дефицитных металлов, но свойства их не очень высоки. Текстурованные сплавы, содержащие кобальт, имеют высокие магнитные характеристики, но в несколько раз дороже, чем бескобальтовые.

Металлокерамические и металлопластические магниты. Они создаются методами порошковой металлургии, которые позволяют автоматизировать процесс производства, получать изделия по строго выдержанным размерам.

Металлокерамические магниты изготовляют из измельченных тонкодисперсионных порошков сплавов ЮНДК, а также сплавов Cu—Ni—Co, Cu—Ni—Fe путем прессования и дальнейшего спекания при высоких температурах. Такой способ выгодно применять для производства мелких деталей или магнитов сложной конфигурации.

Так как металлокерамические магниты содержат поры, то их магнитные свойства уступают литым материалам. Как правило, пористость (3—5 %) уменьшает остаточную индукцию B_r и магнитную энергию W_{max} (на 10—20 %) и практически не влияет на коэрцитивную силу H_c. Механические свойства их выше, чем литых магнитов. Металлопластические магниты изготовлять проще, чем металлокерамические, но свойства их хуже. Металлопластические магниты получают из порошка сплавов ЮНД или ЮНДК, смешанного с порошком диэлектрика (например, фенолоформальдегидной смолой). Процесс изготовления магнитов подобен процессу прессования пластмасс и заключается в прессовании под давлением 500 МПа, нагреве заготовок до 120—180 °С для полимеризации диэлектрика.

Механические свойства металлопластических магнитов лучше, чем у литых, но магнитные свойства хуже, так как они содержат до 30 % по объему немагнитного связующего диэлектрического материала: B_r меньше на 35—50 %, W_{max} — на 40—60 %.

Магнитотвердые ферриты. Наибольшее распространение получили магнитотвердые материалы на основе бариевого (стронциевого) феррита $BaFe_{12}O_{19}$ ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$) и кобальтового феррита $CoFe_2O_4$ ($CoO \cdot Fe_2O_3$). Кобальтовый феррит имеет структуру типа

шпинели, а бариевый феррит — структуру природного минерала магнетоплюмбита с гексагональной решеткой. Бариевые магниты обладают большой магнитной анизотропией, которая наряду с мелкозернистой структурой приводит к повышенным значениям коэрцитивной силы до 350 кА/м. Промышленность выпускает бариевые магниты двух типов: изотропные (маркировка БИ) и анизотропные (БА). Технология производства магнитов БИ не отличается от технологии магнитомягких ферритов.

Особенность производства магнитов БА состоит в том, что после предварительного обжига путем мокрого помола приготовляется полужидкая масса порошка бариевого феррита, которая прессуется в сильном магнитном поле при откачке влаги. В результате в материале создается магнитная текстура и он становится анизотропным. Основные параметры магнитов из бариевых и кобальтовых ферритов приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Марка материала	B_r, Тл	H_c, кА/м	W_{max}, кДж/м
1БИ	0,19	128	3,2
1БИ2	0,20	136	3,4
2БА1	0,30	200	7,4
3БА	0,38	168	12,4
3БА1	0,37	208	12,0
3БА2	0,35	240	10,4
1,5КА	0,24	128	5,6
2КА	0,28	128	7,2

Бариевые магниты обладают высокой стабильностью при воздействии магнитных полей, вибрации и ударного воздействия, их можно использовать в магнитных цепях, работающих в высокочастотных полях, так как сопротивление бариевых магнитов велико (до 10^6—10^9 Ом·м). Бариевые магниты не содержат дефицитных материалов и примерно в 10 раз дешевле магнитов из ЮНДК.

К недостаткам бариевых магнитов нужно отнести низкую остаточную индукцию, высокую хрупкость и твердость, а также значительную зависимость магнитных свойств от температуры. Кобальтовые ферриты более температуростабильны.

Сплавы на основе редкоземельных металлов. Интерметаллические соединения кобальта с редкоземельными металлами (РЗМ): церием Ce, самарием Sm, празеодимом Pr, лантаном La и иттрием Y — типа R_xCo_y, где R — РЗМ обладают очень высокими значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии. Из этой группы наибольший интерес представляют соединения типа RCo_5 и R_2CO_{17}, которые обладают наибольшей магнитной анизотропией, значительной величиной спонтанной намагниченности и высокой температу-

рой Кюри. Соединения типа RCO_5 нестабильны и распадаются на две или большее количество фаз. Многофазность является одной из причин появления высокой коэрцитивной силы.

Технология получения магнитов из РЗМ заключается в спекании их из порошков в присутствии жидкой фазы или литья. Жидкая фаза создается за счет того, что РЗМ берется в избытке. Магнитные свойства сплавов приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Соединение	H_c кА/м	B_r, Тл	W_{max}, кДж/м³	$T_к$, °С
$SmCo_5$	560	0,92	75	725
$PrCo_5$	415	0,94	56	610
$Sm_{0,5}Pr_{0,5}Co_5$	450–700	0,89–1,0	80–92	—

Дальнейшее увеличение максимальной магнитной энергии может быть получено только при увеличении B_r материалов. В настоящее время получены лабораторные образцы на основе R_2Co_{17} сплава в составе 52 % Co, 25,5 % Sm, 8 % Cu, 14 % Fe и 1,1 % Zn, который имел следующие параметры: B_r = 1,1 Тл, H_c = 550 кА/м, W_{max} = 120 кДж/м³.

Перспективы использования таких сплавов велики. Основные недостатки сплавов — неважные механические свойства (высокая хрупкость), использование дефицитных материалов и высокая стоимость.

Другие магнитотвердые металлы. Кроме рассмотренных магнитотвердых материалов применяются наиболее старые материалы для постоянных магнитов — мартенситные стали, а также пластически деформируемые сплавы.

Мартенситом называют особый вид микроструктуры стали, который получают при быстром ее охлаждении (закалке). Образование мартенсита (200 °С), который имеет пластинчатую форму, сопровождается объемными изменениями, созданием больших внутренних напряжений, что приводит к появлению большой коэрцитивной силы. В настоящее время используются только легированные мартенситные стали, которые называются по легирующей добавке: хромовые (до 3 % Cr), вольфрамовые (до 8 % W) и кобальтовые (до 15 % Co). Значение W_{max} для мартенситных сталей низкое и лежит в пределах 1–4 кДж/м³; кроме того, они имеют склонность к старению. В настоящее время эти материалы имеют ограниченное применение и используются для изготовления магнитов только в наименее ответственных случаях.

Пластически деформируемые сплавы обладают высокими механическими свойствами, хорошо штампуются, режутся ножницами, обрабатываются на станках.

Наиболее распространенными являются сплавы кунифе (60 % Cu, 20 % Ni, 20 % Fe), кунико (50 % Cu, 21 % Ni, 29 % Co, остальное Fe) и викаллой (51,0—54,0 Co, 10—13,0 Y, остальное Fe).

Сплавы кунифе анизотропны, применяются в виде проволоки и штамповок. Сплавы кунико дороже сплавов кунифе и применяются для изготовления магнитов сложной конфигурации. Викаллой применяют для изготовления мелких магнитов сложной конфигурации.

Магнитные характеристики для всех сплавов следующие: остаточная индукция — 0,6—0,9 Тл, коэрцитивная сила — 24—57 кА/м, магнитная энергия для викаллоя — 4—14 кДж/м³, кунифе — 2,8—7,4 кДж/м³, кунико — 3,2—4,0 кДж/м³.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются материалы по магнитным свойствам?
2. Какими параметрами характеризуются магнитные материалы?
3. Какие потери возникают в магнитных материалах?
4. Как связана доменная структура с основной кривой намагничивания?
5. Назовите основные магнитомягкие материалы и опишите их свойства.
6. Какие магнитные материалы имеют высокое значение магнитной проницаемости, индукции насыщения?
7. Каковы структура и свойства магнитомягких ферритов?
8. Назовите важнейшие характеристики магнитотвердых материалов.
9. Какие материалы для постоянных магнитов используются в электротехнике?

ГЛАВА 4. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 4.1. Общие сведения о проводниках

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

По удельному электрическому сопротивлению ρ металлические проводниковые материалы можно разбить на две основные группы: металлы высокой проводимости, у которых ρ при нормальной температуре составляет не более 0,05 мкОм·м, и металлы и сплавы высокого сопротивления, имеющие при тех же условиях ρ не менее 0,3 мкОм·м. Проводниковые материалы первой группы применяются в основном для изготовления обмоточных и монтажных проводов, жил кабелей различного назначения, шин и т. д. Проводниковые материалы второй группы используются при производстве резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. п.

Особую группу составляют криопроводники и сверхпроводники — материалы, которые обладают ничтожно малым удельным

электрическим сопротивлением при температурах, близких к абсолютному нулю.

К жидким проводникам относятся, как правило, расплавленные металлы и различные электролиты. Большинство металлов (табл. 4.1) имеют достаточно высокую температуру плавления и поэтому являются жидкими проводниками при повышенных температурах. Среди металлов только ртуть, имеющая температуру плавления около —39 °С, может быть использована как жидкий проводник при нормальной температуре.

Таблица 4.1

Металл	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Плотность, кг/м³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	ТК линейного расширения ×10⁶, К⁻¹	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	ТК удельного сопротивления ×10³, К⁻¹
Ртуть	—38,9	357	13 600	130	10	61,0	0,958	9
Цезий	28,5	700	1 870	234	—	95,0	0,210	48
Галлий	29,7	2070	5 910	381	—	18,0	0,560	—
Калий	63,7	775	870	753	92	80,0	0,069	58
Натрий	97,8	883	970	1260	125	70,0	0,046	50
Индий	156,0	2075	7 280	243	25	25,0	0,090	47
Литий	186,0	1220	530	3620	71	—	—	—
Олово	232,0	2260	7 310	226	65	23,0	0,120	44
Кадмий	321,0	767	8 650	230	93	30,0	0,076	42
Свинец	327,0	1620	11 400	130	35	29,0	0,210	37
Цинк	420,0	907	7 140	390	111	31,0	0,059	—
Магний	651,0	1103	1 740	1040	167	26,0	0,045	42
Алюминий	657,0	1800	2 700	922	209	24,0	0,028	42
Барий	710,0	1637	3 500	268	—	17,0	0,500	25
Серебро	961,0	1950	10 500	234	415	19,0	0,016	40
Золото	1063,0	2600	19 300	126	293	14,0	0,024	38
Медь	1083,0	2300	8 940	385	390	16,0	0,017	43
Бериллий	1284,0	2500	1 850	200	167	13,0	0,040	60
Никель	1455,0	2900	8 900	444	95	13,0	0,073	65
Кобальт	1492,0	3000	8 710	435	79	12,0	0,062	60
Железо	1535,0	2200	7 870	452	73	11,0	0,098	60
Палладий	1554,0	2000	12 100	243	72	12,0	0,110	—
Титан	1725,0	4240	4 500	577	15	8,1	0,480	33
Платина	1773,0	2900	21 400	—	—	6,5	0,105	—
Хром	1850,0	2430	7 100	113	—	11,2	0,210	—
Торий	1850,0	3500	11 500	134	71	9,0	0,186	23
Цирконий	1860,0	4900	6 500	276	17	5,4	0,410	45
Иридий	2350,2	4800	22 500	—	—	—	—	—
Ниобий	2410,0	3300	8 570	172	50	7,2	0,140	30
Молибден	260,20	3700	10 200	264	151	5,1	0,057	46
Тантал	2850,0	4200	16 700	142	54	6,5	0,135	38
Рений	3180,0	—	20 500	138	71	4,7	0,210	42
Вольфрам	3380,0	550	19 300	218	168	7,4	0,055	46

В связи с тем что механизм электропроводности в металлах как в твердом, так и в жидком состоянии обусловлен направленным движением свободных электронов под воздействием электрического поля, их принято называть *проводниками с электронной проводимостью* или *проводниками первого рода*. В *проводниках второго рода* или *электролитах*, к которым относятся растворы, в том числе и водные, кислот, щелочей и солей, прохождение тока связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов вещества в соответствии с законами Фарадея. При этом состав электролита постепенно изменяется и на электродах выделяются продукты электролиза. Следует отметить, что ионные кристаллы в расплавленном состоянии также являются проводниками второго рода

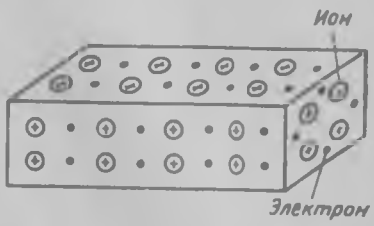


Рис. 4.1. Схема строения металлического проводника

Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких значениях напряженности электрического поля не являются проводниками. При достижении некоторого критического значения напряженности электрического поля, обусловливающего начало ударной и фотоионизации, газ становится проводником с электронной и ионной электропроводностью. Если газ сильно ионизирован, то при равенстве в единице объема числа отрицательно заряженных электронов к числу положительных ионов наблюдается особое состояние вещества, получившее название *плазма* (рис. 4.1).

К электрическим характеристикам проводниковых материалов можно отнести: удельную проводимость σ или обратную ей величину — удельное сопротивление ρ; контактную разность потенциалов и термоэлектродвижущую силу (термоЭДС); работу выхода электронов из металла.

Удельная проводимость и удельное сопротивление проводников. Как указывалось выше, данные материалы обладают высокой проводимостью из-за наличия значительного количества свободных электронов, которая выражается в сименсах на метр (См/м) и может быть определена по формуле

$$\sigma = \frac{q^2 n_0 \lambda}{2m V_T}, \qquad (4.1)$$

где q — заряд электрона ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл); n_0 — число свободных электронов в единице объема металла; λ — средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки; m — масса электрона; V_T — средняя скорость теплового движения свободного электрона.

Концентрация свободных электронов n_0 и скорости их хаотического теплового движения V_T для различных металлов при опреде-

ленной температуре отличаются незначительно. В связи с этим значение удельной проводимости зависит в основном от средней длины свободного пробега электронов в конкретном проводнике. Тепловая скорость, в свою очередь, определяется структурой проводникового материала. Так, например, для чистых металлов с наиболее правильной кристаллической решеткой значения удельного сопротивления являются минимальными. И наоборот, наличие примесей и дефектов в решетке приводит к увеличению ρ.

Указанные явления находят свое подтверждение и с точки зрения волновой природы электронов. Электронные волны, распространяясь в проводниковом материале, частично теряют свою энергию на дефектах кристаллической решетки проводника, размеры которых соизмеримы с четвертью длины электронной волны. Так как длина волны в металлическом проводнике составляет 0,5 нм ($0{,}5 \cdot 10^{-9}$ м), то имеющиеся в нем даже микродефекты создают значительное рассеяние энергии, что приводит к уменьшению подвижности электронов и, следовательно, к снижению σ.

Вместе с тем удельная проводимость металлов практически не зависит от напряженности электрического поля, значение которого может изменяться в довольно широких пределах, что полностью соответствует закону Ома (дифференциальная форма записи)

$$j = \sigma E, \tag{4.2}$$

где j — плотность тока, А/м²; E — напряженность электрического поля, В/м.

Удельное сопротивление проводника с сопротивлением R, сечением S и длиной l может быть рассчитано по формуле

$$\rho = RS/l. \tag{4.3}$$

При этом ρ выражается в Ом·мм²/м, такая внесистемная единица часто используется на практике, так как длину проводника удобнее выражать в метрах, а площадь поперечного сечения — в квадратных миллиметрах. Для перевода внесистемной единицы ρ в СИ можно использовать соотношение 1 Ом·м = 10^6 мкОм·м = 10^6 Ом·мм²/м.

Удельное сопротивление сплавов определяется в основном наличием примесей и нарушением структуры входящих в них металлов. Особенно резко оно возрастает, когда при сплавлении двух металлов образуется твердый раствор, т. е. они совместно кристаллизуются. При этом атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого. На рис. 4.2 представлена зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих друг с другом твердый раствор. Эта зависимость наглядно иллюстрирует отмеченные выше явления.

Как видно из рис. 4.2, кривая имеет характерный максимум, соответствующий вполне определенному соотношению между содержанием компонентов в данном сплаве, при котором наличие де-

фектов в кристаллических решетках меди и никеля будет минимальным.

Когда же при сплавлении двух металлов наблюдается раздельная кристаллизация и структура застывшего сплава представляет собой смесь кристаллов каждого из компонентов, удельное сопротивление ρ меняется с изменением состава практически линейно.

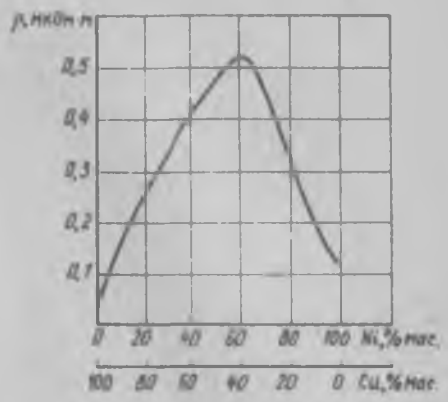


Рис. 4.2. Зависимость ρ сплавов Cu—Ni от состава

Следует отметить также, что при определенном соотношении между компонентами могут образовываться явно выраженные химические соединения — интерметаллиды, для которых зависимость ρ от состава имеет характерные изломы (рис. 4.3).

Большую часть интерметаллидов, как показали работы А. Ф. Иоффе, можно отнести не к металлам, а к полупроводникам, с электронным характером электропроводности.

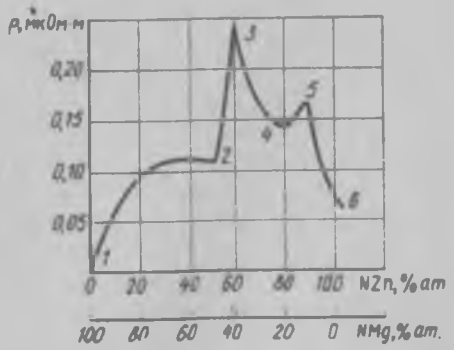


Рис. 4.3. Зависимость удельного сопротивления сплавов Zn—Mg от состава

1 — чистый Mg; 2 — MgZn; 3 — Mg_2Zn_3; 4 — $MgZn_2$; 5 — $MgZn_4$; 6 — чистый Zn

Факторы, влияющие на значение удельного сопротивления. Как уже отмечалось выше, удельное сопротивление металлов связано в основном с рассеянием энергии свободных электронов на дефектах кристаллической решетки, к которым относятся примесные атомы, вакансии, дислокации, и тепловых колебаниях собственных атомов. Поэтому удельное сопротивление ρ можно представить как

$$\rho = \rho_{тепл} + \rho_{ост}, \qquad (4.4)$$

где $\rho_{тепл}$ — удельное сопротивление, обусловленное в основном тепловыми колебаниями решетки; $\rho_{ост}$ — удельное сопротивление, вызванное наличием дефектов в кристаллической решетке.

Характерная для металлов зависимость удельного сопротивления от температуры приведена на рис. 4.4. Наглядно видно, что при температурах, превышающих температуру Дебая Θ, которая для

металлов находится в пределах 400—800 °С, удельное сопротивление возрастет практически линейно и обусловлено в основном усилением тепловых колебаний решетки. При этом уменьшается средняя длина свободного пробега электронов, их подвижность, а следовательно, уменьшается и проводимость металла.

В области низких (криогенных) температур значение ρ почти не зависит от температуры и определяется только сопротивлением $\rho_{ост}$.

Характер зависимости ρ от температуры для большинства металлов резко изменяется при переходе из твердого состояния в жидкое. Отмеченное явление достаточно наглядно демонстрирует зависимость удельного сопротивления ρ меди от температуры (рис. 4.5).

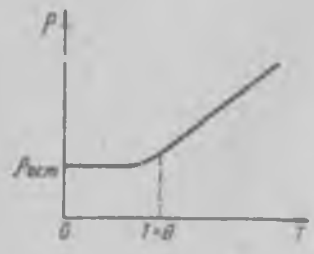


Рис. 4.4. Зависимость удельного сопротивления металла от температуры

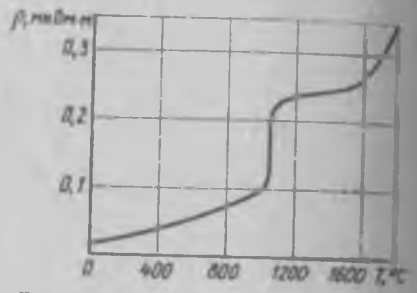


Рис. 4.5. Зависимость удельного сопротивления меди от температуры

При достижении температуры плавления (для меди она составляет 1083 °С) увеличивается объем металла, т. е. уменьшается его плотность, а вместе с ней и концентрация носителей. В результате сопротивление меди возрастет примерно в 2.4 раза. Для металлов, уменьшающих свой объем при плавлении (галлий, висмут, сурьма), значение удельного сопротивления имеет тенденцию к уменьшению.

Изменение удельного сопротивления металлического проводника с температурой принято характеризовать температурным коэффициентом удельного сопротивления ТК ρ или α_ρ ($К^{-1}$).

Если температура металла изменяется в узких пределах, то для практических целей удобно использовать кусочно-линейную аппроксимацию зависимости $\rho = f(T)$, которая позволяет определить средний температурный коэффициент удельного сопротивления

$$\bar{\alpha}_\rho = \frac{1}{\rho_0}\,\frac{\rho_1-\rho_0}{T_1-T_0}, \qquad (4.5)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление при температуре T_0, принятой за начальную, а ρ_1 — при температуре T_1. Температуру T_0 обычно принимают равной 20 °С, и поэтому значение α_ρ часто приводится при 20 °С.

Используя значение коэффициента $\bar{\alpha}_\rho$, определенное для интервала температур T_1—T_0, можно достаточно точно определить удельное сопротивление ρ_2 для любой температуры T_2 внутри этого интервала:

$$\rho_2 = \rho_0\left[1+\bar{\alpha}_\rho(T_2-T_1)\right]. \qquad (4.6)$$

Для металлов значение α_ρ достаточно велико ($4\cdot10^{-3}$ $К^{-1}$), а у большинства сплавов — значительно меньше (10^{-5} 10^{-6} $К^{-1}$).

К числу факторов, влияющих на удельное сопротивление металлических проводников, относится и магнитное поле, под действием которого происходит искривление траектории движения электронов, что приводит к изменению электропроводности.

Как известно, металлические проводники и сплавы применяются в электротехнике обычно в виде проволоки различной формы и сечений, которая изготовляется в процессе ее протяжки или волочения.

При деформации металла в холодном состоянии наблюдается искажение кристаллической решетки, что приводит также к увеличению удельного сопротивления.

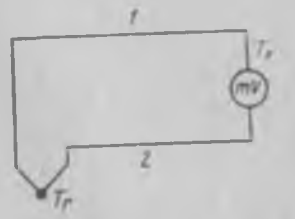


Рис. 4.6. Схема термопары

Устранить данное явление позволяет отжиг, в ходе которого металл и сплав сначала нагреваются до высокой температуры, а затем медленно охлаждаются. В результате процесса рекристаллизации происходит восстановление искаженной структуры и удельное сопротивление уменьшается.

Термодвижущая сила. Между двумя различными проводниками (или полупроводниками) при их соприкосновении возникает контактная разность потенциалов, которая обусловлена разностью значений работы выхода электронов из различных металлов (рис. 4.6). В соответствии с электронной теорией металлов контактная разность потенциалов между проводниками *1* и *2* может быть определена как

$$U_{1-2} = U_2 - U_1 + \frac{k\cdot T}{q}\ln\frac{n_{01}}{n_{02}}, \qquad (4.7)$$

где U_1 и U_2 — потенциалы соприкасающихся металлов; n_{01} и n_{02} — концентрация электронов в проводниках *1* и *2*; $k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; q — абсолютная величина заряда электрона.

Если температуры «спаев» одинаковы, то в замкнутой цепи сумма разности потенциалов равна нулю. Когда же равенство температур не наблюдается, между проводниками возникает термоЭДС, которую можно рассчитать по формуле

$$E = U_{1-2} + U_{2-1} = C(T_г - T_х), \qquad (4.8)$$

где $C = \frac{k}{q} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}$ — коэффициент, характеризующий данную пару (мкВ/К).

Зависимость термоЭДС от разности температур спаев не всегда линейна и, следовательно, необходимо корректировать коэффициент C в соответствии со значениями температур $T_г$ и $T_х$.

Два изолированных проводника, соединенных между собой с помощью пайки или сварки, называются *термопарой* и применяются для измерения температуры. Для изготовления термопар используются проводники, обладающие большим и стабильным коэффициентом термоЭДС.

§ 4.2. Проводниковые материалы

Материалы высокой проводимости. Среди указанных материалов наиболее широкое распространение получили серебро, медь и алюминий.

Серебро — металл белого цвета, один из наиболее дефицитных материалов, так как содержание его в земной коре составляет всего лишь $7 \cdot 10^{-6}$ % мас. Среди всех проводниковых материалов серебро обладает минимальным удельным сопротивлением при нормальной температуре (см. табл. 4.1). В соответствии с ГОСТ 6836—80 серебро, имеющее марку Ср999—999,9, должно содержать не более 0,1 % примесей. Механические характеристики серебра невысоки: твердость по Бринеллю составляет всего 25 (немного более золота), предел прочности при разрыве не превышает 200 МПа, а относительное удлинение при разрыве достигает 50 %. По сравнению с другими благородными металлами (золотом, платиной) серебро имеет пониженную химическую стойкость, имеет тенденцию диффундировать в материал подложки, на который оно нанесено. В условиях высокой влажности и при повышенных температурах процесс диффузии серебра в материал подложки значительно усиливается.

Серебро достаточно широко применяется в электротехнике и электронике, а именно: при производстве радиочастотных кабелей, работающих в диапазоне высоких частот, для защиты медных проводников от окисления при температурах выше 250 °С, для изготовления электродов в производстве керамических и слюдяных конденсаторов, при изготовлении и применении контактов и т. д.

В связи с тем что в последнее время потребление серебра систематически превышает производство первичного металла и восполнение его дефицита за счет вторичного, необходимо соблюдать строгие меры по его экономии.

Медь — металл красноватого цвета, также очень дефицитный, так как его содержание в земной коре составляет не более $4{,}7 \times 10^{-3}$ % мас., причем в верхней ее части — около $2 \cdot 10^{-3}$. Этот металл получил самое широкое распространение в качестве провод-

никового материала, поскольку обладает целым рядом технически ценных свойств: малым удельным сопротивлением; достаточно высокой механической прочностью; удовлетворительной стойкостью к коррозии даже в условиях повышенной влажности; хорошей обрабатываемостью (легко прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку малого диаметра); хорошей способностью к пайке и сварке.

Наименьшим удельным сопротивлением ρ обладает химически чистая медь. Наличие примесей в меди отрицательно влияет не только на ее механические и технологические свойства, но и значительно снижает электропроводность. Наиболее нежелательными примесями являются висмут и свинец, которые почти нерастворимы в меди и образуют легкоплавкую эвтектику, которая при кристаллизации меди располагается вокруг зерен. Даже тысячные доли процента висмута и сотые доли процента свинца приводят к тому, что медь при обработке давлением при температуре 850—1150 °С растрескивается. Наличие серы приводит к уменьшению пластичности. Такая медь при низких температурах становится хрупкой. Очень вредно присутствие в составе меди и кислорода, который способствует образованию оксида и закиси меди, вызывающих повышение удельного сопротивления.

Согласно ГОСТ 859—78, медь по химическому составу подразделяется на несколько марок: М1, М00к, М0к, М0ку, М00б, М0б, М1б, М1у, М1к, М1ф, М1р, к, ку — катодная медь, б — бескислородная, у — катодная переплавленная, р и ф — раскисленная, цифры 00, 0 и 1 отражают содержание меди. Максимальное содержание меди имеют марки М00к и М00б.

Содержание меди вместе с серебром в этих марках составляет 99,9—99,99 % мас. Следует отметить, что медь марки М1ф с повышенным содержанием фосфора (0,012—0,06 %), снижающим электропроводность, для изготовления проводников практически не используется. В производстве проводов не применяется также и медь марки М1р, которая раскислена фосфором и содержит его в количестве 0,002—0,012 %. Данная медь может быть использована при изготовлении других типов кабельной продукции, например некоторых видов лент.

В нормальных атмосферных условиях медь достаточно устойчива против коррозии, так как ее химическая активность невелика. В сухом и влажном воздухе, пресной воде при 20 °С медь практически не окисляется. Незначительная коррозия наблюдается только в соленой воде. В присутствии влаги и углекислого газа на поверхности меди образуется, как правило, зеленая пленка основного карбоната.

При нагревании меди до температуры 200 °С идет медленное ее окисление с образованием защитной пленки оксида меди CuO. Интенсивное окисление меди начинается при температуре выше 225 °С.

Пониженную активность проявляет медь также и при взаимо-

действии с холодными и теплыми растворами соляной и серной кислот, концентрация которых не превышает 80 %. Растворимость водорода в твердой меди достаточна мала и даже при температуре 400 °С составляет не более 0,06 мг в 100 г. Медь растворяется в азотной кислоте, достаточно легко соединяется с хлором и другими галогенами, может гореть в парах серы.

Механические и электрические характеристики проводниковой меди существенно зависят от ее состояния. Так, например, твердотянутая медь марки МТ имеет меньшую проводимость и относительное удлинение перед разрывом, но большую механическую прочность и твердость, чем отожженная медь марки ММ. Твердость по Бринеллю при 20 °С для меди марки МТ в зависимости от степени нагартовки составляет 65—120, а для меди марки ММ — не более 35.

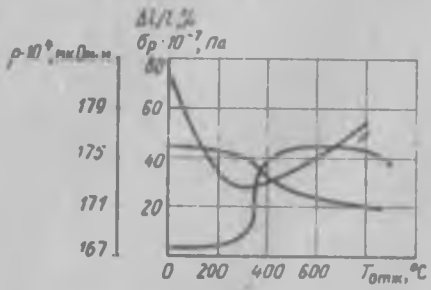


Рис 4.7. Зависимости удельного сопротивления ρ, предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве ΔL/L меди от температуры отжига (продолжительность отжига 1 ч)

Заметное влияние на указанные характеристики меди оказывает и температура. При нагревании (особенно выше 200 °С) в результате процесса рекристаллизации (рис. 4.7) механические характеристики и удельное сопротивление меди резко изменяются.

В соответствии с механическими и электрическими характеристиками проводниковой меди формируются и области ее применения.

Мягкая (отожженная) медь, удельное сопротивление которой при 20 °С не должно превышать 0,01724 мкОм·м, в виде проволок различного сечения и формы применяется, как правило, для изготовления токопроводящих жил кабелей различного назначения, обмоточных и монтажных проводов, в производстве волноводов и т. д. Кроме того, ленточная медь широко используется при экранировании кабелей связи и радиочастотных кабелей.

Твердая (холоднотянутая) медь, удельное сопротивление которой должно быть не более 0,0180 мкОм·м, применяется в основном там, где необходимо обеспечить высокую механическую прочность, твердость, сопротивляемость истирающим нагрузкам и упругость. Такие требования к меди предъявляются при изготовлении контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин и пр.

Поскольку в настоящее время медь является сравнительно дорогим и дефицитным материалом, расходование ее ведется весьма экономно и при возможности ее заменяют на другие, менее дефицитные.

А л ю м и н и й — металл, занимающий второе место по значению (после меди) среди проводниковых материалов и наиболее распространенный в природе, поскольку его содержание в земной коре составляет не менее 7,5 %.

Широкое распространение в электротехнике этот металл получил не только ввиду острого дефицита меди, но и благодаря своим замечательным свойствам. Алюминий, обладая большим сродством к воздуху, легко окисляется на воздухе, покрываясь при этом прочной оксидной пленкой, которая защищает металл от дальнейшего окисления и обусловливает его высокую коррозионную стойкость. На него не действуют водяной пар, пресная и морская вода. В обычных условиях алюминий слабо реагирует с концентрированной азотной кислотой. Однако при нагревании он растворяется в разбавленной серной и азотной кислотах. Легко растворяется в щелочах, образуя при этом алюминаты с выделением водорода.

По отношению к большинству металлов алюминий имеет отрицательный электрохимический потенциал и, находясь в контакте с ними, образует гальванические пары, что в присутствии влаги способствует развитию электрохимической коррозии.

В связи с тем что оксидная пленка обладает электроизоляционными свойствами, в месте контакта проводов создается достаточно большое переходное сопротивление, которое затрудняет пайку алюминия обычными методами. Для этой цели приходится использовать специальные припои и паяльники (ультразвуковые) либо применять холодную сварку, т.е. пластическое обжатие проводов в месте их контакта.

Присутствие примесей в составе алюминия, среди которых наиболее часто встречаются железо, кремний, медь, цинк и титан, существенно снижают его удельную проводимость, влияют на механические характеристики и обусловливают области его применения.

В соответствии с количественным содержанием контролируемых примесей отечественная промышленность выпускает алюминий трех марок: особой чистоты (не более 0,001 %), высокой чистоты (не более 0,05 %) и технической чистоты (не более 1,0 %).

Марка алюминия начинается с буквы А, затем идет цифра, определяющая процентное содержание алюминия. Так, например, алюминий марки А97 содержит 99,97 % алюминия, остальное — контролируемые примеси.

Для электротехнических целей используются специальные марки алюминия А5Е и А7Е, в которых содержание железа и кремния находится в определенном соотношении, а содержание титана, ванадия, хрома и марганца снижено до тысячных долей процента.

В отожженном состоянии такой алюминий имеет предел прочности при растяжении 80—90 МПа, относительное удлинение 25—33 %, а твердость по Бринеллю 15—20. Удельное электрическое сопротивление проводникового алюминия не должно превышать 0,0289 мкОм·м.

Холодная деформация алюминия и наличие примесей увеличивают твердость и прочность металла, снижают относительное удлинение и его проводимость.

Проводниковый алюминий используется для изготовления токопроводящих жил обмоточных, монтажных и установочных проводов, а также неизолированных проводов для воздушных линий электропередачи, прессованных жил кабелей различного назначения и т. д. Для этих же целей может использоваться алюминий специальных марок А75К, А8К и А8КУ, в которых суммарное содержание примесей Ti+V+Mr+Cr уменьшено по сравнению с марками А7 и А8.

Сплавы алюминия отличаются легкостью и повышенной механической прочностью по сравнению с алюминием. В состав алюминиевых сплавов помимо алюминия могут входить марганец, цинк, магний, медь, железо и кремний, причем содержание железа и кремния в составе сплава не должно превышать 0,7 и 0,3 % соответственно.

В марках алюминиевых сплавов буквы дают информацию о том, какие именно элементы содержатся в сплаве (А — алюминий, К — кремний, М — медь, Мг — магний, Ц — цинк, Мц — марганец), а цифры — их среднее процентное содержание.

Сверхпроводники и криопроводники. Явление сверхпроводимости было открыто нидерландским физиком Х. Камерлинг-Оннесом в 1911 г. Согласно современной теории, основные положения которой были развиты в работах Д. Бардина, Л. Купера, Дж. Шриффера (теория БКШ), явление сверхпроводимости металлов можно объяснить следующим образом. При температурах, близких к абсолютному нулю, меняется характер взаимодействия электронов между собой и атомной решеткой, так что становится возможным притягивание одноименно заряженных электронов и образование так называемых электронных (куперовских) пар. Поскольку куперовские пары в состоянии сверхпроводимости обладают большой энергией связи, обмена энергетическими импульсами между ними и решеткой не наблюдается. При этом сопротивление металла становится практически равным нулю. С увеличением температуры некоторая часть электронов термически возбуждается и переходит в одиночное состояние, характерное для обычных металлов. При достижении критической температуры ($T_к$) все куперовские пары распадаются и состояние сверхпроводимости исчезает. Аналогичный результат наблюдается при определенном значении магнитного поля (критической напряженности $H_{кр}$ или критической индукции $B_{кр}$), которое может быть создано как собственным током, так и посторонними источниками. Критическая температура и критическая напряженность магнитного поля являются взаимосвязанными величинами. Эта зависимость для чистых металлов может быть приближенно представлена следующим выражением:

$$H_{кр} = H_0(1 - T_{кр}/T_0)^2,$$

где H_0 — критическая напряженность магнитного поля при абсолютном нуле; T_0 — критическая температура при отсутствии магнитного поля.

Следовательно, если идеальный сверхпроводник поместить в магнитное поле, то некоторой температуре $T_{кр1} < T_0$ будет соответствовать вполне определенное значение критической напряженности магнитного поля $H_{кр1}$. При $H > H_{кр1}$ и температуре $T_{кр1}$ сверхпроводящее состояние исчезает.

В настоящее время известно 35 сверхпроводниковых металлов и более тысячи сверхпроводниковых сплавов и химических соединений различных элементов.

Установлены также сверхпроводящие свойства у некоторых полупроводников (например, антимонида индия InSb), серы, ксенона и пр. В то же время для многих проводниковых материалов, таких, как серебро, медь, золото, платина и др., даже при очень низких температурах достичь сверхпроводящего состояния пока не удалось. Некоторые из сверхпроводниковых материалов, представляющих практический интерес, представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Сверхпроводники	Критическая температура, °С	Критическая индукция, Тл
Элементарные:		
иридий	−272,86	0,002
алюминий	−271,80	0,010
олово	−269,30	0,031
индий	−269,60	0,030
ртуть	−268,80	0,046
тантал	−268,50	0,083
ванадий	−267,70	0,130
свинец	−265,80	0,080
ниобий	−263,60	0,195
Сложные:		
сплав 50%	−264,30	12,000
сплав 50%	−263,50	11,000
Соединения:		
галлид ванадия	−259,00	50,000
станнид ниобия	−255,0	22,000

По физико-химическим свойствам элементарные сверхпроводники (чистые металлы) можно разделить на две группы: «мягкие» — Hg, Sn, Pb, In; «жесткие» — Ta, Ti, Zr, Nb.

Для мягких сверхпроводников характерны низкие температуры плавления и отсутствие внутренних механических напряжений, в то время как жесткие сверхпроводники отличаются наличием значительных внутренних напряжений.

С позиций термодинамики сверхпроводниковые материалы принято делить на сверхпроводники первого, второго и третьего рода.

Для сверхпроводников первого рода характерны скачкообразное изменение удельной теплоемкости и вполне определенная температура перехода в сверхпроводящее состояние, которое может разрушиться уже при малых критических температурах и напряженности магнитного поля около 1 кА/м, что затрудняет их практическое использование. У таких материалов наблюдается эффект Майснера–Оксенфельда, заключающийся в том, что при переходе образца в сверхпроводящее состояние магнитное поле выталкивается из него, т. е. он становится идеальным диамагнетиком.

Сверхпроводники второго рода отличаются тем, что переход в сверхпроводящее состояние у них осуществляется не скачком, а постепенно. Для них характерны два критических значения магнитной индукции для температуры $T_{кр} < T_0$. Если магнитная индукция во внешнем поле начинает превосходить значение нижней критической индукции, то происходит частичное проникновение магнитного поля во всю толщину сверхпроводящего образца. При этом под действием силы Лоренца электроны в сверхпроводнике начинают двигаться по окружностям, образуя так называемые вихри. Внутри вихря скорость вращения возрастает по мере приближения к оси до тех пор, пока не достигнет критического значения и не произойдет «срыв» сверхпроводимости. По мере увеличения внешнего магнитного поля количество вихрей возрастает, а расстояние между ними сокращается. Когда оно станет соизмеримым с размером куперовской пары, практически весь объем перейдет в нормальное состояние и магнитное поле полностью проникнет в образец. К сверхпроводникам второго рода из чистых металлов можно отнести только ниобий Nb, ванадий V и технеций Te.

Сверхпроводники третьего рода включают в себя неидеальные сверхпроводники второго рода (жесткие сверхпроводники). Для них характерно наличие крупных неоднородностей, возникающих при выделении другой фазы или пластичном деформировании. Дефекты структуры могут служить узлами закрепления вихрей (явление «пиннинга»), что значительно повышает допустимые токи. Так, например, по проволоке из станнида ниобия Nb_3Sn в полях с индукциями около 10 Тл можно пропускать ток с плотностью выше 10^9 А/м^2. При частотах не более 10 кГц потери в этих материалах носят гистерезисный характер и не зависят от формы тока. На частотах 10–100 Гц кристаллическая плотность переменного тока мало зависит от частоты и по амплитуде приближается к критической плотности постоянного тока. К сверхпроводникам третьего рода относятся в основном сплавы и химические соединения.

Высокотемпературные сверхпроводники. В 1986 г. было обнаружено, что такие вещества, как $La_{2-x}M_xCuO_4$ (M — Ba, Sr), переходят в сверхпроводящее состояние при температуре, близкой к температуре жидкого азота. Позже в системах $YBa_2Cu_3O_7$ переход в сверхпроводящее состояние наблюдался при −173 °С и выше. Такие вещества, названные *высокотемпературны-*

ми *сверхпроводниками*, обладают структурой типа перовскита (природный минерал $CaTiO_3$) и представляют керамику с характерным расположением атомов. Получают такие материалы путем спекания тонкоизмельченной смеси оксидов иттрия, меди с карбонатом бора. Полученный таким способом образец сверхпроводящей керамики состоит из двух фаз (соединений). Однако фаза изумрудно-зеленого цвета, прозрачная и содержит ионы иттрия, бария и меди в соотношении 2 : 1 : 1. Другая фаза черного цвета, непрозрачная, содержит большее количество меди. Соотношение иттрия, бария и меди в ней 1 : 2 : 3. Именно эта фаза и обладает сверхпроводящими свойствами.

Сверхпроводящие свойства Y—Ba—Cu—O системы зависят от соотношения двухвалентной и трехвалентной меди Cu^{2+}/Cu^{3+}; изменяя это соотношение можно регулировать сверхпроводящие свойства. К настоящему времени получены сверхпроводники, имеющие температуру перехода от —168 °С до —163 °С и плотность тока в сверхпроводящем состоянии до 10^4 А/см², что несколько меньше, чем для металлических «традиционных» сверхпроводников.

Ведется поиск новых материалов, обладающих большей плотностью тока и более высокой температурой перехода в сверхпроводящее состояние. Перспективными в этом отношении являются так называемые висмутовые системы с химической формулой $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$, температура перехода которых достигает —158 °С.

Сверхпроводниковые материалы получили достаточно широкое применение в различных областях науки и техники. Их используют для создания сверхсильных магнитных полей в достаточно большой области пространства; для изготовления обмоток электрических машин и трансформаторов, обладающих малой массой и габаритами, но очень высоким КПД; сверхпроводящих кабелей для мощных линий передачи энергии; волноводов с очень малым затуханием; мощных накопителей электрической энергии; устройств памяти и управления. Эффект Майснера—Оксенфельда, наблюдаемый в сверхпроводниках, используется для создания опор без трения и вращающихся электрических машин с КПД, равным почти 100 %. Явление «сверхпроводящего подвеса» (левитации) применяется в гироскопах и в поездах сверхскоростной железной дороги и т. д.

К р и о п р о в о д н и к и. К их числу относятся материалы, которые при глубоком охлаждении (ниже —173 °С) приобретают высокую электрическую проводимость, но не переходят в сверхпроводящее состояние. Это объясняется тем, что при низкой температуре удельное сопротивление проводника обусловлено, как правило, наличием примесей и физическими дефектами решетки. Поскольку составляющая удельного сопротивления, обусловленная рассеиванием энергии за счет тепловых колебаний решетки, пренебрежимо мала, для криопроводников необходимо применять хорошо отожженный металл высокой чистоты, который обладает минимальным удельным сопротивлением в рабочем диапазоне температур от —240

до —190 °С. Как видно из рис. 4.8, на котором приведена температурная зависимость удельного электрического сопротивления особо чистых алюминия и меди, а также бериллия промышленной чистоты, с содержанием примесей не более 0,1 %, минимальным сопротивлением при температуре жидкого азота, самого дешевого хладагента, обладает бериллий. Однако он отличается плохой технологичностью, дорог, высокотоксичен, особенно в пылевидном состоянии. Кроме того, у бериллия сильно выражен магниторезистивный эффект. Использование алюминия в качестве криопроводящего материала более рационально, так как он более доступен, дешев и имеет низкие значения удельного электрического сопротивления в рабочем диапазоне температур. Например, алюминий марки А999, содержащий примесей не более 0,001 %, при температуре жидкого гелия имеет удельное сопротивление не более $(1 \div 2) \times 10^{-6}$ мкОм·м.

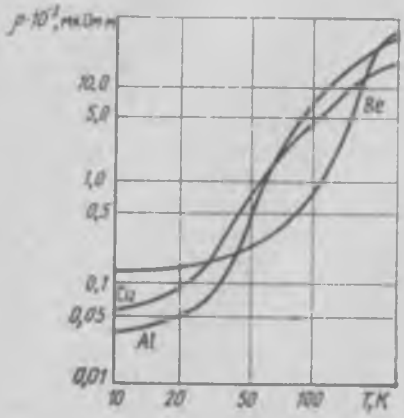


Рис. 4.8. Зависимость удельного электрического сопротивления криопроводников от температуры

Криопроводники применяются в основном для изготовления токопроводящих жил кабелей и проводов, работающих при температурах жидких водорода (—252,6 °С) неона (—245,7 °С) и азота (—195,6 °С).

Сплавы с большим удельным сопротивлением. К таким материалам относятся сплавы, имеющие при нормальных условиях удельное электрическое сопротивление не менее 0,3 мкОм·м. Эти материалы нашли достаточно широкое применение при изготовлении различных электроизмерительных и электронагревательных приборов, образцовых сопротивлений, реостатов и т. д.

Для изготовления электроизмерительных приборов, образцовых сопротивлений и реостатов применяются, как правило, сплавы, отличающиеся высокой стабильностью удельного сопротивления во времени и малым температурным коэффициентом сопротивления. К числу таких материалов относятся манганин, константан и нихром, основные параметры которых приведены в табл. 4.3.

Манганин — это медно-никелевый сплав, содержащий в среднем 2,5—3,5 % никеля (с кобальтом), 11,5—13,5 % марганца, 85,0—89,0 % меди. Содержание примесей в нем, среди которых главным является железо, не должно превышать 0,9 %. Легирование марганцем, а также проведение специальной термообработки при 400 °С, позволяет стабилизировать удельное сопротивление ман-

Таблица 4.3

Параметр	Манганин МНМц-3-12	Константан МНМц-40-1,5	Нихром Х20Н80	Нейзильбер МНЦ-15-20
Плотность при 20 °С, кг/м³	8400	8900	8400	8700
Температура плавления, °С	910—960	1200—1270	1380—1420	1080
Удельное электрическое сопротивление при 20°С, мкОм·м	0,40—0,52	0,45—0,52	1,02—1,12	0,30—0,32
Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, °С⁻¹	$(10\div25)\times10^{-6}$	$20\cdot10^{-6}$	$(110\div130)\times10^{-6}$	$36\cdot10^{-5}$
Предел прочности при растяжении, МПа	395—540	394—638	686—735	350—1100
Относительное удлинение при разрыве, %	10—15	10—20	10—18	3—30
ТермоЭДС в паре с медью, мкВ/°С	0,9—1,0	39—43	—	14,4

ганина в интервале температур от —100 до +100 °С. Манганин имеет очень малое значение термоЭДС в паре с медью, высокую стабильность удельного сопротивления во времени, что позволяет широко использовать его при изготовлении резисторов и электроизмерительных приборов самых высоких классов точности.

Константан содержит те же компоненты, что и манганин, но в несколько иных соотношениях: никель (с кобальтом) — 39—41 %, марганец — 1—2, медь — 56,1—59,1 %. Содержание примесей также должно быть не более 0,9 %. Само название сплава говорит о практической независимости его удельного электрического сопротивления от температуры, поскольку абсолютное значение коэффициента удельного сопротивления этого сплава не превышает $2\cdot10^{-6}$ °С⁻¹. По нагревостойкости константан превосходит манганин, что позволяет использовать его в реостатах и нагревательных элементах, работающих при температуре до 500 °С. Высокие механические характеристики, сочетающиеся с пластичностью, позволяют изготовлять из этого сплава тончайшую проволоку, ленты, полосы и фольгу. Высокое значение термоЭДС в паре с медью и железом исключает применение константана в электроизмерительных приборах высокой точности, но с успехом используются при изготовлении термопар. Следует отметить также, что наличие в составе константана достаточно большого количества дорогого и дефицитного никеля ограничивает его использование в изделях массового производства.

Нихромы — сплавы на основе железа, содержащие в зависимости от марки 15—25 % хрома, 55—78 % никеля, 1,5 % мар-

ганца. Они в основном применяются для изготовления электронагревательных элементов, так как обладают хорошей стойкостью при высокой температуре в воздушной среде, что обусловлено близкими значениями температурных коэффициентов линейного расширения этих сплавов и их оксидных пленок. Длительность работы электронагревательных элементов из нихрома существенно повышается при исключении доступа кислорода к поверхности проволоки. Нихромы имеют высокую технологичность, легко протягиваются в тонкую проволоку или ленту. Значительное содержание никеля в составе нихромов обусловливает их повышенную стойкость и ограничивает области применения.

В некоторых случаях для изготовления реостатов, контактных пружин и других электротехнических изделий применяется медно-никелевый сплав нейзильбер МНЦ-15-20, в составе которого 18—22 % цинка, 13,5—16,5 % никеля (с кобальтом) и остальное — медь. Содержание в нем различных примесей не должно превышать 0,9 %.

Нейзильбер, внешне напоминающий серебро (чем и объясняется его название), имеет очень высокие (табл. 4.3) механические характеристики, пластичен, но удельное электрическое сопротивление его меньше, чем у других сплавов. Он имеет высокую коррозионную стойкость и благодаря значительному содержанию цинка в своем составе — меньшую стоимость по сравнению с константаном.

Среди сплавов высокого сопротивления, которые, помимо нихрома, широко используются для изготовления различных нагревательных элементов, необходимо отметить жаростойкие сплавы фехрали и хромали. Они относятся к системе Fe—Cr—Al и содержат в своем составе 0,7 %марганца, 0,6 % никеля, 12—15 % хрома 3,5—5,5 % алюминия и остальное — железо. Эти сплавы отличаются высокой стойкостью к химическому разрушению поверхности под воздействием различных газообразных сред при высоких температурах. Имеют удовлетворительные технологические свойства и хорошие механические характеристики (табл. 4.4), что позволяет достаточно легко получать из них проволоку, ленты, прутки и другие полуфабрикаты, которые способны свариваться и выдерживать большие механические нагрузки при высокой температуре без существенных деформаций.

Для обозначения марок хромалюминиевых сплавов используется традиционная система из букв и чисел, отличающаяся только тем, что для обозначения алюминия используется буква Ю. Так, обозначение Х23Ю5 соответствует сплаву с содержанием 23 % хрома и 5 % алюминия.

Сплавы для термопар. Для термопар, принцип действия которых изложен ранее, наиболее широко применяются следующие сплавы: копель (56 % Cu и 44 % Ni), алюмель (95 % Ni, остальное — Al, Si и Mr), хромель (90 % Ni и 10 % Cr), платинородий (90 % Pt

Таблица 4.4

Марка сплава	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м³	Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, мкОм·м	Температурный удельный коэффициент электрического сопротивления $\times 10^{-4}$, °С	Предел прочности при растяжении, мПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Рабочая температура, °С не более
Х13Ю4	1500	7300	1,18—1,34	100—120	700	20	900
Х23Ю5	1500	7250	1,30—1,40	65	800	10—15	1200

и 10 % Rh), константан (60 % Cu и 40 % Cr). Материалы, образующие термопару, подбираются таким образом, чтобы в диапазоне измеряемых температур они обладали максимальным значением термоЭДС. При этом погрешность в определении температуры существенно снижается. Согласно этому условию, для измерения температур могут применяться следующие термопары: медь — константан и медь—копель (до 350 °С); железо—константан, железо—копель и хромель—копель (до 600 °С); хромель—алюмель (до 900—1000 °С); платинородий—платина (до 1600 °С).

Знак термоЭДС у термопар зависит от направления тока в холодном и горячем спаях. Принято считать, что в холодном спае ток идет от первого названного в паре материала ко второму (т. е. от хромеля к копелю, от платинородия к платине), а в горячем спае — наоборот.

Следует отметить также, что некоторые полупроводниковые материалы (например, тройной сплав Bi—Sb—Zn) тоже обладают значительными коэффициентами термоЭДС, что позволяет с успехом использовать их для изготовления термоэлементов, термогенераторов, холодильных устройств и пр.

Контактные материалы. *Электрическим контактом* называют поверхность соприкосновения токоведущих частей электротехнических устройств, а также конструктивные приспособления, обеспечивающие такой контакт. По принципу работы контакты разделяются на неподвижные, разрывные и скользящие.

К неподвижным контактам относятся цельнометаллические (сварные или паяные) зажимные (болтовые, винтовые) соединения. Цельнометаллические соединения должны отличаться не только механической прочностью, но и обеспечивать стабильный электрический контакт с малым переходным сопротивлением.

Качество зажимного контакта определяется в основном контактным давлением и способностью материала к пластической деформации. В связи с этим такие контактные поверхности целесообразно

покрывать мягкими коррозионно-стойкими металлами (оловом, серебром, кадмием и др.).

Разрывные контакты обеспечивают периодическое замыкание и размыкание электрической цепи. Более ответственная их функция предопределяет и более строгие требования к ним: устойчивость против коррозии, стойкость к свариванию и действию электрической эррозии, стойкость к действию сжимающих и ударных нагрузок, высокие проводимость и теплофизические свойства, хорошая технологичность и способность прирабатываться друг к другу.

В качестве контактных материалов для слаботочных разрывных контактов помимо чистых тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена) применяются благородные металлы (платина, золото, серебро), а также различные сплавы на их основе (золото—серебро, платина—рутений, платина—родий) металлокерамические композиции (например, Ag—CdO).

Сильноточные разрывные контакты изготовляются, как правило, из металлокерамических материалов, которые получаются методом порошковой металлургии и включают в себя композиции на основе меди и серебра: серебро—оксид кадмия, серебро—оксид меди, медь—графит, серебро—никель, серебро—графит. Используются также и тройные композиции: серебро—никель—графит, серебро—вольфрам—никель, медь—вольфрам—никель. Медная и серебряная фазы в этих композициях обеспечивают высокую электро- и теплопроводность контакта, а включения тугоплавкой фазы придают контактам стойкость к механическому износу, электрической эрозии и свариваемости.

Для изготовления сильноточных контактов, работающих при повышенных напряжениях и контактных давлениях, способных пробить или разрушить механическим путем оксидную пленку на контактной поверхности, рекомендуется использовать твердую медь, что значительно удешевляет электротехническое устройство.

Скользящие контакты должны дополнительно отличаться высокой стойкостью к истирающим нагрузкам, которые особенно велики при сухом трении, т. е. когда оба контакта изготовлены из одного материала, а также при неудачном выборе пар. Наиболее высокими качествами обладают контактные пары, составленные из металлического и графитсодержащего материалов. Помимо низкого коэффициента трения графит и материалы на его основе отличаются большим напряжением дугообразования, поэтому износ контактов от искрения незначителен. Кроме того, на поверхности графита не образуются оксидные пленки и контакт имеет линейную вольт-амперную характеристику.

Широкое применение для изготовления скользящих контактов нашли также проводниковые бронзы и латуни, отличающиеся высокой механической прочностью, стойкостью к истирающим нагрузкам, упругостью, антифрикционными свойствами и стойкостью

к атмосферной коррозии (например, ЛС59-1, ЛМц58-2, БрКд1, БрБ2 и т. д.).

Для изготовления коллекторных пластин часто используются твердая медь, а также медь, легированная серебром, и другие материалы.

Металлокерамика нашла достаточно широкое применение в электротехнике. Как уже отмечалось выше, этот материал применяется для изготовления контактов круглой, прямоугольной и сложной формы методом порошковой металлургии. Композиции получаются путем трехфазного спекания спрессованных из порошков заготовок либо путем пропитки серебром или медью предварительно опрессованных пористых каркасов из вольфрама или вольфрамоникелевого сплава. Удельное электрическое сопротивление металлокерамических контактов должно быть не более 0,07 мкОм·м при 20 °С, отличаться высокой стабильностью во времени и малой зависимостью от условий эксплуатации.

Хорошие магнитные свойства некоторых металлокерамических композиций позволили их использовать для изготовления постоянных магнитов методом прессования порошка, состоящего из измельченных тонкодисперсных магнитотвердых сплавов, с последующим спеканием при высоких температурах. В результате такой технологии изделия получаются достаточно точных размеров и не требуют дальнейшей обработки. Металлокерамические магниты имеют высокую механическую прочность, но пониженные магнитные свойства по сравнению с литыми магнитами, что обусловлено в основном большим содержанием (до 30 %) немагнитного связующего вещества.

Отечественная промышленность выпускает одиннадцать марок металлокерамических магнитов (МК1—МК11), у которых коэрцитивная сила может быть 24—128 кА/м, остаточная индукция 0,48—1,1 Тл, а запасенная магнитная энергия не более 3—16 кДж/м³. Экономическая эффективность металлокерамических композиций, обладающих магнитными свойствами, существенно возрастает при массовом автоматизированном производстве магнитов небольших размеров и сложной формы.

Электротехнический уголь относится к твердым неметаллическим проводниковым материалам, и сырьем для его производства могут служить сажа, графит, антрацит. Для получения монолитного изделия используются связующее вещество (каменноугольная смола или жидкое стекло) и обжиг при высоких температурах (800—3000 °С). Режим обжига определяет в основном форму, в которой углерод будет находиться в изделии. При высоких температурах (2000—3000 °С) происходит переход углерода в форму графита, поэтому такой процесс получил название *графитирование*.

Электротехнический уголь широко применяется для изготовления щеток электрических машин; электродов для прожекторов, дуговых электрических печей и электролитических ванн; анодов галь-

ванических элементов. Угольные порошки, изготовленные из антрацита, используются в микрофонах для создания сопротивления, значение которого изменяется в зависимости от приложенного к нему давления.

Используется уголь также и при изготовлении непроволочных высокоомных резисторов, различных разрядников для телефонных сетей, электровакуумных приборов.

Композиции на основе сажи и графита используются для экранирования жил силовых кабелей, добавляются в состав резиновых смесей для повышения механических характеристик резин, а также стойкости к световому и тепловому старению, некоторым агрессивным средам.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются проводниковые материалы?
2. Каковы основные характеристики проводниковых материалов?
3. В чем заключается сущность явления сверхпроводимости и какие материалы применяются для изготовления сверх- и криопроводников?
4. Какие сплавы высокого сопротивления наиболее широко применяются в электротехнике и для каких целей?
5. Для каких целей используются материалы на основе благородных и неблагородных металлов?

ГЛАВА 5. ФИЗИКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

§ 5.1. Общие сведения

Диэлектриками называют вещества, основным электрическим свойством которых является способность поляризоваться в электрическом поле. В газообразных, жидких и твердых диэлектриках электрические заряды прочно связаны с атомами, молекулами или ионами и в электрическом поле могут лишь смещаться. Происходит разделение центров положительного и отрицательного зарядов, т. е. поляризация. Используемые на практике диэлектрики содержат и свободные заряды, которые, перемещаясь в электрическом поле, обусловливают электропроводность, способность диэлектрика пропускать постоянный электрический ток. Однако количество таких свободных зарядов в диэлектрике невелико, а поэтому весьма мал и ток. Следовательно, для диэлектрика характерным является весьма большое сопротивление прохождению постоянного тока.

Диэлектрическими материалами называют класс электротехнических материалов, предназначенных для использования их диэлектрических свойств (оказывать большое сопротивление прохождению электрического тока и способность поляризоваться).

Электроизоляционными материалами называют диэлектрические материалы, предназначенные для создания электрической изо-

ляции токоведущих частей в электротехнических и радиоэлектронных устройствах. Электрическая изоляция является неотъемлемой частью электрической цепи и прежде всего нужна для того, чтобы не пропускать ток по не предусмотренным электрической схемой путям.

Используемые в качестве электроизоляционных материалов диэлектрики называются *пассивными* диэлектриками. В настоящее время широко применяются так называемые *активные* диэлектрики, параметры которых можно регулировать изменяя напряженность электрического поля, температуру, механические напряжения и другие параметры воздействующих на них факторов. Например, конденсатор, диэлектрическим материалом в котором служит пьезоэлектрик, под действием приложенного переменного напряжения изменяет свои линейные размеры и становится генератором ультразвуковых колебаний. Емкость электрического конденсатора, выполненного из нелинейного диэлектрика — сегнетоэлектрика, изменяется в зависимости от напряженности электрического поля; если такая емкость включена в колебательный LC-контур, то изменяется и его частота настройки.

Техника, технология и эксплуатация электротехнического и радиоэлектронного оборудования предъявляют самые разнообразные требования к свойствам диэлектрических материалов. Помимо нужных электрических свойств диэлектрические материалы должны обладать еще механическими, термическими и многими другими физико-механическими свойствами, которые рассмотрены в настоящем разделе.

§ 5.2. Электропроводность диэлектриков

Практически используемые диэлектрики содержат в своем объеме небольшое количество свободных зарядов, которые перемещаются в электрическом поле. Поэтому диэлектрики на постоянном напряжении пропускают весьма малый ток. Этот ток называют сквозным током утечки.

Удельная проводимость и удельное сопротивление. На рис. 5.1 схематически изображен участок твердой изоляции с расстоянием между электродами *1* и *2h* (м) и сечением $S = bl$ (м²), по которому протекает сквозной ток утечки $I_{из}$ (А). Ток $I_{из}$ складывается из объемного тока утечки I_v, протекающего через объем, и поверхностного тока утечки I_s, протекающего по поверхности изоляции от электрода *1* к *2*. Если к электродам приложено напряжение U (В), то проводимость $G_{из}$ (См) такого участка изоляции равна $G_{из} = I_{из}/U$. Величина, обратная $G_{из}$, называется сопротивлением изоляции: $R_{из} = 1/G_{из}$ (Ом).

Для твердых диэлектриков ток I_v определяет величину объемной G_v, а ток I_s — поверхностной G_s проводимости изоляции, а соответственно объемное R_v и поверхностное R_s сопротивления.

Электропроводность диэлектрика характеризуют параметрами: удельной объемной σ_v и поверхностной σ_s проводимостью или удельным объемным ρ_v и поверхностным ρ_s сопротивлением. Если объемное сопротивление изоляции (рис. 5.1) равно $R_г$, то $\rho_v = R_г S/h$. Приняв, что рассматриваемый участок имеет форму куба, где $h = b = l = 1$ (м), получим, что ρ_v имеет размерность Ом·м, а объемная проводимость σ_v — — См·м$^{-1}$.

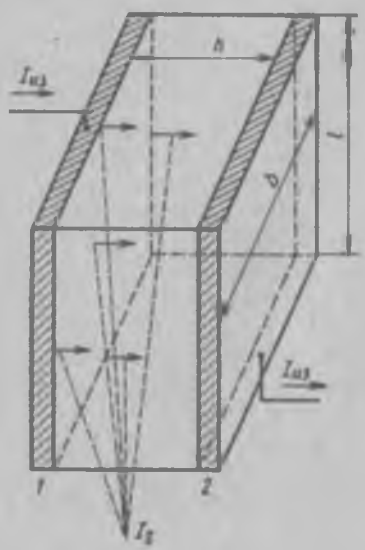


Рис. 5.1. Объемный I_v и поверхностный I_s токи утечки через участок изоляции

Поверхностный ток утечки I_s протекает по участку диэлектрика длиной h от электрода 1 к 2, периметр которых равен $p = 2(l + b)$. Поэтому удельное поверхностное сопротивление равно $\rho_s = p/h$ (Ом), а проводимость σ_s (См).

Для газообразных и жидких диэлектриков поверхностное сопротивление и проводимость не определяются.

Для определения удельного объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков используют трехэлектродную схему их включения в измерительную схему (рис. 5.2, *а* — *в*). На образце твердого диэлектрика ОД выполняются электроды: высоковольтный электрод ВЭ с диаметром d_4 и измерительный ИЭ с диаметром d_1, имеющие вид диска, круга; охранный электрод ОЭ в виде кольца с внутренним d_2 и наружным d_3 диаметрами. Зазор между измерительным и охранным электродами должен быть равен (2 ± 0,2) мм. (Допускается применение электродов прямоугольной или квадратной формы.)

Электродами могут служить массивные металлические нажимные электроды, изготовленные из стали, меди или латуни. Применяют также графитовые электроды в виде жидкой водной суспензии порошка графита. Используются электроды из осажденных металлов — меди, алюминия, серебра, золота, платины; их наносят распылением металла в вакууме, либо шоопированием, либо нанесением кистью клея, содержащего порошок металла; для керамических диэлектриков электроды изготовляются путем нанесения различных видов серебряных паст с последующим вжиганием. Широко используются фольговые электроды. Их изготовляют из отожженной алюминиевой, оловянной или свинцовой фольги толщиной от 5 до 20 мкм. На поверхность вырезанного из фольги электрода наносят тонкий слой

вазелина и тщательно протирают к поверхности образца диэлектрика.

При измерении ρ_v образец включается по схеме, показанной на рис. 5.2, *а*. Объемный ток I_v протекает через диэлектрик от ВЭ к ИЭ, по «трубке» с поперечным сечением $\pi d_1^2/4$ и длиной h. Для измерения тока может быть использован гальванометр *Г*, снабженный шунтом $R_ш$. Если на электрод ВЭ подано напряжение U (В).

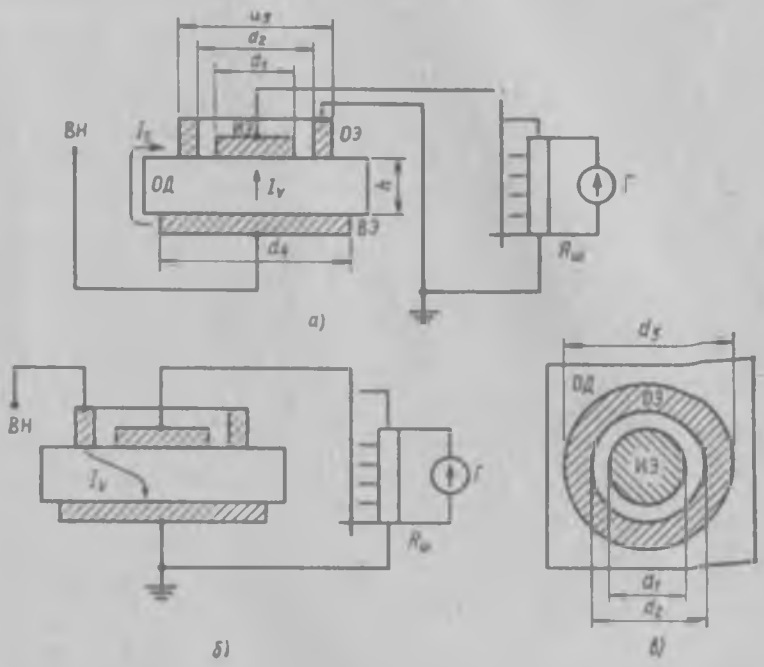


Рис. 5.2. Схема включения образца диэлектрика при измерении объемного и поверхностного сопротивлений на постоянном токе

а измеренный гальванометром ток равен I (А), то сопротивление образца равно $R_v = U/I$. Тогда ρ_v рассчитывается по формуле

$$\rho_v = R_v \pi d_1^2/(4h). \quad (5.1)$$

В ходе измерений от ВЭ к ИЭ по поверхности образца протекает поверхностный ток I_s, который может быть равен или даже больше объемного тока утечки. Для того чтобы этот ток не измерялся гальванометром, в схеме и предусмотрен заземленный ОЭ (охранное кольцо). Поверхностный ток утечки через ОЭ отводится на землю и поэтому не измеряется гальванометром. Кроме того, ОЭ выравнивает электрическое поле у края ВЭ, что обеспечивает постоянство сечения «трубки», по которой протекает объемный ток утечки.

Измерение ρ_s производится по схеме, показанной на рис. 5.2, *б*. Высокое напряжение подается на ОЭ. Поверхностный ток I_s протекает от внутренней кромки ОЭ — окружности с диаметром d_2 — по поверхности образца к кромке ИЭ — окружности с диаметром d_1. Можно принять, что длина участка, по которому протекает поверхностный ток, равна $(d_2 - d_1)/2$, а ширина определяется средним диаметром $d_{ср} = (d_2 + d_1)/2$ и равна $\pi (d_2 + d_1)/2$. Если измеренное поверхностное сопротивление равно R_s, то

$$\rho_s = R_s \pi (d_2 + d_1)/(d_2 - d_1). \qquad (5.2)$$

Объемный ток утечки I_v через заземленный ВЭ отводится на землю и не попадает в гальванометр.

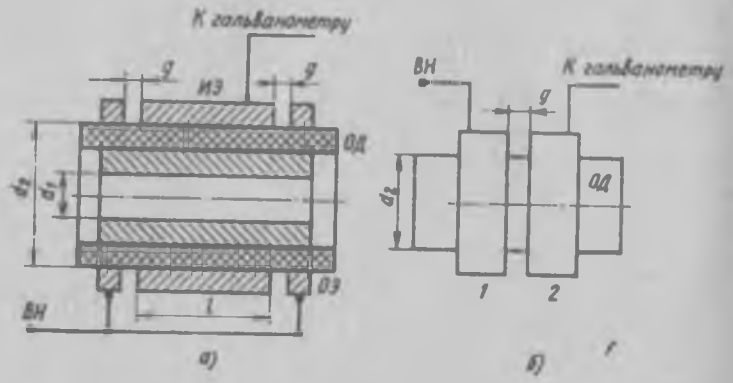


Рис. 5.3. Расположение электродов на трубчатом (*а*) и цилиндрическом (*б*) образцах

Если образцы диэлектриков имеют трубчатую форму, то электроды выполняются цилиндрическими (рис. 5.3, *а*). Для образцов имеющих форму стержня, используют кольцевые электроды *1* и *2* (рис. 5.3, *б*). Зазор *g* между ИЭ и ОЭ, а также между электродами *1* и *2* должен быть равен (2 ± 0,2) мм. Удельное объемное сопротивление рассчитывают по измеренному R_v для трубчатого образца по формуле

$$\rho_v = R_v l \rho (d_2 + d_1)/(d_2 - d_1). \qquad (5.3)$$

Удельное поверхностное сопротивление рассчитывают по измеренному R_s:

для трубчатого образца

$$\rho_s = R_s 2\pi d_2/g; \qquad (5.4)$$

для стержневого образца

$$\rho_s = R_s \pi d_2/g. \qquad (5.5)$$

При определении ρ жидких диэлектриков используются измерительные ячейки, представляющие собой металлические сосуды, изготовленные из нержавеющей стали, меди, латуни или других материалов. В сосудах расположены необходимые для измерения электроды.

При подаче на испытуемый образец постоянного напряжения через диэлектрик протекают сквозной ток утечки и ток абсорбции. Ток абсорбции вызывается процессом установления медленных видов поляризации и спадает со временем [см. (5.3)]. В большинстве диэлектриков ток абсорбции спадает за время, много меньшее 60 с. Поэтому измерение сопротивления образца производят после выдержки его под напряжением в течение 1 мин, фиксируя отклонение гальванометра. Если время спадания тока абсорбции в диэлектрике превышает 1 мин, то в технических условиях на порядок измерения его удельного сопротивления оговаривается время выдержки его под напряжением перед измерением величины сопротивления.

Физическая природа электропроводности диэлектриков. Удельная проводимость определяется числом носителей заряда n ($м^{-3}$) в единице объема вещества, зарядом q (Кл) и подвижностью μ ($м^2/В \cdot с$) носителя заряда:

$$\sigma = nq\mu. \tag{5.6}$$

Подвижность заряда — отношение скорости v (м/с), упорядоченного перемещения заряда в электрическом поле к напряженности E (В/м), электрического поля: $\mu = v/E$.

В диэлектриках свободными зарядами, которые перемещаются в электрическом поле и обусловливают электропроводность, могут быть ионы (положительные и отрицательные), молионы (в жидких диэлектриках), электроны и электронные вакансии (дырки), поляроны. Такие свободные заряды образуются за счет нагрева диэлектрика, в результате которого происходит термическая диссоциация частиц, при воздействии на диэлектрик света или при его ионизирующем (радиационном) облучении. В сильных электрических полях возможна инжекция зарядов (электронов, дырок) в диэлектрик из металлических электродов; заряды (ионы) могут инжектироваться в диэлектрик, если электродами служат вода или другая жидкость — электролиты, в которых имеются свободные положительные или отрицательные ионы; наконец, в сильных электрических полях свободные заряды (ионы и электроны) образуются в диэлектрике в результате ударной ионизации, когда свободные заряды, главным образом электроны, ускоряются в электрическом поле и приобретают энергию, которая достаточна, чтобы при соударении такого ускоренного электрона с молекулой или атомом вещества произошла их ионизация.

В жидких диэлектриках в процессе эксплуатации под действием электрического поля и теплоты происходят химические процессы,

в результате которых продукты окисления образуют в жидкости твердые частицы коллоидного размера (диаметр частицы 10^{-6} м). Такие твердые частицы попадают в жидкость и тогда, когда в ней размещены устройства с органической изоляцией и происходит постепенное разрушение изоляции; наконец, в жидкость попадают пыль и влага из воздуха. Частицы на свою поверхность адсорбируют (собирают) имеющиеся в жидкости ионы и поэтому заряжаются. Если диэлектрическая проницаемость вещества, из которого состоит частица, больше диэлектрической проницаемости жидкости, то она заряжается положительно. В противном случае на частице собираются отрицательные ионы. Такая заряженная частица называется *молионом*. В электрическом поле она перемещается к электродам, где обменивается с ним зарядом, нейтрализуется и оседает на электродах.

Положительно заряженные ионы называют *катионами* потому, что они перемещаются в электрическом поле к катоду, отрицательные — *анионами*, они перемещаются к аноду. Вблизи электродов происходит обмен зарядами между электродами и ионами, ионы нейтрализуются и на электродах выделяются продукты нейтрализации — металлы или газы.

Процесс электропроводности, обусловленный перемещением ионов или молионов, связан с переносом вещества — ионов, молионов. Поэтому при постоянном напряжении с течением времени концентрация таких заряженных частиц в объеме диэлектрика уменьшается, изменяются протекающий ток и удельная проводимость диэлектрика. Это явление используют для электроочистки, где нежелательные примеси в диэлектрике, диссоциирующие на ионы, удаляются из диэлектрика в результате процесса электропроводности на постоянном напряжении. Явление молионной электропроводности в жидких диэлектриках используют для получения тонких диэлектрических слоев на поверхности металлических деталей. Такие слои образуются при осаждении коллоидных заряженных частиц диэлектрика на электродах, которыми служат изолируемые детали, помещенные в жидкий диэлектрик, содержащий коллоидные частицы осаждаемого диэлектрического материала.

Электронная электропроводность может наблюдаться в газообразных, жидких и твердых диэлектриках. Она становится преобладающей в сильных электрических полях. Процесс электронной электропроводности кристаллических твердых диэлектриков объясняют на основе представлений зонной теории электропроводности твердых тел.

В диэлектриках ширина запрещенной зоны $\Delta E = 3 \div 7$ эВ. Энергию, достаточную для перехода в зону проводимости, электроны могут приобрести за счет нагрева либо при облучении диэлектрика светом, квантами, энергия которых больше ширины запрещенной зоны, либо при помещении диэлектрика в сильное электрическое поле. Наконец, электроны могут инжектироваться в диэлек-

трик из металла электродов. В последующем электрон перемещается в кристалле в зоне проводимости, обусловливая электронную электропроводность.

В слабых электрических полях электронная электропроводность незначительна. Свободные электроны, которые попадают в диэлектрик, поляризуют некоторую окружающую их область диэлектрика. В результате вокруг электрона кристаллическая решетка искажается. Говорят, что вокруг электрона имеет место «шуба», состоящая из поляризованной области диэлектрика. Электрон, окруженный поляризованной областью, называют *поляроном*. Если электроны перемещаются в электрическом поле, то перемещается и «шуба», т. е. перемещается полярон. А это во много раз повышает эффективную массу электрона и скорость упорядоченного движения электрона уменьшается. Поэтому проводимость за счет такого механизма перемещения электрона невелика.

В газообразных и жидких диэлектриках электроны связываются с молекулами, образуются отрицательно заряженные комплексы, которые перемещаются в электрическом поле. В слабых электрических полях подвижность таких носителей зарядов невелика, поэтому электронная проводимость мала.

Электропроводность газообразных диэлектриков. В слабых электрических полях удельная проводимость газов весьма мала. Например, удельное объемное сопротивление воздуха при нормальных условиях равно 10^{18} Ом·м. Ток в этих условиях возникает в результате перемещения свободных ионов и электронов, которые образуются под действием ионизирующих излучений земной коры, космических лучей, ультрафиолетового излучения солнца, нагрева. Такие факторы ионизации называют внешними факторами. Наряду с ионизацией в газе происходит рекомбинация, возникающая вследствие объединения положительных ионов и электронов, совершающих хаотическое непрерывное тепловое движение. В результате рекомбинаций образуются молекулы газа, не имеющие заряда.

В электрическом поле часть из образовавшихся ионов уносится к электродам и там нейтрализуется. Этот процесс определяет плотность тока j, которая растет при увеличении E по закону Ома (рис. 5.4, участок *1*).

В поле E_1 все заряженные частицы, которые образуются в диэлектрике под действием внешних ионизаторов, уносятся электрическим полем к электродам, не рекомбинируя, а ток, протекающий через диэлектрик, достигает насыщения (рис. 5.4, участок *2*). Ток насыщения зависит от расстояния h между электродами в конденсаторе. Например, в воздухе при нормальных условиях при $h = 0{,}01$ м напряженность $E_1 = 0{,}6$ В/м, плотность тока $j_{нас} = 6 \cdot 10^{-16}$ А/м²; при $h = 0{,}1$ м — соответственно 6,0 В/м и $6 \cdot 10^{-14}$ А/м². Рабочие напряженности в диэлектрике намного боль-

ше, следовательно, газовый диэлектрик практически всегда работает в условиях насыщения.

При напряженностях, больших $E_и$, в газах начинается процесс ударной ионизации (рис. 5.4, участок *3*). Образующиеся под действием внешних ионизаторов заряженные частицы ускоряются в электрическом поле и на длине свободного пробега приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа. Плотность заряженных частиц увеличивается, ток растет, что приводит к пробою газового промежутка. Для воздуха при нормальных условиях процесс ударной ионизации наступает при $E_и = 10^6$ В/м.

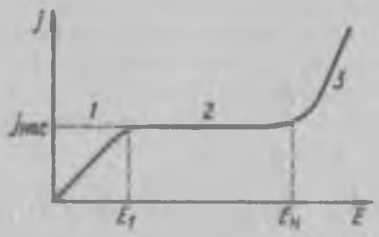


Рис. 5.4. Зависимость плотности тока от напряженности для конденсатора с газообразным диэлектриком

Если в газообразном диэлектрике содержатся взвешенные частицы — примеси или специально введенные малых размеров частицы смол, пластмасс, измельченных керамик, мельчайшие капельки жидких диэлектриков, то образующиеся в результате ионизации молекул газа ионы и электроны оседают на поверхности частиц, заряжают их. Заряженные частицы перемещаются в электрическом поле, и ток, протекающий через такой диэлектрик, становится большим. Такой процесс используют в технологии нанесения на различные детали и конструкции электроизолирующих слоев под действием электрического поля.

Электропроводность жидких диэлектриков. В неполярных жидких диэлектриках диссоциация молекул на ионы незначительна, поэтому число носителей заряда в единице объема невелико и проводимость мала. Источником ионов в неполярной жидкости могут быть примеси — влага, различные полярные жидкости, частицы твердых веществ, молекулы которых диссоциируют на ионы. В таких случаях проводимость жидкости называют примесной. Молекулы полярных жидкостей диссоциируют на ионы в большей степени, поэтому их проводимость большая. Если в полярной жидкости содержится даже небольшое количество полярной примеси, то ее молекулы практически все диссоциируют, возрастает и количество диссоциировавших молекул жидкости и проводимость сильно увеличивается.

Перемещение иона в жидкости происходит следующим образом. Ион совершает тепловые колебания в положении временного закрепления с частотой $\nu = 10^{12} \div 10^{13}$ Гц. В результате ион преодолевает силы взаимодействия с соседними молекулами и перемещается, «перескакивает» в новое положение временного закрепления, которое отстоит на расстоянии, равном межмолекулярному расстоянию (10^{-10} м). Силы взаимодействия иона с молекулами принято характеризовать энергией активации, потенциальным барье-

ром, который ион преодолевает при переходе в новое положение временного закрепления. Если электрическое поле равно нулю, то такие перемещения иона равновероятны в любом из направлений. В электрическом поле перемещение становится направленным и обусловливает перенос заряда, электропроводность.

Для такого механизма перемещения иона удельная проводимость жидкого диэлектрика выражается формулой

$$\sigma = \frac{nq^2 \delta^2 \nu}{6kT} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \qquad (5.7)$$

где n — число носителей заряда в единице объема диэлектрика, м$^{-3}$; q — заряд иона, Кл; δ — межмолекулярное расстояние, м; ν —

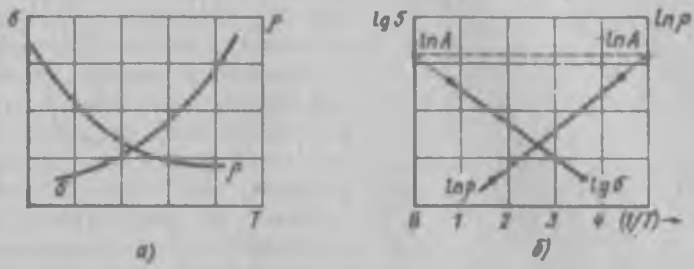


Рис. 5.5. Зависимость σ и ρ от T (*а*), lnσ и lnρ от $1/T$ (*б*) для жидкого диэлектрика

частота колебаний иона в положении временного закрепления, Гц; W — энергия активации процесса электропроводности, Дж/К.

Из (5.7) видно, что σ жидкого диэлектрика с ростом температуры увеличивается, а удельное сопротивление $\rho = 1/\sigma$ уменьшается по экспоненциальному закону (рис. 5.5, *а*). Предэкспонента с ростом температуры изменяется намного меньше, чем экспонента $\exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$. Потому графики зависимостей $\ln \rho$ и $\ln \sigma$ от обратной температуры $1/T$ представляют собой прямые линии (рис. 5.5, *б*).

На рис. 5.6 приведены зависимости ρ от температуры для некоторых жидких диэлектриков. Увеличение проводимости с ростом температуры связано с увеличением подвижности [см. (5.6)]. Подвижность увеличивается, так как растет скорость упорядоченного движения иона, что связано с уменьшением вязкости жидкости. Еще в большей степени проводимость увеличивается за счет роста числа n носителей заряда. С увеличением температуры по экспоненциальному закону растет диссоциация молекул жидкости и примесей.

Тщательно очищенные жидкие диэлектрики имеют большое удельное сопротивление. В табл. 5.1 приведены значения ρ трансформаторного масла в зависимости от разной степени очистки (по

Г. И. Сканави). В состоянии поставки технически чистые трансформаторные масла содержат в 1 м³ от 10^7 до 10^{11} микрочастиц с размером до 100 мкм, среди которых больше всего содержится частиц с размерами от 2 до 10 мкм, т. е. частиц коллоидного размера. Такие частицы абсорбируют на свою поверхность имеющиеся в жидкости ионы, заряжаются и обусловливают перенос заряда, т. е. молиоиную электропроводность. В неочищенных жидких диэлектриках ρ сильно уменьшается при увеличении температуры. Для удаления частиц загрязнений из жидкости используют специальные сита с калиброванными отверстиями, а также обрабатывают жидкости адсорбентами — специальными веществами, мелкие частички которых связываются с частичками примесей, адсорбируют их, а затем удаляются из жидкости с помощью фильтров. Далее можно производить и электроочистку жидкости.

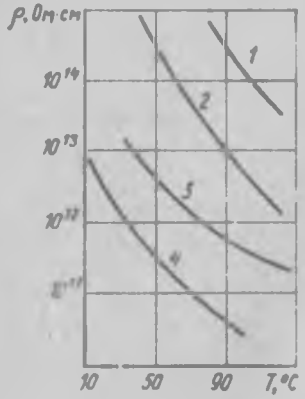


Рис. 5.6. Зависимость ρ от температуры для масел:

1 — тщательно очищенное; 2 — очищенное; 3 — промышленное; 4 — касторовое (по Г. И. Сканави)

В сильных электрических полях начиная с критической напряженности, которая обычно равна $(1 \div 5)\cdot 10^7$ В/м, в жидкости переход иона из положения временного закрепления в другое происходит не только в результате тепловых колебаний частиц, а и под влиянием электрического поля. Поэтому растет подвижность μ иона и начиная с некоторого значения плотности тока j_0 плотность тока j увеличивается по закону

$$j = j_0 \exp(a E), \tag{5.8}$$

где j_0 — плотность тока при критической напряженности; a — эмпирический коэффициент.

Таблица 5.1

Диэлектрик	Степень очистки	Температура, К (°С)	Удельное сопротивление, Ом·м
Трансформаторное масло	Нормальное, промышленное	353 (80)	$2\cdot 10^{10}$
То же	Очищенное	353 (80)	$5\cdot 10^{12}$
»	Тщательно очищенное	353 (80)	$2\cdot 10^{13}$

Кроме того, возможен рост числа носителей зарядов за счет увеличения количества диссоциировавших молекул. В сильном поле

деформация молекул становится настолько большой, что они распадаются на ионы. В этом случае ток изменяется с ростом напряженности: $j = j_0 \exp(b|\vec{E}|)$.

Наконец, в сильных полях возможно увеличение концентрации носителей заряда за счет инжекции электронов с металла электродов и ударной ионизации ускоренными электронами. Нелинейный рост плотности тока с ростом напряженности выражается формулой $j = kE^2 \exp(-p/E)$, где k и p — постоянные, характерные для данного жидкого диэлектрика.

Электропроводность твердых диэлектриков. В используемых в технике твердых диэлектриках — бумагах, картонах, лаках, эмалях, компаундах, пленках, полимерах, керамиках и стеклах, слюдах и многих других — характерной является ионная электропроводность. При нагреве или освещении, действии радиации, света, сильного электрического поля сначала ионизируются содержащиеся в таких диэлектриках дефекты и примеси. Образовавшиеся таким образом ионы определяют низкотемпературную примесную область электропроводности твердого диэлектрика. Как и в жидком диэлектрике, ионы занимают места временного закрепления и относительно слабо связаны с окружающими частицами. В результате тепловых колебаний они преодолевают потенциальный барьер W, который составляет обычно 0,5—1,0 эВ, и скачком перемещаются в другое положение. В электрическом поле такие перемещения ионов становятся направленными и они перемещаются по полю.

При большем нагреве или при более сильных других воздействиях ионизируются основные частицы, из которых построен твердый диэлектрик. Удельная проводимость изменяется с ростом температуры с большей скоростью, так как число основных ионов намного больше числа ионов, образовавшихся при ионизации дефектов или примесей. Потенциальный барьер W и энергия активации процесса электропроводности для основных ионов больше, чем для ионов и примесей. Эта область электропроводности называется высокотемпературной собственной.

Зависимость удельной проводимости твердого диэлектрика с ионной электропроводностью от температуры такая же, как и для жидкого диэлектрика. Потому (5.7) справедлива и для твердых диэлектриков. Если в твердом диэлектрике наблюдается примесная и собственная ионная электропроводность, то зависимость проводимости от температуры выражается формулой

$$\sigma = A_1 \exp\left(-\frac{W_1}{kT}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{W_2}{kT}\right),$$

где A_1, W_1 и A_2, W_2 характеризуют примесную и собственную электропроводности соответственно.

В процессе ионной электропроводности катионы и анионы обмениваются зарядами с электродами и таким образом нейтрализуются, на электродах осаждается металл, выделяются газы, собираются

частички примесей. Может наблюдаться также постепенное разрушение металлического электрода и металл диффундирует в диэлектрик. В результате близ электродов могут образовываться длинные ветвистые тончайшие металлические нити, которые называют *дендритами*, диаметр их равен нескольким микрометрам. При больших температурах рост дендритов интенсифицируется и они могут прорасти через весь образец и замкнуть электроды накоротко.

Во многих диэлектриках, используемых в электрической изоляции, величина ρ_r сильно зависит от их увлажнения. Даже малое количество влаги, поглощенное гигроскопическим образом, может существенно уменьшить его сопротивление. Молекулы воды хорошо диссоциируют на ионы, в воде растворяются частицы примесей, обычно содержащихся в технических диэлектриках: солей, остатков катализаторов, кислот, щелочей и других трудно устранимых из материала ионогенных веществ. Влага с растворенными ионогенными примесями проникает в поры и микротрещины, впитывается капиллярами, распределяется по границам раздела в многокомпонентном диэлектрике. Количество поглощенной изоляцией влаги зависит от влажности окружающего воздуха и времени выдержки образца во влажной атмосфере или в воде, если изоляция работает в контакте с водой. Процесс уменьшения ρ_r изоляции имеет обратимый характер. При высушивании поглощенная влага удаляется и ρ_r возрастает. Для предотвращения увлажнения изоляции поверхность гигроскопичных материалов защищается не смачиваемыми водой водостойкими материалами, препятствующими проникновению влаги. Например, пористые электрокерамические материалы покрываются глазурью; пористые диэлектрики пропитываются жидкими или твердеющими компонентами, которые плохо увлажняются.

Проводимость диэлектриков — полимеров — уменьшается с ростом гидростатического давления. Если образец полимера поместить в камеру, заполненную жидким диэлектриком, и увеличивать давление в камере, то при давлении $P = 0{,}1 \div 1{,}0$ МПа можно зафиксировать увеличение его сопротивления. Рост сопротивления объясняется увеличением плотности. В более плотно упакованном теле скорость упорядоченного движения такой большой частицы, как ион, меньшая.

В сильных электрических полях подвижность ионов нелинейно увеличивается с ростом напряженности. Поэтому, как и в жидких диэлектриках, в твердых ток увеличивается нелинейно с ростом напряженности электрического поля [см. (5.8)].

На поверхности токоведущих частей электротехнических устройств могут существовать технологически трудноустранимые острые выступы, кромки, близ которых вследствие неоднородности электрического поля напряженность может достигать 10^6—10^8 В/м. В таких электрических полях возможна инжекция в диэлектрик электронов с металла катода и дырок с анода в приэлектродный

слой. При толщине электрической изоляции 5 ÷ 10 мкм глубина приэлектродного слоя составляет 1—2 мкм. В органических и неорганических диэлектриках, используемых в технике, могут иметь место несовершенства структуры, такие, как примеси и дефекты. В результате образуются ловушки для электронов с глубиной 0,1—0,3 эВ. Электроны могут быть высвобождены из таких ловушек и переведены в зону проводимости нагревом, облучением светом, ионизирующим излучением, сильным электрическим полем. Такие механизмы генерации электронов и дырок обусловливают электронную электропроводность диэлектрика. Свободные электроны в сильных электрических полях могут образовываться и в результате ударной ионизации. Характерная зависимость удельного сопротивления диэлектрика с электронной электропроводностью показана на рис. 5.7. На участке *1* уменьшение ρ_r вызывается увеличением концентрации носителей заряда за счет ионизации ловушек. Этот участок называется областью примесной электропроводности. На участке *2*, где все ловушки ионизированы, увеличение сопротивления обусловливается торможением носителей заряда при их взаимодействии с совершающими тепловые колебания частицами, из которых построен диэлектрик. Наконец, на участке *3* энергия, которую получает диэлектрик при нагреве, достаточна для ионизации собственных частиц. Поэтому концентрация носителей заряда снова начинает расти, теперь уже с большей скоростью, и сопротивление снова начинает уменьшаться.

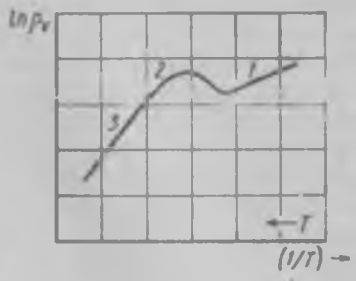


Рис. 5.7. Зависимость $\ln\rho_r$ от $1/T$ для диэлектрика с примесной электронной электропроводностью

В случае электронной электропроводности сопротивление твердых диэлектриков с увеличением давления уменьшается. Такой эффект используют как косвенное подтверждение существования в диэлектрике электронной электропроводности.

Изменение электропроводности при облучении. Электротехническое оборудование и диэлектрики, применяемые в нем, при эксплуатации на атомных электростанциях подвергаются воздействию проникающего излучения (радиации). В нормальных условиях эксплуатации действуют γ-излучения (γ-кванты различной энергии) и нейтроны. В аварийном режиме действуют γ-излучения и β-излучения (быстрые электроны, скорость которых сравнима со скоростью света). В других условиях эксплуатации возможно облучение заряженными частицами: позитронами, протонами, различными ионами и др. Проникающие излучения, передавая свою энергию (полностью или частично) частицам, из которых построен диэлек-

частички примесей. Может наблюдаться также постепенное разрушение металлического электрода и металл диффундирует в диэлектрик. В результате близ электродов могут образовываться длинные ветвистые тончайшие металлические нити, которые называют *дендритами*, диаметр их равен нескольким микрометрам. При больших температурах рост дендритов интенсифицируется и они могут прорасти через весь образец и замкнуть электроды накоротко.

Во многих диэлектриках, используемых в электрической изоляции, величина ρ_r сильно зависит от их увлажнения. Даже малое количество влаги, поглощенное гигроскопическим образом, может существенно уменьшить его сопротивление. Молекулы воды хорошо диссоциируют на ионы, в воде растворяются частицы примесей, обычно содержащихся в технических диэлектриках: солей, остатков катализаторов, кислот, щелочей и других трудно устранимых из материала ионогенных веществ. Влага с растворенными ионогенными примесями проникает в поры и микротрещины, впитывается капиллярами, распределяется по границам раздела в многокомпонентном диэлектрике. Количество поглощенной изоляцией влаги зависит от влажности окружающего воздуха и времени выдержки образца во влажной атмосфере или в воде, если изоляция работает в контакте с водой. Процесс уменьшения ρ_r изоляции имеет обратимый характер. При высушивании поглощенная влага удаляется и ρ_r возрастает. Для предотвращения увлажнения изоляции поверхность гигроскопичных материалов защищается не смачиваемыми водой водостойкими материалами, препятствующими проникновению влаги. Например, пористые электрокерамические материалы покрываются глазурью; пористые диэлектрики пропитываются жидкими или твердеющими компонентами, которые плохо увлажняются.

Проводимость диэлектриков — полимеров — уменьшается с ростом гидростатического давления. Если образец полимера поместить в камеру, заполненную жидким диэлектриком, и увеличивать давление в камере, то при давлении $P = 0{,}1 \div 1{,}0$ МПа можно зафиксировать увеличение его сопротивления. Рост сопротивления объясняется увеличением плотности. В более плотно упакованном теле скорость упорядоченного движения такой большой частицы, как ион, меньшая.

В сильных электрических полях подвижность ионов нелинейно увеличивается с ростом напряженности. Поэтому, как и в жидких диэлектриках, в твердых ток увеличивается нелинейно с ростом напряженности электрического поля [см. (5.8)].

На поверхности токоведущих частей электротехнических устройств могут существовать технологически трудноустранимые острые выступы, кромки, близ которых вследствие неоднородности электрического поля напряженность может достигать 10^5—10^8 В/м. В таких электрических полях возможна инжекция в диэлектрик электронов с металла катода и дырок с анода в приэлектродный

слой. При толщине электрической изоляции 5 ÷ 10 мкм глубина приэлектродного слоя составляет 1—2 мкм. В органических и неорганических диэлектриках, используемых в технике, могут иметь место несовершенства структуры, такие, как примеси и дефекты. В результате образуются ловушки для электронов с глубиной 0,1—0,3 эВ. Электроны могут быть высвобождены из таких ловушек и переведены в зону проводимости нагревом, облучением светом, ионизирующим излучением, сильным электрическим полем. Такие механизмы генерации электронов и дырок обусловливают электронную электропроводность диэлектрика. Свободные электроны в сильных электрических полях могут образовываться и в результате ударной ионизации. Характерная зависимость удельного сопротивления диэлектрика с электронной электропроводностью показана на рис. 5.7. На участке *1* уменьшение ρ_r вызывается увеличением концентрации носителей заряда за счет ионизации ловушек. Этот участок называется областью примесной электропроводности. На участке *2*, где все ловушки ионизированы, увеличение сопротивления обусловливается торможением носителей заряда при их взаимодействии с совершающими тепловые колебания частицами, из которых построен диэлектрик. Наконец, на участке *3* энергия, которую получает диэлектрик при нагреве, достаточна для ионизации собственных частиц. Поэтому концентрация носителей заряда снова начинает расти, теперь уже с большей скоростью, и сопротивление снова начинает уменьшаться.

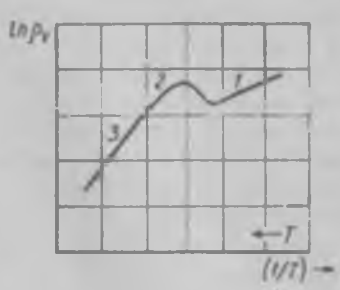


Рис. 5.7. Зависимость $\ln\rho_r$ от $1/T$ для диэлектрика с примесной электронной электропроводностью

В случае электронной электропроводности сопротивление твердых диэлектриков с увеличением давления уменьшается. Такой эффект используют как косвенное подтверждение существования в диэлектрике электронной электропроводности.

Изменение электропроводности при облучении. Электротехническое оборудование и диэлектрики, применяемые в нем, при эксплуатации на атомных электростанциях подвергаются воздействию проникающего излучения (радиации). В нормальных условиях эксплуатации действуют γ-излучения (γ-кванты различной энергии) и нейтроны. В аварийном режиме действуют γ-излучения и β-излучения (быстрые электроны, скорость которых сравнима со скоростью света). В других условиях эксплуатации возможно облучение заряженными частицами: позитронами, протонами, различными ионами и др. Проникающие излучения, передавая свою энергию (полностью или частично) частицам, из которых построен диэлек-

трик, могут вызывать их ионизацию. Поэтому такие излучения называют *ионизирующими излучениями* (ИИ). Результат воздействия ИИ на диэлектрик зависит от поглощенной дозы ИИ и ее мощности. Поглощенной дозой $Д$ называется энергия, сообщаемая ИИ веществу. Ее единицей является грэй: 1Гр = Дж/кг. Мощность поглощенной дозы P выражается в грэях в секунду (Гр/с).

Если в результате взаимодействия ИИ с веществом произошла ионизация, то образовавшаяся пара из электрона и иона участвует в процессе электропроводности, увеличивая проводимость диэлектрика. Подвижность электрона намного превышает подвижность положительного заряженного иона, поэтому увеличение проводимости в основном определяется концентрацией образовавшихся при ионизации свободных электронов.

Удельная объемная проводимость диэлектрика складывается из собственной проводимости σ_c (См/м), которая характерна для диэлектрика без облучения (ее называют темновой), и радиационной удельной объемной проводимости $\sigma_р$ (См/м): $\sigma = \sigma_c + \sigma_р$.

Радиационная проводимость определяется строением диэлектрика и мощностью поглощенной дозы и при изотермических условиях равна

$$\sigma_р = AP^{\Delta},$$

где A — радиационная постоянная, которая определяется свойствами диэлектрика, См·м$^{-1}$; Δ — показатель, изменяющийся для различных диэлектриков от 0,5 до 1,0.

Величина $\sigma_р$ много больше σ_c.

В табл. 5.2 приведены значения A и Δ для некоторых диэлектриков.

Таблица 5.2

Материал	Вид облучения	A, См·м$^{-1}$	Δ
Фторопласт-4	Непрерывное	$3{,}1 \cdot 10^{-16}$	1,0
Полиметилметакрилат	»	$3{,}3 \cdot 10^{-16}$	0,8
Полиимидные пленки ПК-1, ПК-2, ПК-3	Импульсное	$(0{,}6 \div 2{,}8) \cdot 10^{-14}$	—
Герметик виксинт У-4-21	Непрерывное γ-излучение	$4{,}9 \cdot 10^{-16}$	0,5
	Импульсное γ-излучение	$2{,}2 \cdot 10^{-15}$	0,8
Герметик ППК-21	Непрерывное γ-излучение	$1{,}7 \cdot 10^{-16}$	0,6
	Импульсное γ-излучение	$4{,}3 \cdot 10^{-17}$	1,0

На рис. 5.8 приведены зависимости ρ_v и σ_v от мощности дозы излучения для электротехнического фарфора. Их изменение определяется изменением радиационной составляющей проводимости.

Часть из образовавшихся в процессе ионизации электронов захватывается ловушками и не участвует в процессе электропроводности. Если температура диэлектрика в процессе облучения повышается, то происходит ионизация ловушек, захваченные электроны освобождаются, концентрация носителей заряда возрастает и радиационная проводимость увеличивается. Ее рост описывается формулой

$$\sigma_p = B \exp[-E_p/(kT)],$$

где B — предэкспонента, которая слабо зависит от температуры, См/м; E_p — энергия активации радиационного тока, эВ; k — постоянная Больцмана.

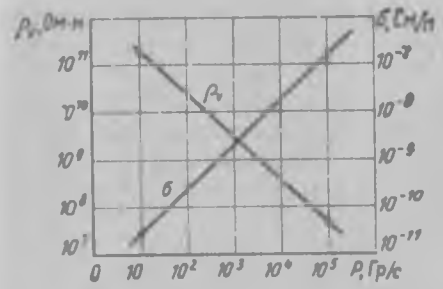


Рис. 5.8. Зависимость σ_v и ρ_v электротехнического фарфора от мощности дозы P облучения (по В. В. Маслову и Н. С. Костюкову)

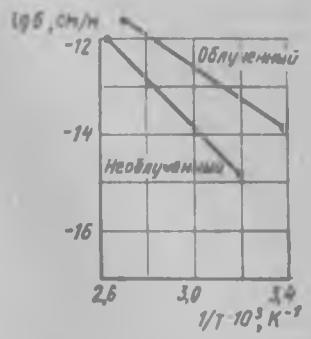


Рис. 5.9 Зависимость $\ln\sigma_v$ фторопласта-4 от $1/T$ без облучения и при облучении

На рис. 5.9 показано, как изменяется проводимость фторопласта-4 с ростом температуры без облучения и при облучении.

После прекращения облучения свободные электрические заряды рекомбинируют. Нагрев увеличивает скорость рекомбинации. Радиационная составляющая проводимости σ_p уменьшается до нуля и проводимость диэлектрика становится равной темновой проводимости, если под действием излучения в диэлектрике не образовались необратимые дефекты. Если при облучении поглощенная доза $Д$ (Гр) была большая, то в диэлектрике образуются необратимые дефекты, которые приводят и к увеличению, и к уменьшению его темновой проводимости.

Важной радиационной характеристикой диэлектрика является время установления величины σ_p и ее уменьшения до нуля после окончания облучения. Для неорганических диэлектриков это время при 293 К (20 °С) составляет единицы-десятки, для органических — тысячи — десятки тысяч секунд.

Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков. Поверхностная электропроводность определяется способностью поверхности диэлектрика адсорбировать загрязняющие компоненты.

В первую очередь поверхность увлажняется за счет влаги, содержащейся в окружающей атмосфере. Хорошо увлажняются полярные диэлектрики (резина, изделия на основе фенолформальдегидных смол и др.), диэлектрики с ионным строением (керамики), стекла. Их называют *гидрофильными* веществами в отличие от *гидрофобных*, которые не смачиваются водой. Гидрофобными являются неполярные диэлектрики (парафины, полиэтилен, фторопласт-4), диэлектрики на основе кремнийорганических соединений и др. На поверхности смачиваемого диэлектрика адсорбированная влага распределяется тонким непрерывным слоем, на поверхности несмачиваемых диэлектриков влага распределяется отдельными островками. Тонкий слой влаги на поверхности снижает поверхностное сопротивление диэлектрика и особенно сильно, если относительная влажность превышает 70—80 %. Капельки воды могут содержать растворенные газы и частички твердых веществ, распределенных в атмосфере.

Поверхность адсорбирует пыль, газы и другие вещества, образующиеся в результате протекающих в ходе эксплуатации изоляции физико-химических процессов в окружающей диэлектрик среде. Сильно загрязняется поверхность электроизоляционных конструкций (высоковольтных вводов, изоляторов и др.), работающих в загрязненной атмосфере промышленных и приморских районов. Образовавшийся на поверхности слой загрязнений имеет здесь такое небольшое электрическое сопротивление, что значение поверхностного тока утечки достаточно для нагрева поверхности до температур, больших 373 К (100 °С). При таком нагреве происходит вскипание воды на поверхности. Если этот процесс происходит в условиях увлажнения дождем, то перепады температур приводят к образованию микротрещин и механическому разрушению приповерхностного слоя изоляции. Не исключена и возможность воздействия различных агрессивных продуктов на приборы радиоэлектроники и автоматики при их использовании для регулирования работы электрических машин и аппаратов в устройствах энергетики, наземного, воздушного и водного транспорта. Поэтому в конструкциях приборов предусматриваются герметизация узлов с развитой поверхностью электроизоляционных промежутков, защита их поверхности специальными несмачиваемыми, незагрязняющими герметиками. Настройка и ремонт приборов, требующие разгерметизации, должны выполняться при условии, когда исключено всякое загрязнение и увлажнение электроизоляционных деталей. Электрокерамические электроизоляционные конструкции покрываются специальными грязестойкими глазурями, широко используется защита их поверхности гидрофобными кремнийорганическими лаками и герметиками. Покрытие из кремнийорганических соединений применяют для защиты поверхности электроизоляционных конструкций, изготовленных из стекла.

§ 5.3. Поляризация диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость и поляризованность. На рис. 5.10 изображены два плоских конденсатора, площадь электродов которых равна S (м²), а расстояние между ними h (м). В конденсаторе, изображенном на рис. 5.10, *а*, между электродами вакуум, а на рис. 5.10, *б* — диэлектрик. Если электрическое напряжение на электродах U (В), то напряженность электрического поля равна $E = U/h$ (В/м).

Электрический заряд, накопленный в конденсаторе с вакуумом, называется свободным зарядом и равен Q_0 (Кл).

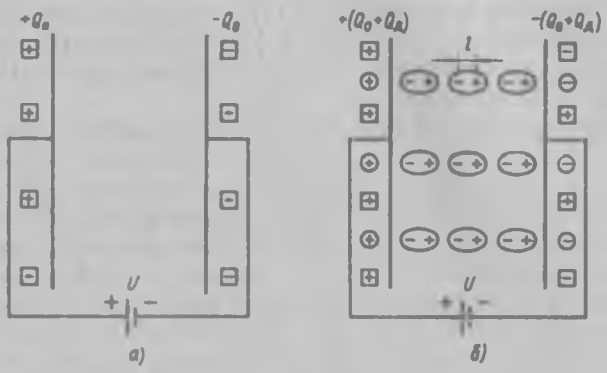


Рис. 5.10. Электрические заряды (□ — свободные, ○ — связанные) на электродах конденсатора при подаче напряжения U

В электрическом поле в частицах, из которых построен диэлектрик, связанные положительные и отрицательные заряды смещаются. В результате образуются электрические диполи с электрическим вектором $\mathbf{m} = ql$, где q — суммарный положительный (и численно равный ему суммарный отрицательный) заряд частицы, Кл; l — расстояние между центрами положительного и отрицательного заряда, плечо диполя, м (рис. 5.10, *б*). Поэтому на поверхности диэлектрика образуются поляризационные заряды: отрицательный у положительного электрода, и наоборот. Для компенсации этих поляризационных зарядов источником электрического напряжения создается дополнительный связанный заряд $Q_д$. Суммарный полный заряд Q в конденсаторе с диэлектриком равен

$$Q = Q_0 + Q_д = \varepsilon_r Q_0, \tag{5.9}$$

где ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость.

Электрическая емкость конденсатора с вакуумом между электродами равна

$$C_0 = Q_0/U. \tag{5.10}$$

Емкость C_0 (Ф) называют геометрической емкостью к нденсатора.

Емкость C этого конденсатора с диэлектриком между электродами равна

$$C = Q/U. \tag{5.11}$$

Из (5.10) и (5.11) с учетом (5.9) следует, что ε_r равна отношению емкости конденсатора с диэлектриком к емкости того же конденсатора, где между электродами вакуум:

$$\varepsilon_r = C/C_0.$$

Диэлектрическая проницаемость является важнейшим макроскопическим параметром диэлектрика, характеризующим процесс поляризации, и она может быть найдена по измеренной емкости конденсатора с диэлектриком.

Емкость плоского конденсатора рассчитывается по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S/h, \tag{5.12}$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}84 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Произведение $\varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon$ (Ф/м) называется *абсолютной диэлектрической проницаемостью*.

Емкость цилиндрического конденсатора (см. рис. 5.3, *а*) рассчитывают по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r 2\pi l / \ln \frac{d_2}{d_1}, \tag{5.13}$$

значения l, d_1 и d_2 выражают в метрах.

Измерения электрической емкостн на частоте 50 Гц обычно производят по стандартизированной методике с помощью четырехплечего моста, принципиальная схема которого изображена на рис. 5.11. Для измерения может быть использован плоский или цилиндрический конденсатор с электродамн, применяемыми для измерения удельных объемных сопротивлений (см. рис. 5.2, *а*, 5.3, *а*). Испытуемый образец ИО включают в одно из высоковольтных плечей моста по трехэлектродной схеме (охранный электрод заземляют). В другое высоковольтное плечо моста включен высоковольтный образцовый конденсатор C_0. Постоянный резистор R_4, шунтированный переменной емкостью C_4, и безындукционный переменный резистор R_3 включены в низковольтные плечи моста. В схеме моста сопротивление переменному тску $1/(\omega C)$ емкостных высоковольтных плечей намного больше сопротивлений, включенных в низковольтные плечи. Следовательно, практически все падение напряжения, подаваемого с высоковольтного трансформатора ВТ, приходится на емкостные, высоковольтные плечи моста. Поэтому можно безопасно производить уравновешивание моста путем изменения сопротивления R_3 и емкости C_4. В случае пробоя образца C или образцо-

вого конденсатора C_0 разрядники P предохраняют оператора и элементы низковольтной схемы моста.

Уравновешивание моста производят попеременным изменением R_3 и C_4, контролируя процесс по индикатору равновесия ИР.

Зафиксировав значения R_3 и C_4 в момент равновесия, рассчитывают тангенс угла диэлектрических потерь конденсатора по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = 2\pi f C_4 R_4, \tag{5.14}$$

где f — частота напряжения (обычно 50 Гц); C_4 — емкость, Ф; R_4 — сопротивление, Ом.

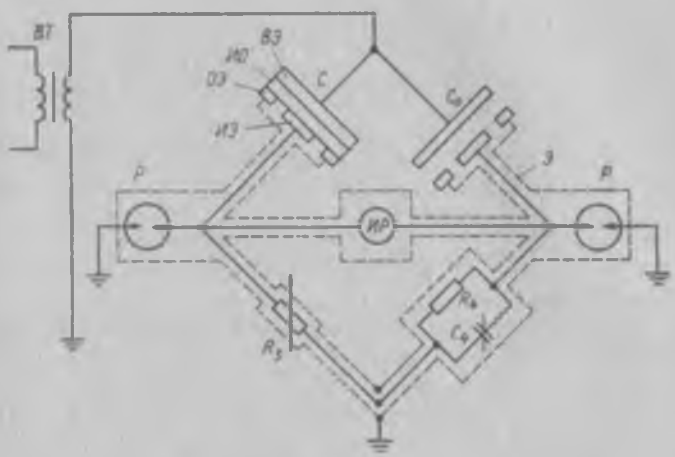


Рис. 5.11. Принципиальная схема четырехплечего высоковольтного моста для измерения C и $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов на частоте 50 Гц:

ИО — испытуемый плоский конденсатор с ВЭ, ИЭ и ОЭ; C_0 — образцовый конденсатор без потерь; C_4 — магазин емкостей; R_4 — резистор, обычно с сопротивлением 10000/π (Ом); R_3 — безындукционный переменный резистор; ИВ — индикатор равновесия; Р — разрядники; ВТ — высоковольтный трансформатор; Э — экран

Если в схеме моста резистор R_4 имеет сопротивление $R_4 = 10\,000/\pi$ Ом, а емкость конденсатора C_4 выражается в микрофарадах (1 мкФ = 10^{-6} Ф), то рассчитываемый по (5.14) $\operatorname{tg}\delta$ равен $0{,}1\ C_4$.

Емкость конденсатора вычисляется по формуле

$$C = C_0 R_4 / [R_3 (1 + \operatorname{tg}^2\delta)]. \tag{5.15}$$

Для многих диэлектриков $\operatorname{tg}\delta < 0{,}1$, поэтому в (5.15) $\operatorname{tg}^2\delta$ пренебрегают.

Относительная диэлектрическая проницаемость вычисляется по измеренной емкости C с использованием (5.12) и (5.13).

Для измерения ε_r жидких диэлектриков применяют измерительные ячейки, где слой жидкости расположен между высоковольтным

и низковольтным электродом. Измерительная ячейка может быть выполнена в виде плоской чаши (плоский конденсатор) или сосуда с размещенными в нем цилиндрическими электродами (цилиндрический конденсатор). Такие ячейки используют и при измерении удельных электрических сопротивлений жидких диэлектриков.

Поляризованное состояние диэлектрика характеризуется еще и электрическим моментом единицы объема — поляризованностью **P** (Кл/м²), которая связана с диэлектрической проницаемостью соотношением $\mathbf{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1)\,\mathbf{E}$.

Поляризованность является векторной величиной. На рис. 5.10,*б* для конденсатора с диэлектриком схематически изображены частицы диэлектрика, в каждой из которых в результате поляризации образовался электрический момент **m**. Тогда, по определению, $\mathbf{P} = n\mathbf{m}$, где n — число частиц в единице объема.

Электрический момент, который возник в результате поляризации частицы, равен $\mathbf{m} = \alpha\mathbf{E}$, где α — поляризуемость частицы, Ф·м². Это микроскопическая характеристика поляризации. Поляризуемость α связана с диэлектрической проницаемостью ε_r, которая выражается уравнением Клаузиуса — Мосотти:

$$\varepsilon_r = [1 + 2n\,\alpha/(3\varepsilon_0)]/[1 - n\,\alpha/(3\varepsilon_0)]. \qquad (5.16)$$

Физическая природа поляризации. Принято различать упругую (быструю, нерелаксационную) и неупругую (медленную, релаксационную) поляризации. Упругая поляризация завершается практически мгновенно за время t (с), намного меньшее полупериода $T/2 = 1/2\,f$ (f — частота, Гц) приложенного напряжения. Поэтому процесс быстрой поляризации создает в диэлектрике только реактивный ток. К таким поляризациям относятся электронная (завершается за время 10^{-15} — 10^{-14} с) и ионная упругая (устанавливается за время 10^{-14} — 10^{-13} с). Неупругая поляризация завершается за время, соизмеримое с полупериодом приложенного напряжения.

Электронная поляризация. В электрическом поле в атомах или молекулах, из которых построен диэлектрик, деформируются (смещаются) электронные оболочки, главным образом внешние. Смещение электронов происходит на малые расстояния в пределах своих атомов и молекул. Такая поляризация происходит у всех диэлектриков независимо от их агрегатного состояния и существования в них других видов поляризации.

На рис. 5.12, *а* схематически изображены деформация в электрическом поле электронной оболочки атома водорода и образование в поляризованной частице квазиупругого (как бы упругого) электрического момента $m_э$.

Диэлектрики, у которых имеет место только электронная поляризация, называются *неполярными* диэлектриками. В молекулах неполярных диэлектриков центры положительного и отрицательного зарядов совпадают, поэтому такие молекулы неполярные. Напри-

мер, неполярными диэлектриками являются: газы — гелий, водород, азот, метан; жидкости — бензол, тетраформ (четыреххлористый углерод); твердые — алмаз, полиэтилен, фторопласт-4, парафин.

Для неполярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость ε_r и коэффициент лучепреломления ν_D связаны соотношением

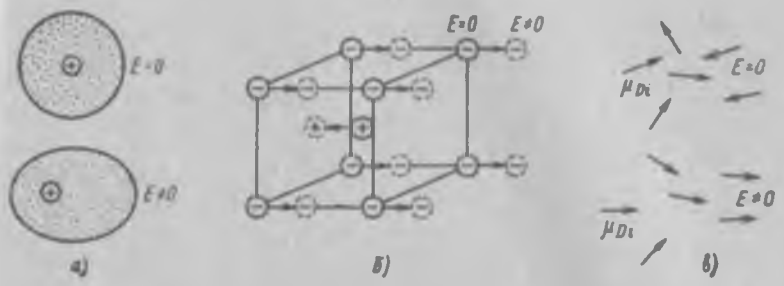


Рис. 5.12. Схематическое изображение процесса электронной (*а*), ионной упругой (*б*) и дипольной (*в*) поляризации

$\varepsilon_r = \nu_D^2$. Рассчитанную по такой формуле ε_r называют диэлектрической проницаемостью, измеренной в электрическом поле бесконечно большой частоты, и обозначают $\varepsilon_{r\infty}$.

Значение диэлектрической проницаемости газообразных диэлектриков мало отличается от 1, а для неполярных жидких и твердых диэлектриков не превышает 2,5.

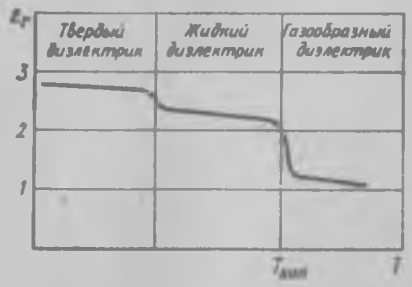


Рис. 5.13. Зависимость ε_r от T для неполярного диэлектрика

С ростом температуры число частиц n в единице объема диэлектрика уменьшается, а поэтому уменьшается и ε_r [см. (5.16)]. Изменение диэлектрической проницаемости при повышении температуры характеризуют температурным коэффициентом ТК $\varepsilon_r = \frac{1}{\varepsilon_r}\frac{d\varepsilon_r}{dT}$. Изменения n с ростом температуры незначительны. Поэтому ε_r неполярных диэлектриков при увеличении температуры уменьшается мало. На рис. 5.13 приведен схематический график изменения ε_r неполярных диэлектриков при увеличении температуры, а в табл. 5.3 — значения ТК ε_r для некоторых из них.

Диэлектрическая проницаемость неполярных диэлектриков не изменяется с ростом частоты приложенного напряжения вплоть до 10^{12}—10^{13} Гц. Это свидетельствует о том, что процесс электронной

Таблица 5.3

Диэлектрик	ε_r	Рассчитанный ТК ε_r, К$^{-1}$	Измеренный ТК ε_r, К$^{-1}$
Водород H_2	1,00027	$-0{,}92\cdot10^{-6}$	—
Азот N_2	1,0058	$-1{,}98\cdot10^{-6}$	—
Метан CH_4	1,0095	$-3{,}24\cdot10^{-6}$	—
Бензол C_6H_6	2,218	$-0{,}96\cdot10^{-3}$	$-0{,}93\cdot10^{-3}$
Тетраформ CCl_4	2,163	$-0{,}91\cdot10^{-3}$	$-0{,}69\cdot10^{-3}$
Полиэтилен высокого давления $(C_2H_4)n$	2,3	$-0{,}81\cdot10^{-3}$	—
Фторопласт-4 $(C_2F_4)n$	1,9—2,2	$-0{,}33\cdot10^{-3}$	—

поляризации происходит за время намного меньшее, чем 10^{-13}—10^{-12} с.

Ионная упругая поляризация. Она происходит в кристаллических диэлектриках, построенных из положительных и отрицательных ионов, — в галоидно-щелочных кристаллах, слюдах, керамиках. В электрическом поле в таких диэлектриках происходит смещение электронных оболочек в каждом ионе — электронная поляризация. Кроме того, упруго смещаются друг относительно друга подрешетки из положительных и отрицательных ионов (рис. 5.12,*б*), т. е. происходит упругая ионная поляризация. Это смещение приводит к появлению дополнительного электрического момента $m_и$, увеличивающего поляризованность, а следовательно, и диэлектрическую проницаемость на ε_{ru}. Таким образом, диэлектрическая проницаемость ионного кристалла равна $\varepsilon_r = \varepsilon_{r\infty} + \varepsilon_{ru}$, где ε_{ru} зависит от физической природы ионов, сил их взаимодействия и строения кристаллической решетки.

Ионная поляризация завершается за 10^{-13}—10^{-12} с, поэтому ε_r ионных кристаллов не зависит от частоты приложенного напряжения вплоть до 10^{12} — 10^{13} Гц.

С увеличением температуры и связанного с этим уменьшения n значения $\varepsilon_{r\infty}$ и ε_{ru} уменьшаются. Однако вызванное тепловым расширением увеличение межионных расстояний приводит к ослаблению сил связи между ионами и поэтому к увеличению их смещения в электрическом поле, а следовательно, к росту ε_{ru}. Причем такое увеличение ε_{ru} намного больше, чем уменьшение за счет теплового расширения. Таким образом, ε_r ионных кристаллов с ростом температуры увеличивается (ТК $\varepsilon_r > 0$), как у кристалла NaCl (рис. 5.14).

Неупругие поляризации. К неупругим поляризациям относится дипольная поляризация, которая наблюдается в полярных газообразных и жидких диэлектриках. Полярные диэлектрики построены из полярных молекул, в которых центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Полярная молекула имеет собственный электрический момент (дипольный момент) μ_D (Кл·м), как

это схематически показано на рис. 5.12, *в*. Из полярных молекул состоят газообразные аммиак NH_3, пары воды и спиртов. Полярными жидкими диэлектриками являются вода, хлорбензол C_6H_5Cl, нитробензол $C_6H_5NO_2$. В электрическом поле в таких молекулах смещаются электронные оболочки — совершается электронная поляризация. Кроме того, происходит дипольная поляризация: моменты μ_D молекул несколько ориентируются по полю **E** (см. рис. 5.12, *в*). В результате такой поляризации увеличивается **P**, а следовательно, и ε_r. Поворот молекулы как целого в электрическом поле наблюдается в полярных газообразных и жидких диэлектриках, вязкость которых невелика. В твердых полярных диэлектриках процесс дипольной поляризации состоит в деформации участков-звеньев, сегментов молекул или ориентации отдельных полярных групп молекул.

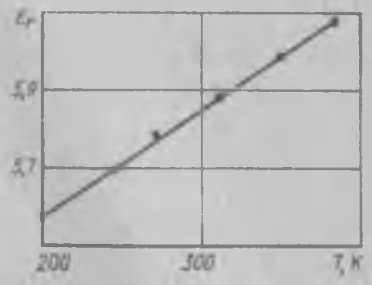


Рис. 5.14. Зависимость ε_r кристаллов от T для NaCl ($TK\varepsilon_r = 3{,}4 \times 10^{-4}\ K^{-1}$)

Для ориентации диполя требуется время, которое характеризуется временем релаксации τ. После снятия внешнего поля в течение τ ориентация полярной молекулы под действием теплового движения уменьшается в *e* раз (*e* — основание натурального логарифма).

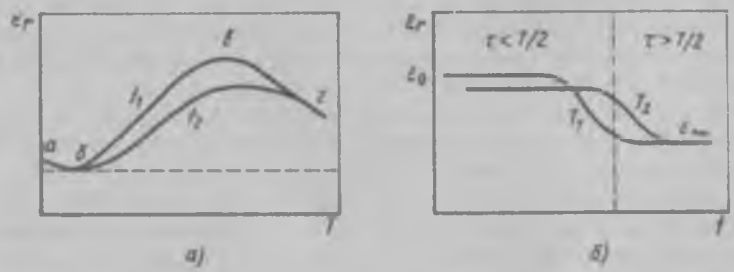


Рис. 5.15. Зависимость ε_r полярного диэлектрика от T на частотах $f_1 < f_2$ (*а*) и от f при температурах $T_1 < T_2$ (*б*)

Время релаксации прямо пропорционально вязкости диэлектрика и обратно пропорционально температуре. Вязкость диэлектрика с ростом температуры экспоненциально уменьшается, поэтому уменьшается и τ. В этой области температур ε_r с ростом температуры увеличивается (рис. 5.15, *а*) участок *бв*. Уменьшение ε_r на участке *вг* вызывается разориентацией полярных молекул в результате теплового движения, на участке *аб* — уменьшением плотности.

Если полупериод приложенного напряжения $T/2 < \tau$, то электрические моменты полярных молекул не успевают ориентироваться в электрическом поле и дипольная поляризация уменьшается. Поэтому ε_r полярного диэлектрика уменьшается (рис. 5.15, *б*). В зависимости от строения диэлектрика и внешних условий время релаксации дипольной поляризации изменяется в широких пределах — от 10^{-8} до 10^{-1} с.

При ориентации в электрическом поле диполи преодолевают межмолекулярные силы, поворачиваются с «трением»; в этой области температур дипольная поляризация происходит с потерями энергии.

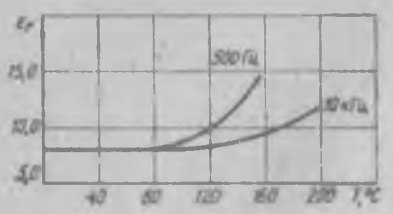


Рис. 5.16. Зависимость ε_r натриево-силикатного стекла от температуры на разных частотах (по Р. Я. Ходаковской)

Ионно-релаксационная поляризация. Используемые в технике твердые диэлектрики могут иметь неплотную упаковку объема частицами. В таких материалах образуются ионы, которые в ходе тепловых колебаний перебрасываются из положений временного закрепления на расстояния, соизмеримые с расстояниями между частицами (10^{-10} м), и закрепляются в новых положениях. В электрическом поле перебросы становятся направленными. В результате в диэлектрике возникает различие в расположении центров положительного и отрицательного зарядов, т. е. появляется электрический момент. Такой процесс называют ионно-релаксационной поляризацией. С ростом температуры число ионов, перебрасываемых в новые положения, увеличивается, поэтому растут поляризованность и диэлектрическая проницаемость. На рис. 5.16 приведена зависимость ε_r от температуры для натриево-силикатного стекла, в структуре которого имеют место слабосвязанные ионы.

Миграционная поляризация. Электроизоляционные материалы могут быть неоднородными, состоящими из диэлектриков, у которых ε_r и σ различаются. На рис. 5.17, *а* схематически изображен электрический конденсатор с неоднородным (двухслойным) диэлектриком, а на рис. 5.17, *в* — состоящим из многих блоков, как это имеет место, например, в поликристаллическом материале.

Если в двухслойном диэлектрике $\varepsilon_{r1} < \varepsilon_{r2}$ и $\sigma_1 > \sigma_2$, то при подаче на электроды постоянного напряжения в начальный момент времени плотность тока в первом слое будет больше. Это приведет к образованию на границе раздела положительного заряда $+\Delta Q_{доб}$ (рис. 5.17, *б*). По мере накопления заряда установится состояние, когда плотности токов в первом и втором слоях станут равными. В диэлектрике, состоящем из многих блоков с различными ε_r и σ, дополнительные заряды образуются на границе блоков (рис. 5.17, *г*). Этот вид поляризации называют межслоевой поляри-

зацией. Наконец, в диэлектрике могут иметь место такие слабосвязанные ионы, которые в результате тепловых перебросов, направляемых полем, перемещаются к электродам и там закрепляются, локализуются. В результате близ электродов образуется объемный заряд $Q_{выс}$, обусловливающий электрический момент $M = Q_{выс}\ h$. Такую поляризацию называют объемно-зарядовой поляризацией или высоковольтной поляризацией.

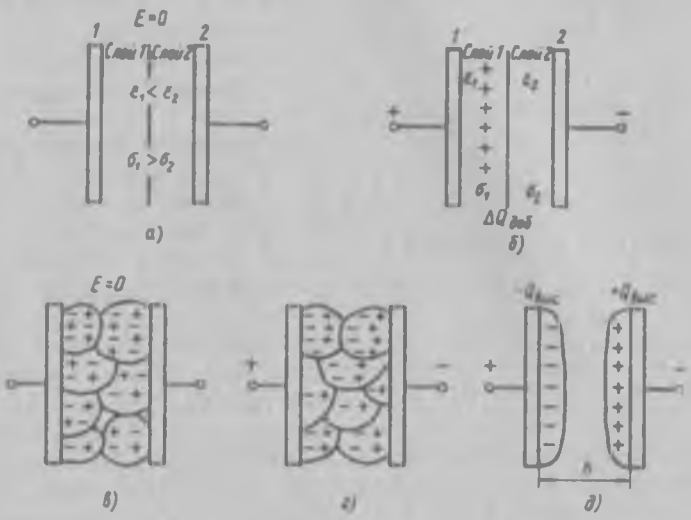


Рис. 5.17. Модели процессов миграционной поляризации в диэлектриках с неоднородной структурой:

а, б — в двухслойном; *в—г* — в блочном поликристаллическом; *д* — с высоковольтной поляризацией

Процессы миграционной поляризации одни из самых медленных. Время на их завершение изменяется в пределах $1—10^{-3}$ с.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация. Доменная поляризация. Сегнетоэлектрики. Характерные для сегнетоэлектриков свойства впервые были обнаружены у сегнетовой соли. В дальнейшем сегнетоэлектриками стали называть вещества, свойства которых подобны свойствам сегнетовой соли. В сегнетоэлектриках даже в отсутствие электрического поля наблюдается самопроизвольное смещение частиц — ионов в ионных кристаллах или полярных радикалов молекул, которое приводит к несовпадению центров положительного и отрицательного зарядов в объеме диэлектрика, т.е. поляризации. Такая поляризация называется спонтанной (самопроизвольной). В результате в диэлектрике образуются области — домены, где все частицы, обусловливающие самопроизвольную поляризацию, смещены в одном направлении. В этом направлении ориентирован и вектор спонтанной поляризованности $\mathbf{P}_s$ домена. В со-

седних доменах направление $\mathbf{P}_s$ может быть противоположным или перпендикулярным (рис. 5.18, *а*).

В электрическом поле в сегнетоэлектриках происходят упругие электронная и ионная поляризации, а также неупругая доменная. В процессе доменной поляризации векторы $\mathbf{P}_s$ доменов ориентируются по направлению электрического поля (рис. 5.18, *б*). Переориентацией направлений $\mathbf{P}_s$ доменов объясняются характерные для сегнетоэлектриков нелинейные свойства: петля диэлектрического

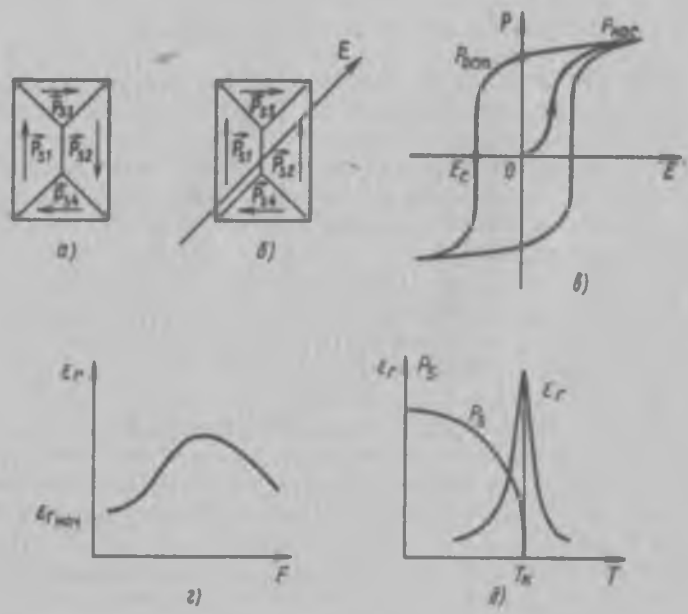


Рис 5.18 Характерные свойства сегнетоэлектриков:

а — существование доменов; *б* — доменная поляризация; *в* — петли диэлектрического гистерезиса; *г* — зависимость ε_r от напряженности электрического поля; *д* — зависимость ε_r и P от температуры

гистерезиса и резкая зависимость их диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля (рис. 5.18, *в,г*). Поляризованность $\mathbf{P}$ кристалла с ростом напряженности $\mathbf{E}$ увеличивается за счет ориентации $\mathbf{P}_s$ доменов и достигает поляризованности насыщения $P_{нас}$. С уменьшением напряженности при $E = 0$ наблюдается остаточная поляризованность $P_{ост}$, так как в диэлектрике сохраняется вызванная электрическим полем ориентация доменов. Уменьшить поляризованность P до нуля можно приложив к образцу коэрцитивную силу, электрическое поле E_c.

Для сегнетоэлектриков характерны высокая (до нескольких тысяч) диэлектрическая проницаемость и резкая ее зависимость от температуры (рис. 5.19, *д*). Увеличение температуры приводит к ослаб-

лению сил, препятствующих ориентации доменов. Поляризованность диэлектрика, вызванная доменной поляризацией, увеличивается, а ε_r достигает максимального значения при температуре $T_к$, которую называют температурой Кюри. Спонтанная поляризованность P_s при температуре Кюри исчезает. При $T > T_К$ сегнетоэлектрик теряет свои сегнетоэлектрические свойства и становится обычным линейным диэлектриком, ε_r которого не зависит от напряженности электрического поля.

§ 5.4. Диэлектрические потери

Удельные диэлектрические потери и угол диэлектрических потерь. Диэлектрическими потерями называют мощность, поглощаемую в диэлектрике под действием приложенного напряжения. Потери мощности вызываются электропроводностью и медленными поляризациями. Если в диэлектрике имеют место газовые включения (поры), то при работе его на высоких напряжениях и высоких частотах происходит ионизация газа в порах, что вызывает потери на ионизацию.

При включении на постоянное напряжение конденсатора, между электродами которого находится диэлектрик, через него протекает падающий со временем ток, равный $I = I_с + I_{абс} + I_{ск}$ (рис. 5.19, *а*).

Ток смещения (емкостный ток) $I_с$ вызван смещением электронных оболочек атомов, ионов, молекул, т. е. процессом установления быстрых, упругих поляризаций; он спадает в течение 10^{-16} — 10^{-15} с, а поэтому практически не вызывает рассеяния энергии в диэлектрике.

Спадающий со временем ток абсорбции $I_{абс}$ обусловлен смещением связанных зарядов в ходе медленных поляризаций и вызывает рассеяние энергии в диэлектрике, диэлектрические потери.

Сквозной ток утечки $I_{ск}$ вызван перемещением свободных зарядов в диэлектрике в процессе электропроводности, не изменяется со временем и вызывает потери, аналогичные потерям по закону Джоуля — Ленца в проводниках.

Следовательно, на постоянном напряжении потери, вызванные током абсорбции, имеют место только в период, когда происходит процесс медленных поляризаций, т. е. при включении конденсатора.

На переменном напряжении $I_{абс}$ имеет место, если время релаксации процесса медленной поляризации меньше или соизмеримо с полупериодом приложенного напряжения ($\tau \leqslant T/2$). В этом случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике под воздействием на него электрического поля — диэлектрические потери, обусловливаемые токами $I_{ск}$ и $I_{абс}$, наблюдаются в течение всего времени приложения напряжения.

На рис. 5.19, *б* приведена диаграмма токов, протекающих через конденсатор с диэлектриком на переменном напряжении. Емкост-

ный ток I_c опережает напряжение U по фазе на угол 90° и поэтому не создает потерь мощности в диэлектрике. Ток абсорции $I_{абс}$ определяется поляризациями, процесс установления которых связан с потерями энергии. Поэтому он имеет реактивную $I_{ра}$ и активную $I_{аа}$ составляющие. Сквозной ток $I_{ск}$ совпадает по фазе с приложенным напряжением. Суммарный ток I имеет реактивную $I_р = I_c + I_{ра}$ и активную $I_а = I_{аа} + I_{ск}$ составляющие и опережает напряжение на угол $\varphi < 90°$. Угол δ, дополняющий до 90° угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи, называют *углом диэлектрических потерь*.

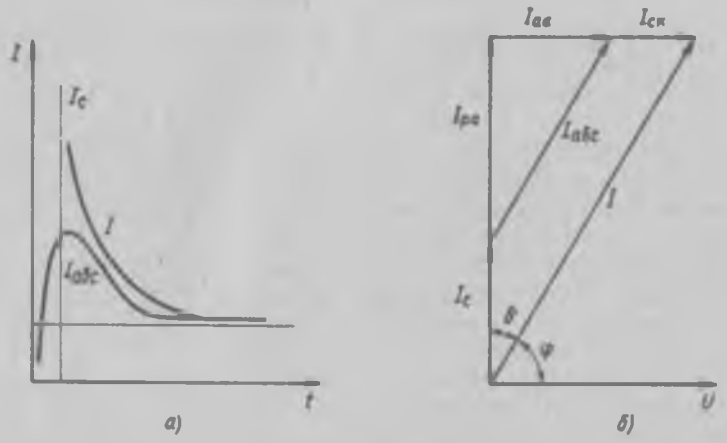


Рис 5.19. Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени на постоянном напряжении *(а)* и векторная диаграмма токов, протекающих через диэлектрик на переменном напряжении *(б)*

Из векторной диаграммы токов следует, что

$$\operatorname{tg}\delta = I_а / I_р, \tag{5.17}$$

где tg δ — *тангенс угла диэлектрических потерь*, который является важным параметром, характеризующим качество диэлектрика при работе на переменном напряжении.

Для диэлектриков, применяемых в технике высоких частот и высоких напряжений, значение tg δ не должно превышать 10^{-3} — 10^{-4}. Значение tg δ диэлектриков, предназначенных для работы в менее ответственных условиях, допускается много большей.

Если емкость конденсатора C (Ф), то реактивный ток равен $I_р = U\omega C$, где U — приложенное напряжение, В; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, рад/с; f — частота приложенного напряжения, Гц. Следовательно, активная составляющая суммарного тока $I_а$ равна $I_а = I_р \operatorname{tg}\delta = U\omega C \operatorname{tg}\delta$. Тогда мощность $P_а = UI_а$ (Вт), выделяющихся в конденсаторе диэлектрических потерь равна

$$P_а = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta. \tag{5.18}$$

Подставив в (5.18) значение емкости плоского конденсатора, рассчитываемой по (5.12), и приняв $S = 1$ м², $h = 1$ м, получим формулу для расчета удельных диэлектрических потерь (Вт/м³):

$$P_{\text{уд}} = 5{,}56 \cdot 10^{-11} E^2 \varepsilon_r f \operatorname{tg} \delta, \qquad (5.19)$$

где E — напряженность электрического поля, В/м; $\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta = \varepsilon_r''$ — *коэффициент диэлектрических потерь*; $\sigma_{\text{э}} = 5{,}56 \times 10^{-11} \times \varepsilon_r f \operatorname{tg} \delta$ — *проводимость диэлектрика на переменном напряжении частоты* f, См·м⁻¹.

Измерение tg δ на частоте 50 Гц производят по той же стандартизованной методике, которая применяется для измерения электрической емкости с помощью четырехплечего моста [см. (5.3)].

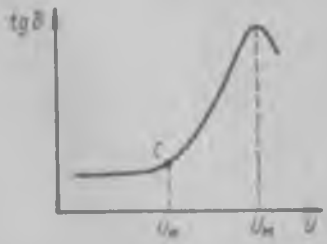


Рис 5.20. Зависимость tgδ от напряжения для диэлектрика с газовыми включениями

Диэлектрические потери в газообразных диэлектриках. В слабых электрических полях диэлектрические потери в газах обусловливаются электропроводностью. Сквозной ток утечки $I_{\text{см}}$, протекающий через конденсатор с газовым диэлектриком, весьма мал и tg δ для такого конденсатора при 50 Гц обычно не более 10^{-7}.

Если диэлектрическим материалом в конденсаторе служит диэлектрик с газовыми включениями, то при росте напряжения в них начинается ионизация газа. Энергия, затрачиваемая на ионизацию, называется потерями на ионизацию. Потери на ионизацию $P_{\text{ви}}$ можно рассчитать по приближенной формуле $P_{\text{ви}} = Af(U - U_{\text{и}})^4$, где A — коэффициент, который зависит от размера, формы и расположения газового включения, плотности газа и диэлектрической проницаемости диэлектрика; f — частота приложенного напряжения; U — рабочее напряжение; $U_{\text{и}}$ — напряжение, при котором в газовых включениях начинается ионизация.

Зависимость tg δ от напряжения приведена на рис. 5.20, которую называют *кривой ионизации*, а точку C — *точкой ионизации*.

Если при увеличении U напряженность электрического поля в воздушном включении достигнет пробивного значения, то происходит разряд, пробой. Такие разряды в воздушном включении называют *частичными разрядами*. Обычно изоляция электрических машин и аппаратов, кабелей и других устройств содержит воздушные включения разных размеров. Ионизация сначала возникает в крупных (большого объема) включениях и с ростом напряжения развивается в более мелких. Поэтому с ростом напряжения tg δ увеличивается, достигая максимума при напряжении $U_{\text{м}} \approx 2U_{\text{и}}$. Если все воздушные включения ионизированы, то энергия на ионизацию но-

вых включений больше не требуется и с ростом напряжения tg δ уменьшается.

Диэлектрические потери в жидких диэлектриках. В неполярных жидкостях диэлектрические потери вызваны электропроводностью. Поэтому tgδ определяется $I_{ск}$ (рис. 5.19, *б*), значение которого прямо пропорционально удельной проводимости σ диэлектрика [см. (5.20)]. Проводимость экспоненциально увеличивается с ростом температуры [см. (5.7)], также изменяется и tg δ жидкого диэлектрика при нагреве (рис. 5.21).

С ростом частоты увеличивается емкостный ток I_c, протекающий через диэлектрик, а активный ток сквозной утечки $I_{ск}$ остается постоянным. Следовательно, [см. (5.17)] tg δ неполярного жидкого диэлектрика с ростом частоты уменьшается (рис. 5.21,*б*).

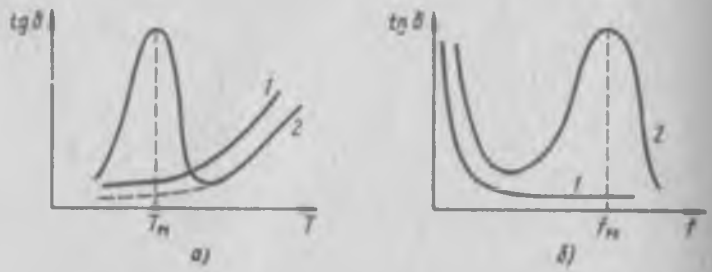


Рис 5.21 Зависимость tgδ неполярного (*1*) и полярного (*2*) диэлектриков от температуры и частоты

В полярных жидких диэлектриках потери вызваны электропроводностью и поляризацией, которые обусловливают значение токов $I_{ск}$ и $I_{абс}$ (рис. 5.19, *б*).

При низких температурах вязкость диэлектрика так велика, что диполи «заморожены», не ориентируются в электрическом поле и дипольная поляризация не происходит. Проводимость диэлектрика при низких температурах мала, а поэтому невелики $I_{ск}$ и вызываемые им диэлектрические потери. Поэтому tg δ жидкого полярного диэлектрика при низких температурах имеет небольшое значение (рис. 5.21, *а*, пунктирная линия). С ростом температуры вязкость диэлектрика уменьшается, время релаксации полярных молекул становится меньше и они вовлекаются в процесс поляризации. Ориентация (поворот молекул в поле в результате преодоления межмолекулярных сил) происходит с «трением». На работу против сил трения затрачивается энергия электрического поля, которая и рассеивается в диэлектрике, активная составляющая $I_{аа}$ тока абсорбции $I_{абс}$ увеличивается и tgδ диэлектрика растет (рис. 5.21, *а*). При температуре $T_м$ вязкость диэлектрика уменьшается до такого значения, что время релаксации и полупериод ($T/2=1/2f$) приложенного напряжения становятся одинаковыми. Полярные молекулы в течение одного полупериода поворачиваются на максималь-

ный угол, а в течение другого полупериода, где направление электрического поля противоположно, ориентируются в другом направлении. Таким образом, полярная молекула, непрерывно следуя за изменением электрического поля, поворачивается на максимальный угол, диэлектрические потери и tg δ достигают максимума. При последующем росте температуры вязкость снижается еще больше и время τ становится меньше полупериода $\tau < T/2$. Диэлектрические потери за полупериод приложенного напряжения, которые возникают только в течение времени ориентации диполя, уменьшаются. К тому же начинает сказываться дезориентирующее действие теплового движения,

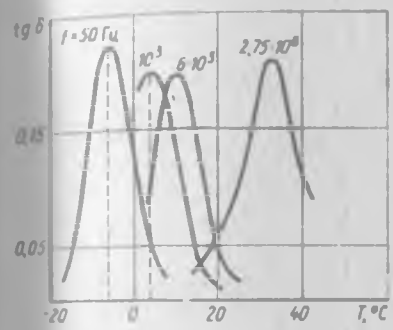


Рис. 5.22. Зависимость tgδ от температуры для совола на разных частотах (по К. А. Андрианову)

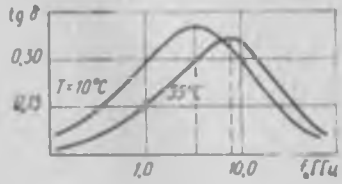


Рис. 5.23. Зависимость tgδ от частоты для нитробензола при 10 и 55 °C (по Я. Ю. Ахадову)

расстраивающее ориентацию дипольных молекул в поле. В результате при $\tau \leqslant T/2$ tg δ уменьшается до малых значений.

Дальнейшее изменение температуры приводит к заметному увеличению σ диэлектрика, а поэтому к росту $I_{ск}$, который определяет на этом участке диэлектрические потери, и tg δ.

Если потери измерять на другой, большей, частоте, то максимум tg δ наблюдается при более высокой температуре. Для того чтобы на большей частоте (меньшем полупериоде) соблюдалось равенство $\tau = T/2$, необходимо уменьшить τ, чего можно достигнуть нагревом диэлектрика до большей температуры (рис. 5.22).

На низких частотах диэлектрические потери в полярных жидких диэлектриках в основном определяются электропроводностью, т. е. не изменяющимся с частотой током $I_{ск}$. Диэлектрические потери от тока $I_{абс}$ намного меньше, так как число поворотов диполей в единицу времени еще мало. С увеличением частоты реактивный ток I_p растет, а tg δ уменьшается, как у неполярных диэлектриков [см. (5.17)].

С увеличением частоты число поворотов полярной молекулы в единицу времени растет и диэлектрические потери, вызванные током $I_{абс}$, увеличиваются, становятся намного большими, чем потери от электропроводности. Растет и tg δ, достигая максимума

при частоте $f_м$, где $T/2 = \tau$ (см. рис. 5.21, *б*). На этой частоте полярные молекулы, следуя за изменением электрического поля, непрерывно поворачиваются на максимальный угол. Наконец, при частотах, где $T/2 \ll \tau$, времени для поворота молекулы не хватает, $I_{a\,бс}$ уменьшается, а tg δ становится малым.

При нагреве образца максимум tg δ сдвигается в область больших частот (рис. 5.23). При этом τ уменьшается и для того, чтобы выполнялось равенство $T/2 = \tau$, необходимо увеличивать частоту приложенного напряжения.

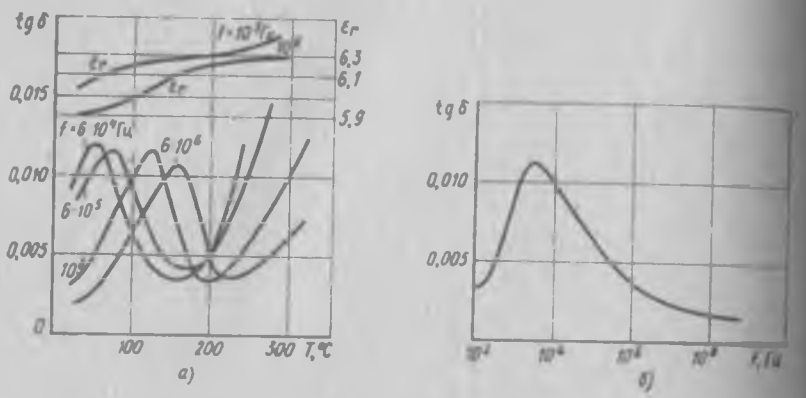


Рис 5.24. Зависимость ε_r и tgδ от температуры на разных частотах (*а*) и tgδ от частоты для ситалла на основе оксидов (*б*) (по М. Д. Машкович)

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках. В неполярных твердых диэлектриках диэлектрические потери вызваны электропроводностью, а в полярных — электропроводностью и дипольной поляризацией. Выше (см. § 5.3) отмечалось, что в твердых диэлектриках дипольная поляризация представляет собой деформацию звеньев, сегментов или ориентацию полярных групп молекул в электрическом поле. Изменение tg δ от температуры и частоты для твердых неполярных и полярных диэлектриков такие же, как и для жидких (рис. 5.21—5.23).

В ходе тепловой ионной поляризации твердых диэлектриков переброс слабосвязанных ионов в электрическом поле происходит с потерями энергии. В некоторых диэлектриках с неплотной упаковкой объема частицами, например стеклах, где имеет место ионно-релаксационная поляризация, также наблюдаются закономерности изменения tgδ от температуры и частоты, характерные для дипольной поляризации. На рис. 5.24 приведены температурные и частотные зависимости для алюмоцинкосиликатного стекла — ситалла на основе оксидов SiO_2, Al_2O_3 и ZnO. Существование или отсутствие максимумов tg δ в температурной и частотной зависимостях (рис. 5.24) зависит от условий термообработки стекла.

Увеличение tg δ при нагреве в стекле или в поликристаллическом диэлектрике — керамике — может также вызываться одновременно увеличением проводимости материала и ростом числа слабосвязанных ионов, участвующих в ионно-релаксационной поляризации. Тангенс угла диэлектрических потерь таких материалов с увеличением температуры растет, но максимальное его значение при измерениях не фиксируется, как это видно из рис. 5.25, где приведены зависимости tg δ от температуры для Na — Ba — Mg — алюмоборосиликатного стекла, высоковольтного фарфора и стеатита.

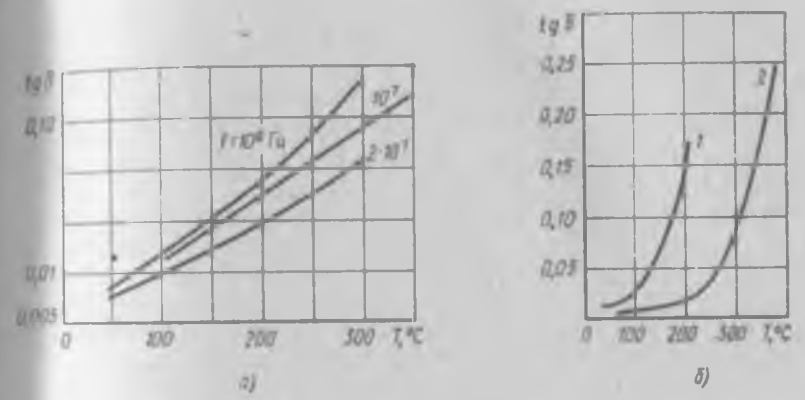


Рис. 5.25. Зависимости от температуры:

а — для Na—Ba—Mg — алюмоборосиликатного стекла на разных частотах (по Р. Я. Ходаковской); *б* — для высоковольтного фарфора (*1*) и стеатита (*2*) (по Х. С. Валееву)

Диэлектрические потери в сегнетоэлектриках определяются электропроводностью и доменной поляризацией. Изменения tg δ от температуры и частоты для них такие же, как и для твердых полярных диэлектриков.

Диэлектрические потери в композиционных диэлектрических материалах определяются свойствами компонентов и их взаимным расположением, т. е. строением материала.

Наиболее часто изоляционные материалы представляют собой последовательно расположенные слои диэлектриков. Для двухслойного диэлектрика tg δ рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg}\delta \simeq [(1-v)\operatorname{tg}\delta_2\varepsilon_{r1} + v\operatorname{tg}\delta_1\varepsilon_{r2}]/[(1-v)\varepsilon_{r1} + v\varepsilon_{r2}].$$

Если диэлектрик представляет собой статистическую смесь не взаимодействующих между собой материалов, то tg δ композиции можно рассчитать по полуэмпирической формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_1^{v}\operatorname{tg}\delta^{1-v},$$

где v — объемная концентрация первой компоненты.

§ 5.5. Электрическая прочность диэлектриков

Пробой диэлектриков и электрическая прочность. Если в ходе повышения приложенного к изоляции напряжения напряженность электрического поля в диэлектрике превышает некоторое критическое значение, то диэлектрик теряет свои электроизолирующие свойства. Сквозной ток, протекающий через диэлектрик, резко возрастает до 10^8 А м^2, а сопротивление диэлектрика уменьшается до такого значения, что происходит короткое замыкание электродов. Это явление называют пробоем диэлектрика. Значение напряжения в момент пробоя называют пробивным напряжением, напряженность в момент пробоя — электрической прочностью.

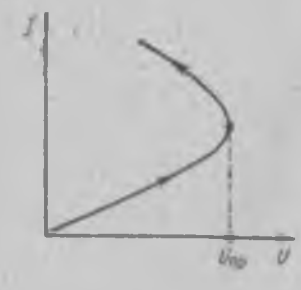


Рис. 5.26 Типичная зависимость сквозного тока от приложенного напряжения при пробое диэлектрика

На рис. 5.26 показана типичная зависимость сквозного тока, протекающего через диэлектрик, от приложенного напряжения при пробое. Если напряжение, приложенное к диэлектрику, достигло $U_{пр}$, то сквозной ток резко увеличивается даже тогда, когда напряжение на электродах уменьшается, так как в диэлектрике под действием приложенного напряжения происходят необратимые изменения, резко уменьшающие его электрическое сопротивление.

В зависимости от свойств изоляции и мощности источника электрической энергии, с помощью которого подается напряжение на образец, после пробоя в изоляции могут наблюдаться следующие изменения. В месте пробоя возникает искра, а при большой мощности источника — даже электрическая дуга, под действием которой происходят оплавление, обгорание, растрескивание и тому подобные изменения и диэлектрика, и электродов. В пробитом твердом диэлектрике в месте пробоя можно обнаружить пробитое, проплавленное, прожженное отверстие — след пробоя. Если к такому образцу твердой изоляции напряжение приложить повторно, то пробой происходит, как правило, при значительно меньших напряжениях, чем $U_{пр}$ первого пробоя. При пробое газообразных и жидких диэлектриков после снятия приложенного напряжения пробитый промежуток восстанавливает первоначальные значения $U_{пр}$, так как атомы и молекулы газа или жидкости практически мгновенно диффундируют в объем, который занимали разрушенные в процессе пробоя частицы.

Если пробой электрической изоляции происходит в однородном электрическом поле, то $E_{пр} = U_{пр}/h$, где $E_{пр}$ — электрическая прочность, В/м; $U_{пр}$ — пробивное напряжение, В; h — расстояние между электродами, толщина изоляции, м.

На практике пробивное напряжение удобно выражать в киловольтах, толщину диэлектрика — в миллиметрах, а электрическую прочность — в киловольтах на миллиметр. В этом случае справедливы следующие соотношения: 10^6 В/м = 1 МВ/м = 1 кВ/мм.

При определении $E_{пр}$ твердого диэлектрика может произойти пробой по поверхности — перекрытие образца, т. е. поверхностный пробой (рис. 5.27). В этом случае пробиваются воздух или жидкость, окружающие образец твердого диэлектрика. Напряжение поверхностного перекрытия зависит от свойств твердого диэлектрика, формы образца, электродов и закономерности пробоя окружающей среды.

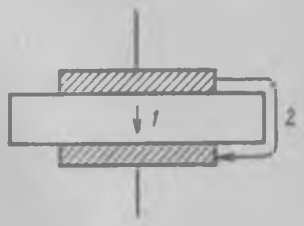


Рис. 5.27. Схема пробоя (*1*) и перекрытия (*2*) образца твердого диэлектрика

Экспериментально определяемая величина $E_{пр}$ зависит от толщины образца диэлектрика, формы и площади электродов, скорости подъема и времени воздействия приложенного напряжения. Значение $E_{пр}$ на постоянном напряжении может сильно отличаться от $E_{пр}$ на переменном, а также различаются значения $E_{пр}$ на импульсном напряжении при частоте 50 Гц и при более высоких частотах. На величину $E_{пр}$ влияют и другие факторы. Определение электрической прочности проводится стандартизованными методами. Только в этом случае возможны сравнение диэлектриков между собой и контроль их качества.

Образцы для определения $E_{пр}$ твердых диэлектриков должны обеспечивать пробой в однородном поле; их размеры задаются в стандартах, и они намного больше размеров электродов для того, чтобы исключить поверхностный пробой. Для предотвращения поверхностного пробоя можно проводить определение $E_{пр}$ на образцах, расположенных в жидком диэлектрике, например трансформаторном масле. На рис. 5.28 приведены формы и размеры ряда образцов для определения $E_{пр}$ твердых диэлектриков. Если толщина образца не позволяет определить его $U_{пр}$, то в нем выполняют проточку, как это показано для толстых плоского (рис. 5.28, *б*) и цилиндрического (рис. 5.28, *д*) образцов.

В качестве электродов могут использоваться массивные металлические нажимные электроды, изготовленные из нержавеющей стали, меди, латуни и других металлов; притертые на вазелине и трансформаторном масле фольговые, напыленные в вакууме металлические, графитовые и другие электроды. Для получения в месте пробоя однородного поля диаметр D_1 нижнего электрода должен быть не менее чем в три раза больше диаметра D верхнего электрода (рис. 5.28, *а*). Могут применяться и электроды с одинаковыми диаметрами (рис. 5.28, *в*). Однородное поле в тонких пленочных образцах обеспечивает применение полусферического верхнего электрода.

В керамических образцах полусферический электрод образуется в результате металлизации полусферической лунки (рис. 5.28, *г*). Для определения $E_{пр}$ жидких диэлектриков используют специальные ячейки, выполненные из фарфора, стекла, кварца или специальных пластмасс, не реагирующих с испытуемыми жидкими диэлектриками. Электроды здесь изготовляются из латуни (рис. 5.29).

Измерение $U_{пр}$ образцов диэлектриков производится на испытательных установках, принципиальная схема которых изображена на рис. 5.30.

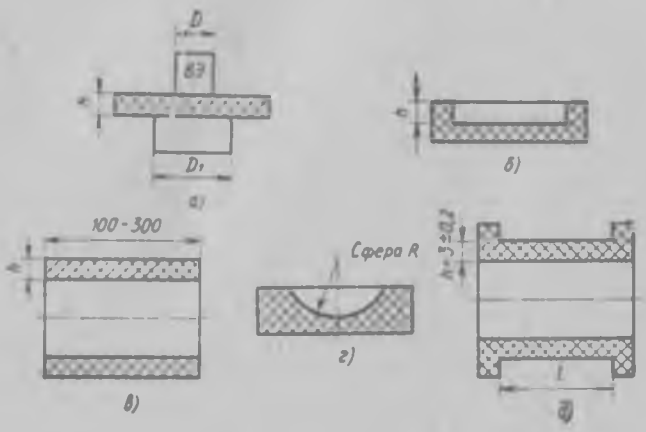


Рис. 5.28. Образцы для определения электрической прочности твердых электроизоляционных материалов

Установка для измерения $U_{пр}$ при частоте 50 Гц (рис. 5.30, *а*) состоит из испытательного трансформатора *T* для повышения напряжения. Напряжение на низковольтной обмотке этого трансформатора плавно или ступенями изменяется с помощью автотрансформатора *AT*. Образец *1* подключен с помощью электродов *2* и *3* к высоковольтной обмотке испытательного трансформатора. Защитный резистор *R* служит для ограничения тока, протекающего при пробое по высоковольтной обмотке трансформатора *T*. Напряжение на образце измеряется вольтметром *V*, который градуируют по напряжению высоковольтной обмотки. Мощность испытательной установки должна быть достаточной, чтобы установившийся ток короткого замыкания при пробое со стороны высокого напряжения был не менее 40 мА при испытаниях твердых и 20 мА жидких диэлектриков. Этот ток контролируют по амперметру мА, проградуированному по току короткого замыкания в высоковольтной обмотке. Напряжение на токоведущих частях высоковольтного трансформатора и резисторе *R* опасно для жизни. Поэтому трансформатор *T*,

резистор R и испытательное поле, на котором расположены образец *1*, электроды *2*, *3*, размещают в защитной камере *ЗК*.

В ходе определения $U_{пр}$ напряжение на низковольтной обмотке плавно или ступенями повышают и фиксируют напряжение пробоя по вольтметру *V*. В цепи низкого напряжения предусмотрено автоматическое устройство, которое отключает питание установки в момент пробоя. Сигнальная лампа *СЛ* указывает на включение и отключение установки.

Для измерения $U_{пр}$ на постоянном токе (рис. 5.30, *б*) в цепь высокого напряжения включают высоковольтный диод *Д* и конденсатор $C_ф$, который служит для сглаживания пульсаций тока в этой однополупериодной схеме выпрямления.

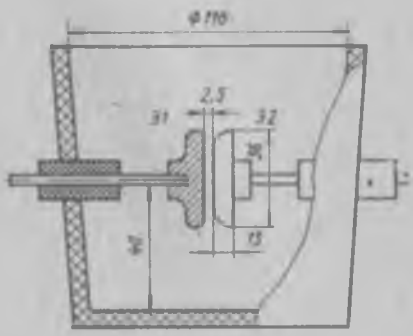


Рис. 5.29. Ячейка для определения пробивного напряжения жидких диэлектриков с латунными электродами *Э1* и *Э2*

Число пробоев при испытаниях оговаривается техническими условиями на свойства материалов. Однако в любом случае число пробоев должно быть не менее 5, а при испытании узких и ленточных материалов электродами с диаметром 6 мм число пробоев должно быть не менее 10. В том случае, если отдельные результаты отличаются от среднего арифметического более чем на 15 %, число пробоев увеличивается в два раза.

Физическая природа пробоя диэлектриков. Различают следующие виды пробоя диэлектриков.

Электрический пробой, в процессе которого диэлектрик разрушается силами, действующими в электрическом поле на электрические заряды его атомов, ионов или молекул. Этот вид пробоя протекает в течение 10^{-8} — 10^{-6} с, т. е. практически мгновенно. Он вызывается ударной ионизацией электронами. На длине свободного пробега λ электрон в электрическом поле E приобретает энергию $W = eE\lambda$, где e — заряд электрона. Если энергия электрона достаточна для ионизации, то электрон при соударении с атомами, ионами или молекулами, из которых состоит диэлектрик, ионизирует их. В результате появляются новые электроны, которые также ускоряются электрическим полем до энергии $W_и$. Таким образом, количество свободных электронов лавинно возрастает, что приводит к резкому повышению проводимости и электрическому пробою. Плотность жидких и твердых диэлектриков больше плотности газообразных, а поэтому длина свободного пробега электронов в них меньше. Для того чтобы электрон приобрел энергию $W_и$, в жидком и твердом диэлектриках нужна большая напряженность электри-

ческого поля. Следовательно, в случае электрического пробоя электрическая прочность жидких и твердых диэлектриков больше, чем газообразных. Действительно, при нормальных условиях для воздуха $E_{пр} = 3 \cdot 10^6$ В/м, для жидких диэлектриков может достигать 10^8 В/м, для твердых (монокристаллов) — даже 10^9 В/м.

Электротепловой пробой, обусловлен прогрессивно нарастающим выделением теплоты в диэлектрике под дейст-

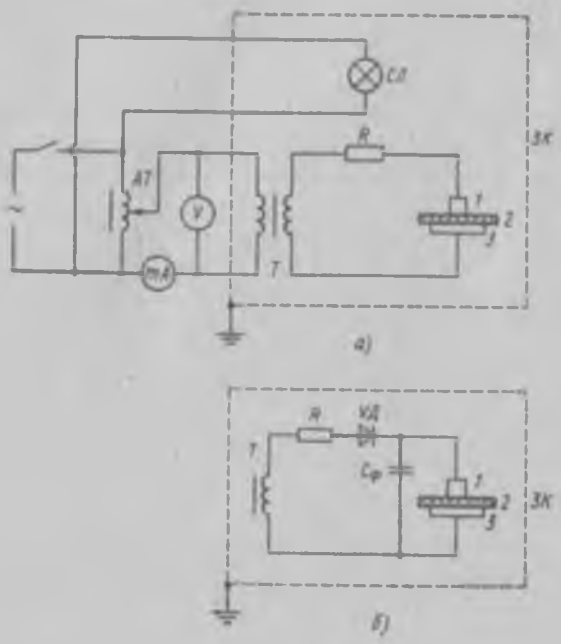


Рис. 5.30. Принципиальная схема измерения пробивного напряжения на частоте 50 Гц (*а*) и на постоянном напряжении (*б*)

вием диэлектрических потерь или электропроводности; его часто называют тепловым пробоем. Тепловой пробой возникает, когда нарушается равновесие между теплотой, выделяющейся в диэлектрике, и теплотой, которая отводится в окружающую среду. Если выделяющаяся теплота больше отводимой, то диэлектрик нагревается и в местах наихудшего теплоотвода температура возрастает до такого значения, что происходит прожог, проплавление, т. е. пробой. Время развития и величина $U_{пр}$ электротеплового пробоя зависят от конструкции электроизоляционного изделия (образца) и условий отвода выделяющейся в диэлектрике теплоты в окружающую среду. Тепловой пробой развивается в течение 10^{-3} — 10^{-2} с, т. е. во мно-

го (миллионы) раз медленнее электрического. Значение $E_{пр}$ составляет до 10^7 В/м.

Электрохимический пробой (электрическое старение) обусловлен медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, которые развиваются под действием электрического поля или разрядов в окружающей среде. Время развития электрохимического пробоя составляет 10^3 — 10^8 с и называется временем жизни $\tau_ж$ диэлектрика. С увеличением напряжения или температуры $\tau_ж$, как правило, уменьшается. Процесс электрохимического пробоя развивается в электрических полях, значительно меньших, чем электрическая прочность диэлектрика.

Возможны и другие разновидности механизмов пробоя, которые имеют место в этих трех типах пробоя, как отдельные стадии развития процесса потери электрической прочности. Различают ионизационный, электромеханический, электротермомеханический механизмы пробоя.

Ионизационный пробой возникает в результате действия на диэлектрик частичных разрядов в газовых порах. Разрушительное воздействие частичных разрядов на диэлектрик обусловлено многими факторами. Например, полимерные диэлектрики под действием частичных разрядов окисляются; образующиеся в результате частичных разрядов электроны и ионы, бомбардируя стенки пор, производят их эрозию, т. е. механически разрушают; образующиеся оксиды азота и озон химически разрушают полимер; наконец, разрушают стенки поры тепловое воздействие перегретого разрядом газового включения.

Электромеханический пробой наблюдается в полимерных диэлектриках при температурах, когда они находятся в высокоэластичном состоянии. Под действием сил электростатического притяжения, возникающих между электродами при высоком напряжении, происходит механическое сдавливание диэлектрика, уменьшение его толщины. При достижении критической деформации происходит механическое разрушение образца.

Электротермомеханический пробой является разновидностью электротеплового и наблюдается в хрупких диэлектриках, например в керамиках, содержащих поры. Вблизи ионизированных газовых включений образуются перегретые области диэлектрика. Их тепловое расширение больше, чем у менее нагретых областей. В результате в диэлектрике возникают механические напряжения, которые приводят к образованию в хрупком материале микротрещин и в конечном итоге к механическому разрушению.

Пробой газообразных диэлектриков. Воздух служит внешней изоляцией электроизоляционных узлов трансформаторов, высоковольтных выключателей, изоляторов линий электропередачи и других электротехнических устройств. Воздух и другие газообразные диэлектрики используют в изоляции конденсаторов, кабелей, рас-

пределительных устройств электростанций. Поэтому конструкции ких электротехнических изделий разрабатываются с учетом электрической прочности газов, в атмосфере которых они работают.

Газообразные диэлектрики обладают высокими электроизоляционными свойствами только при низких напряжениях. В сильных электрических полях, когда начинается процесс ударной ионизации, проводимость газов резко возрастает. Энергия ионизации молекул или атомов различных газов изменяется от 4 до 25 эВ. Такую энергию имеет электрон, если скорость его движения равна 1000 км/с. Вероятность ионизации перемещающимися в газе положительными ионами намного меньше, чем электронами. Это связано с тем, что положительные ионы обладают меньшей подвижностью. Если при столкновении с молекулами они производят ионизацию, то образовавшийся электрон притягивается к положительному иону и рекомбинирует с ним. Наконец, ускоренный до больших энергий ион при взаимодействии с электроном атома или молекулы газа передает ему незначительную часть энергии, так как его масса в тысячи раз больше массы электрона.

Пробой развивается следующим образом. Под действием внешнего ионизатора, например при фотоэмиссии электронов с катода, в разрядном промежутке образуются электроны. Эти первичные электроны, перемещаясь от катода к аноду, производят ударную ионизацию, в результате чего возникает и перемещается к аноду со скоростью 10^5 м/с первичная электронная лавина. На пути следования лавины образуется канал, состоящий из электронов и положительных ионов, плотность которых лавинно увеличивается и она тем больше, чем ближе фронт лавины расположен к аноду.

В ряде случаев ускоренный полем электрон при столкновении с частицами газа передает им свою энергию, однако ионизации не происходит. Энергия затрачивается на перевод в возбужденное состояние электронов в атомах или молекулах. В последующем электроны возвращаются в невозбужденное состояние, а запасенная избыточная энергия излучается в виде кванта света, фотона. Фотоны образуются и в результате рекомбинации электронов и ионов. Фотоны распространяются со скоростью света ($3 \cdot 10^8$ м/с), и их энергия в некоторых случаях достаточна, чтобы произвести фотоионизацию других атомов или молекул, расположенных далеко впереди фронта первичной лавины. В результате появляются вторичные, образовавшиеся за счет фотоионизации электроны, которые в свою очередь начинают процесс ударной ионизации и порождают новые электронные лавины, расположенные далеко впереди фронта первичной лавины.

На следующей стадии отдельные лавины нагоняют друг друга, сливаются и образуют сплошной канал. Более подвижные электроны быстрее перемещаются к аноду, поэтому канал в основном состоит из положительных ионов и его называют *стримером*. Стример имеет форму острия, обращенного к катоду. Вблизи острия — по-

ловки стримера — напряженность электрического поля повышена и образующиеся в разрядном промежутке электроны притягиваются к острию. В результате область близ головки стримера превращается в электропроводящую плазму, состоящую из положительных ионов и электронов. Часть электронов рекомбинирует с ионами, порождая фотоизлучение, которое вызывает вторично фотоионизацию. Образующиеся фотоэлектроны рождают новые, дочерние электронные лавины, и стример перемещается к катоду, а генерируемые фотоэлектроны втягиваются в область, занятую положительными ионами, превращая ее в электропроводящую плазму. Стример перемещается к катоду со скоростью 10^4 м/с.

Наконец, стример достигает катода, и электропроводящий плазменный канал замыкает разрядный промежуток. В результате ударов положительных ионов на поверхности катода образуется катодное пятно, излучающее электроны, которые со скоростью 10^7 м/с распространяются по электропроводящему плазменному каналу к аноду. Этот процесс наблюдается в разрядном промежутке как искра (искровой разряд). Пробивным напряжением газа является напряжение, при котором происходит искровой разряд. Если мощность источника напряжения достаточна для поддержания испарения металла катода и мощного дугового разряда, то между электродами загорается электрическая дуга (дуговой разряд).

Скорости распространения электронных лавин к аноду, стримера к катоду и электронов с катодного пятна к аноду большие, поэтому пробой газа в однородном поле развивается весьма быстро. Например, пробой промежутка 1 см при нормальных атмосферных условиях завершается за 10^{-8} — 10^{-7} с. Благодаря большой скорости развития пробой газов на переменном напряжении с частотой 50 Гц происходит, если амплитудное значение приложенного напряжения достигает пробивного напряжения промежутка на постоянном токе. При кратковременном воздействии напряжения разряд в газе может не оформиться и пробивное напряжение повышается. Такое увеличение характеризуют коэффициентом импульса $K_{имп} = U_{прим п}/U_{пр50}$, где $U_{пр\ имп}$ — пробивное напряжение при данном импульсе; $U_{пр50}$ — пробивное напряжение при постоянном и переменном напряжении с частотой 50 Гц. Коэффициент импульса зависит от формы импульса и однородности электрического поля в разрядном промежутке. При пробое промежутков с резко неоднородным полем $K_{имп}$ может достигать значения 1,5.

Для пробоя газа в однородном поле характерны зависимости электрической прочности от плотности газа и расстояния между электродами. Плотность газа прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна абсолютной температуре.

На рис. 5.31 показана зависимость $E_{пр}$ воздуха от давления на постоянном напряжении в однородном поле. Давление 0,1 МПа соответствует нормальному атмосферному давлению при 20 °С (101,3 кПа). С увеличением давления $E_{пр}$ растет потому, что на

меньшей длине свободного пробега электрон может набрать энергию, достаточную для ионизации при большей напряженности. При уменьшении давления $E_{пр}$ снижается, так как уменьшается число молекул в единице объема. Это приводит к уменьшению числа столкновений электронов с молекулами газа, а следовательно, и вероятности ионизации. При очень высоком вакууме пробой промежутка происходит за счет холодной эмиссии, «вырывания» электронов из поверхности катода. Для области, где $E_{пр}$ увеличивается с ростом давления, $U_{пр}$ воздушного промежутка рассчитывается по формуле $U_{пр} = U_{пр\,0}\,\delta$, где $U_{пр}$ — пробивное напряжение при данных давлении и температуре; $U_{пр0}$ — пробивное напряжение при нормальных условиях (давлении $P = 0{,}1$ МПа и температуре $t = 20°$ С); δ — отношение плотности воздуха при давлении p и температуре t (°С) к плотности воздуха при нормальных условиях: $\delta = 293 \cdot 10^{-3}\, p/(273 + t)$.

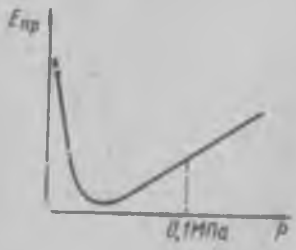


Рис. 5.31. Зависимость электрической прочности воздуха от давления

Изменение $E_{пр}$ воздуха в однородном поле при изменении расстояния h между электродами показано на рис. 5.32. При малых h электрическая прочность сильно увеличивается потому, что развитие процессов ионизации затрудняется из-за малой общей длины свободного пробега электронов.

Характерной для газов является зависимость $E_{пр}$ от произведения ph (закон Пашена). Такие установленные экспериментально зависимости для воздуха, водорода, аргона и неона показаны на рис. 5.33. Для каждого из газов имеет место свое минимальное $U_{пр}$, которое зависит от свойств материала катода. Чем выше работа выхода электрона с металла, тем больше $U_{пр}$. Для разных газов минимальное $U_{пр}$ лежит в пределах 200—300 В, для воздуха оно равно 330 В (для промежутка с медными электродами).

Электрическая прочность газа в однородном поле зависит от частоты приложенного напряжения. При частотах 50—100 Гц $U_{пр}$ воздуха практически совпадает с $U_{пр}$ на постоянном напряжении. При частоте $5 \cdot 10^6$ Гц оно уменьшается на 25 % от начального значения. Уменьшение вызвано искажением электрического поля между электродами положительным объемным зарядом (положительными ионами), образующимся в ходе ионизации. При такой частоте за время полупериода (10^{-7} с) положительный объемный заряд не успевает нейтрализоваться на катоде. В течение следующего полупериода, где электрическое поле, создаваемое приложенным напряжением, имеет противоположное направление, положительный объемный заряд усиливает электрическое поле, и это облегчает ионизацию, а поэтому $U_{пр}$ снижается. При больших частотах продолжи-

тельность полупериода напряжения становится меньше времени формирования электронных лавин, и для завершения пробоя необходимо повышать приложенное напряжение, $U_{пр}$ растет.

Пробой газа в неоднородном поле отличается от пробоя в однородном. Неоднородное поле образуется между острием и плоскостью, коаксиальными цилиндрами, между сферическими поверхностями, если расстояние между ними больше радиуса сферы. В тех местах между электродами, где напряженность имеет повышенное значение, начинается ударная ионизация уже при напряжениях, меньших характерного для данного промежутка пробивного на-

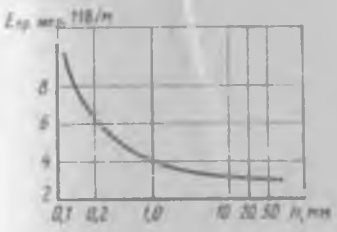


Рис. 5.32. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле при нормальных условиях на частоте 50 Гц

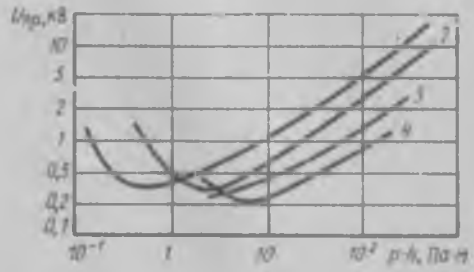


Рис. 5.33. Зависимость пробивного напряжения от произведения ph в однородном поле:

1 — для воздуха; *2* — для водорода; *3* — для аргона; *4* — для неона

пряжения. В результате возникает и локализуется в ограниченной зоне разряд в виде *короны*. Такую форму разряда называют *неполным пробоем газа*. Ионизированная плазма является проводником и, следовательно, продолжением электрода, около которого возникает корона. Из-за этого форма электрода изменяется так, что электрическое поле около него выравнивается. Максимальная напряженность электрического поля становится равной напряженности, минимально необходимой для ударной ионизации. Поэтому корона не распространяется на весь разрядный промежуток. При повышении напряжения корона переходит в искровой разряд, а при достаточной мощности источника — в дуговой.

Пробой жидких диэлектриков. Природа пробоя жидких диэлектриков во многом зависит от их чистоты.

Электрическая форма пробоя наблюдается в предельно чистых жидких диэлектриках. Электрический пробой развивается за время 10^{-8}—10^{-5} с. Другие виды пробоя жидкости завершаются за более длительное время. Поэтому электрический пробой наблюдается и в технически чистых жидких диэлектриках при малых временах выдержки образца под напряжением (малых экспозициях). На рис.

5.34 приведена типичная зависимость $E_{пр}$ технически чистого жидкого диэлектрика от времени выдержки под напряжением.

Процесс электрического пробоя начинается с инжекции электронов в жидкий диэлектрик с катода и образования электронных лавин. В ходе распространения лавин возникают стримероподобные образования, которые в результате процессов фотоионизации перемещаются от анода к катоду со скоростью 10^5 м/с. Пробой завершается, когда плазменный канал замыкает электроды. Плотность жидкости существенно больше плотности газа; следовательно, длина свободного пробега электронов, производящих ионизацию, здесь меньше. Поэтому энергию, достаточную для ионизации, электрон приобретает при напряженности в 100 раз большей, чем в газах. Электрическая прочность при электрической форме пробоя достигает предельных для жидких диэлектриков величин — 10^7 В/м.

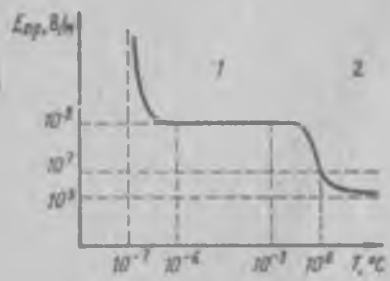


Рис. 5.34. Зависимость электрической прочности технически чистого жидкого диэлектрика от времени выдержки под напряжением при электрическом (*1*) и других механизмах (*2*) пробоя

При экспозициях, больших 10^{-2} с, пробой технически чистых жидких диэлектриков развивается из-за целого ряда различных процессов, протекающих по тепловому механизму.

В жидкости, содержащей газы, пробой начинается с ионизации газовых включений. В результате ионизации температура стенок газовых включений возрастает, что приводит к вскипанию микрообъемов жидкости, примыкающих к включению. Объем газа увеличивается, включения сливаются, образуя между электродами мостик, по которому проходит разряд в газе. Причиной пробоя может стать трудноудаляемый слой газа толщиной 10^{-6} м на электродах, которые используются для определения $E_{пр}$. Газы имеют малый коэффициент теплопроводности. Следовательно, слой газа на электродах образует участок с большим тепловым сопротивлением. В результате температура близ границы раздела жидкость — газ повышается, что приводит к вскипанию жидкости, а далее и к ее пробою. В процессе пробоя жидкости с большим содержанием газа (газовые включения), которые первоначально имеют сферическую форму, в электрическом поле деформируются. При деформации они превращаются в эллипсоиды вращения, удлиняются и сливаются образуя сплошной газовый канал между электродами, что приводит к пробою. Для жидких диэлектриков с газовыми включениями $E_{пр}$ увеличивается с ростом давления (рис. 5.35,*а*), так как увеличиваются температура кипения и растворимость газа в жидкости, что затрудняет рост объема газовых включений.

Механизм пробоя увлажненных жидкостей зависит от содержания и состояния воды в них. Вода, содержащаяся в жидком диэлектрике в свободном виде, может быть в эмульсионном состоянии, когда образуются сферические капельки воды с диаметром 10^{-6} м. В электрическом поле водяные включения втягиваются в пространство между электродами и деформируются. При деформации образуются эллипсоиды вращения, которые поляризуются и притягиваются друг к другу и, сливаясь, замыкают электроды мостиками с малым электрическим сопротивлением, по которым проходит разряд. Этим процессом объясняется уменьшение $E_{пр}$ трансформаторного

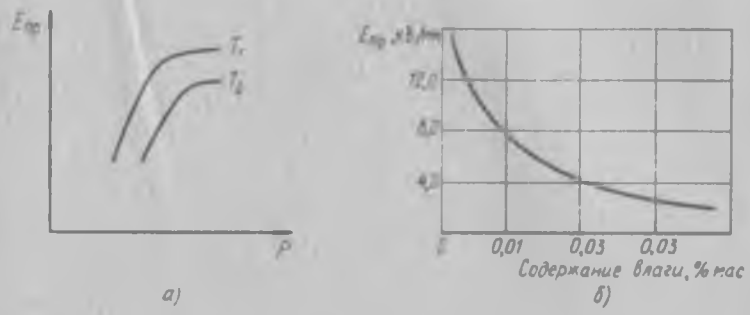


Рис. 5.35. Зависимость $E_{пр}$ от давления для жидкого диэлектрика, содержащего газовые включения при $T<T_2$ (*а*), и трансформаторного масла от увлажнения (*б*)

масла при его увлажнении (рис. 5.35,*б*). Электрическая прочность трансформаторного масла зависит от температуры (рис. 5.36). При температурах, близких к 0° С, содержащаяся в масле вода находится в эмульсионном состоянии и $E_{пр}$ имеет минимальное значение. С увеличением температуры вода переходит в растворенное состояние, т. е. отдельную ее фракцию и свободное состояние исчезает. В состоянии раствора примесь воды в меньшей степени снижает $E_{пр}$ трансформаторного масла. При температурах, больших 70° С, в трансформаторном масле начинается процесс кипения легких его фракций и количество газов увеличивается, что снижает $E_{пр}$. Увеличение $E_{пр}$ при понижении температуры до 40° С вызвано тем, что вода образует отдельную фракцию и замерзает. Электрическая прочность сухого масла имеет больше значение, чем увлажненного, и практически не изменяется до температуры 70 °С.

В загрязненной твердыми частицами жидкости частички загрязнений — волоконца, сажа, продукты разрушения твердой изоляции в электрическом поле — поляризуются, втягиваются в межэлектродное пространство и, так же как эмульсионная вода, образуют между электродами сплошные цепочки с пониженным электрическим сопротивлением. По этим цепочкам и проходит разряд.

Процесс перераспределения частичек примесей в межэлектродном пространстве, предшествующий пробою жидкости, протекает в течение длительного времени, до 10^3 с и более. Поэтому $E_{пр}$ загрязненных жидких диэлектриков при импульсном напряжении, когда перераспределение не успевает завершиться, больше, чем на постоянном напряжении. Коэффициент импульса при пробое здесь может быть равным 5—7.

В жидких диэлектриках, содержащих воздушные включения, протекают и процессы химического разложения жидкости под действием ионизации. Такое явление называют *вольтализацией жидкости*. В качестве электроизоляционных широко используются жидкости, состоящие из непредельных углеводородов. В ходе вольтализации таких жидкостей увеличиваются молекулярная масса и вязкость, выделяется водород, т. е. растет объем газовой фазы. Процесс ионизации газа во включениях протекает в электрических полях, намного меньших $E_{пр}$ жидкости, поэтому такой вид пробоя относят к электрохимическому. Эти процессы обусловливают электрическое старение жидких диэлектриков. Время подготовки пробоя в ходе вольтализации достигает 10^5 с и более.

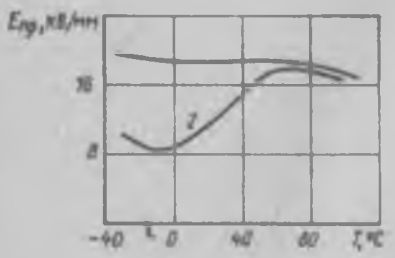


Рис. 5.36 Зависимость $E_{пр}$ на переменном напряжении от температуры для сухого (*1*) и увлажненного (*2*) трансформаторного масла

Электрическая прочность жидких диэлектриков в однородном поле большая, чем в неоднородном. В неоднородном поле в жидкости может наблюдаться неполный пробой (корона). Под действием короны происходят процессы интенсивного разложения жидкости, в результате которых образуются продукты, резко снижающие ее электрическую прочность. Например, при разложении нефтяных масел образуются горючие газы и сажа. Если коронный разряд переходит в дуговой, то процессы разложения резко ускоряются.

При повышении частоты до 10^6 Гц $E_{пр}$ трансформаторного масла — слабополярного жидкого диэлектрика — уменьшается, что вызвано его разогревом за счет диэлектрических потерь.

Пробой твердых диэлектриков. Развитие той или иной формы пробоя зависит от природы твердого диэлектрика и условий определения электрической прочности. При испытаниях на импульсах с длительностью 10^{-8} — 10^{-6} с в условиях, когда отсутствуют разряды у краев электродов, имеет место электрический пробой образца. Если проводимость такого диэлектрика велика и резко зависит от температуры, то при выдержке этого же образца под напряжением в течение 10^{-3} — 10^{-2} с в нем развивается тепловой пробой. При воздействии на образец в течение длительного времени

меньшими напряжениями, однако такими, при которых в диэлектрике происходят частичные разряды в газовых включениях или другие процессы, обусловливающие электрическое старение, наблюдается электрохимический пробой.

Для электрического пробоя твердых диэлектриков характерными являются следующие признаки. В сильных электрических полях в зависимости тока, протекающего через диэлектрик, от напряженности электрического поля отсутствует участок насыщения, характерный для газов и чистых жидкостей (см. рис. 5.4). При увеличении напряженности ток перед пробоем растет экспоненциально. Для самых различных по свойствам диэлектриков $E_{пр}$ изменяется в довольно узких пределах: 10^7 — 10^8 В/м. Величина $E_{пр}$ не зависит от

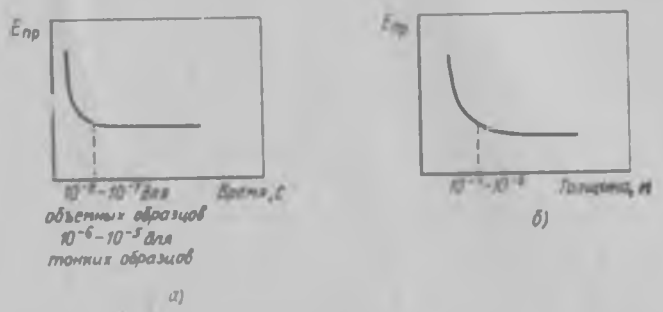


Рис. 5.37. Зависимость $E_{пр}$ при электрическом пробое твердых диэлектриков от времени выдержки под напряжением (а) и толщины образца (б)

свойств среды, окружающей образец. Электрическая прочность монокристаллических диэлектриков различается при пробое вдоль различных осей монокристалла. Величина $E_{пр}$ не зависит от времени выдержки образца под напряжением и его толщины (рис. 5.37). Пробой объемных образцов происходит в результате формирования одной лавины электронов и завершается в течение 10^{-8}—10^{-7} с. Поэтому при меньших временах выдержки пробой не успевает завершиться и $E_{пр}$ растет. Пробой тонких (толщиной 10^{-8} —10^{-5} м) диэлектрических пленок обусловлен формированием многих электронных лавин и поэтому требует более длительного времени — 10^{-6} —10^{-5} с. В таких образцах $E_{пр}$ увеличивается уже при выдержках под напряжением, меньших 10^{-6}—10^{-5} с. Для того чтобы в таких пленках образующиеся при пробое электронные лавины приобрели достаточную для пробоя мощность, необходимо увеличить напряженность электрического поля. Поэтому $E_{пр}$ при толщинах образца, меньших 10^{-7} — 10^{-6} м, увеличивается и может достигать значений 10^{10} В/м. При электрическом пробое $E_{пр}$ не зависит от температуры, что соответствует участку *A* на рис. 5.38 (кривая *1*). Однако в диэлектриках, которые имеют дефекты, обра-

зующие ловушки для электронов, возможна термическая ионизация ловушек, а следовательно, увеличение концентрации электронов и уменьшение $E_{пр}$ (участок *Б*). Электрическая прочность ионных кристаллов при импульсных напряжениях с ростом температуры может и несколько увеличиваться (рис. 5.38, кривая *2*). Это вызвано торможением электронов в зоне проводимости при их взаимодействии с ионами узлов кристаллической решетки. При электрическом пробое в однородном поле $E_{пр}$ больше, чем в неоднородном.

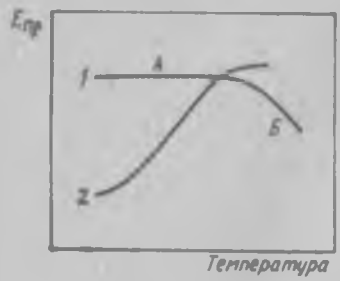


Рис. 5.38. Зависимость $E_{пр}$ при электрическом пробое твердых диэлектриков от температуры

Величина $E_{пр}$ неоднородных по свойствам диэлектриков зависит от площади электродов. Чем больше площадь электродов, тем большее число дефектов в диэлектрике попадает в объем между электродами. Такое уменьшение $E_{пр}$ характерно для бумаг, картонов и лакотканей, которые могут содержать различные включения с незначительным электрическим сопротивлением, для пористых керамик, где возможна ионизация газа в порах.

Для электротеплового пробоя характерно следующее. Пробой, как правило, происходит в том месте образца, где условия теплоотвода наихудшие. Величина $U_{пр}$ зависит от условий теплоотвода, т. е. от свойств той среды, в которую при испытаниях помещается образец. За время более длительной выдержки под напряжением диэлектрик нагревается за счет диэлектрических потерь больше, поэтому $E_{пр}$ снижается (рис. 5.39, *а*). При пробое толстых образцов теплоотвод от их внутренних областей затруднен, поэтому они перегреты больше. Следовательно, при увеличении толщины образца $E_{пр}$ уменьшается (рис. 5.39, *б*).

При тепловом пробое $E_{пр}$ уменьшается с ростом температуры окружающей среды (рис. 5.39, *в*). Уменьшение вызывается ростом теплоты, выделяющейся в образце за счет диэлектрических потерь, и уменьшением теплоты, отводимой от образца в окружающую среду. На постоянном напряжении диэлектрические потери вызываются электропроводностью и определяются электрическим сопротивлением образца. Для плоского конденсатора их рассчитывают по формуле $P = U^2/R = U^2/(\rho_r h)$. На переменном напряжении с учетом (5.19) потери можно рассчитать по формуле $P = 5{,}56 \cdot 10^{-11} \times \times U^2 \varepsilon_r f \operatorname{tg} \delta S/h$. Выделяющаяся в диэлектрике теплота отводится через электроды и рассеивается с их поверхности, суммарная площадь которой равна $2S$. Теплоотводом с торцевых поверхностей обычно пренебрегают. Отводимая мощность рассчитывается по формуле $P_{отв} = \sigma_T 2S\ (T - T_0)$, где σ_T — суммарный коэффициент

теплоотвода от диэлектрика в окружающую среду, Вт (м·К); T — температура диэлектрика. Если $P > P_{отв}$, то под действием приложенного напряжения температура диэлектрика увеличивается, что с течением времени приводит к его тепловому разрушению — проплавлению, прожогу, другим подобным явлениям. Пробивное напряжение рассчитывают из условия, что $P = P_{отв}$. С ростом температуры T_0 уменьшаются ρ_v и $P_{отв}$, растет tgδ, а поэтому $E_{пр}$ уменьшается.

Механизмы электрохимического пробоя различаются в органических и неорганических диэлектриках.

Основной причиной электрического старения полимеров являются частичные разряды, особенно интенсивные на переменном на-

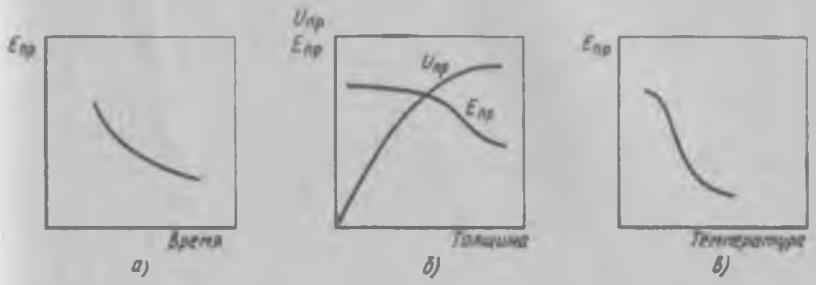


Рис 5.39. Зависимость $E_{пр}$ при электротепловом пробое твердых диэлектриков от времени приложения напряжения (*а*), толщины образца (*б*) и температуры (*в*)

пряжении. Под действием частичных разрядов в газовом включении протекают различные процессы, которые приводят к разрушению диэлектрика в объеме, примыкающем к газовому включению. Одним из таких процессов является образование дендритов — ветвящихся тонких (диаметром 1 мкм) трубочек, заполненных образующимся в результате разложения полимера газом. Дендриты в ходе роста ветвятся и с течением времени пронизывают всю толщу диэлектрика, замыкая электроды заполненным газом каналом, по которому происходит пробой изоляции. Такой механизм пробоя наблюдается в бумажно-масляной изоляции кабелей, в изоляции на основе эпоксидных смол. Если изоляция работает в условиях повышенной влажности, то могут развиваться и водные дендриты. В слоистой изоляции на основе полимерных пленок под действием частичных разрядов происходит разрушение поверхности пленки. В результате уменьшения толщины уменьшается ее пробивное напряжение.

Старение неорганических диэлектриков протекает более интенсивно на постоянном напряжении. В процессе ионной электропроводности происходит перенос ионов, т. е. вещества, что приводит к необратимому изменению химического состава материала в объеме образца или изделия. Поэтому $E_{пр}$ диэлектрика может уменьшить-

ся и произойдет его пробой. На рис. 5.40 в качестве примера приведены зависимости $E_{пр}$ фарфора от количества прошедшего через образцы электричества. Видно, что процесс старения протекает даже и после протекания через образец большого количества электричества. Если электропроводность неорганического диэлектрика электронная, то в электрическом поле в нем развиваются электрохимические процессы, которые подготавливают инжекцию электронов или дырок с электродов, что приводит к пробою.

Скорость процесса электрического старения возрастает при увеличении напряженности электрического поля. Время $\tau_{ж}$ развития электрохимических процессов электрического старения при постоянной температуре органических и неорганических диэлектриков можно рассчитать по эмпирической формуле $\tau_{ж} = AE^{-m}$, где A — постоянная, зависящая от условий старения; m — показатель, определяемый экспериментально и изменяющийся в широких пределах: 3—14. Время жизни уменьшается с ростом температуры по экспоненциальному закону $\tau_{ж} = \tau_0 \exp\left(\frac{W}{kT}\right)$, где W — энергия активации процесса старения, Дж; k — постоянная Больцмана, Дж/К; T — температура, К.

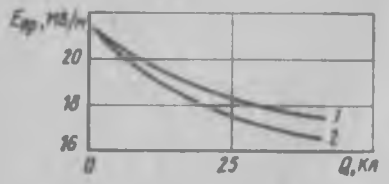


Рис. 5.40 Зависимость $E_{пр}$ высоковольтного фарфора от количества электричества, прошедшего через образцы толщиной 7 мм:

1 — направления пробивного и поляризующего напряжений совпадают; 2 — не совпадают (по Х. С. Валеева)

Изменение электрической прочности при облучении. Электрическая прочность при электрической форме пробоя не изменяется, если в материале под действием ионизирующих излучений не произошли необратимые физико-химические процессы деструкции материала.

Ионизирующие излучения большой мощности вызывают нагрев вещества и уменьшают его теплопроводность, что снижает $E_{пр}$ при тепловом пробое диэлектрика. При облучении в диэлектрике могут наблюдаться газовыделение и ионизация газа в порах. Эти процессы ускоряют разрушение и снижают электрическую прочность диэлектрика, как и частичные разряды, возникающие в диэлектрике в электрическом поле.

Глубина необратимых превращений в структуре и сопутствующее им снижение электрической прочности электроизоляционных материалов зависят от поглощенной дозы ионизирующих излучений. Электрическая прочность деструктирующихся при облучении полимеров уменьшается при такой поглощенной дозе, когда резко ухудшаются их механические свойства. В полимерах, которые при облучении сшиваются, $E_{пр}$ уменьшается при такой поглощенной дозе, где образец разрушается в результате нарастания хрупкости.

Например, $E_{пр}$ стеклослюдинитов и стекломиканитов, стеклотекстолитов и стеклотканей, эпоксидных и полиуретановых наполненных компаундов не изменяются при облучении на воздухе или в вакууме до поглощенных доз 10^7 Гр. Политетрафторэтилен (фторопласт-4) при облучении деструктируется, образцы из него разрушаются при наборе дозы 10^6 Гр и теряют свою электрическую прочность. В структуре полиэтилентерефталата (лавсана) при облучении происходят сшивания и электрическая прочность такой пленки не изменяется до поглощенной дозы 10^8 Гр. Однако образцы облученной пленки настолько хрупки, что разрушаются при незначительных механических воздействиях. Наиболее стойкими к облучению являются керамические электроизоляционные материалы.

Поверхностный пробой. Поверхностный пробой или перекрытие наблюдается не только при испытании образцов диэлектриков с большой электрической прочностью (см. рис. 5.27). В электроизоляционных конструкциях, таких, как всевозможные фарфоровые и пластмассовые электрические изоляторы, фарфоровые покрышки электрических вводов высокого напряжения и их внутренняя изоляция, работающая в трансформаторном масле, при неблагоприятных условиях возникают поверхностные пробои и даже может образоваться поверхностная корона.

Увлажнение и загрязнение приводят к искажению распределения потенциала и тока утечки на поверхности твердого диэлектрика, вследствие чего пленка влаги в отдельных местах испаряется. При разрыве проводящей пленки в разных местах на поверхности возникают мощные искры, под действием которых в материале могут образовываться проводящие каналы — треки.

Повреждение поверхности твердого диэлектрика вследствие поверхностного пробоя, вызывающего образование проводящих следов, называется *трекингом диэлектрика*. Способность диэлектрика выдерживать воздействие поверхностных пробоев без трекинга характеризуется трекингостойкостью. Трекингостойкость определяется по времени $t_{тр}$, в течение которого при стандартных формах электродов и напряжении на них $U_{тр}$ ток, протекающий между электродами по поверхности диэлектрика, достигает заданного значения $I_{тр}$. Во время испытаний поверхность диэлектрика, расположенная между электродами, смачивается электролитом путем падения на нее определенного числа капель или нанесения на поверхность тонкого, медленного стекающего слоя электролита. Возможны загрязнение поверхности синтетической пылью и последующее ее увлажнение.

Поверхностный искровой разряд существенно не повреждает поверхность неорганических диэлектриков. Однако при мощном дуговом разряде происходит оплавление приповерхностных слоев даже фарфоровых изоляторов, а поверхность органических диэлектриков обугливается и на ней образуется сплошной проводящий след.

Способность диэлектрика выдерживать воздействие на его поверхность электрической дуги без недопустимого ухудшения свойств называют *дугостойкостью*. Дугостойкость диэлектрика на переменном напряжении частоты 50 Гц определяется током дуги $I_д$ и временем $t_д$. При определении $t_д$ близ поверхности плоского образца диэлектрика размещают два электрода, к которым приложено напряжение 1000 В, и горит дуга, ток которой равен $I_д$. Возникающая дуга воздействует на поверхность диэлектрика, в результате чего через время $t_д$ на поверхности образуется токопроводящая перемычка.

При разработке многих электроизоляционных изделий их поверхность конструируется такой, чтобы предотвратить при загрязнении и увлажнении образование поверхностных искровых разрядов и короны. Например, поверхность изоляторов выполняется ребристой, что удлиняет путь поверхностного разряда, а следовательно повышает его напряжение. Ребра изолятора образуют также и участки на его поверхности, защищенные от смачивания во время дождя.

Напряжение поверхностного перекрытия диэлектрика в газе может быть увеличено, если повысить давление.

§ 5.6. Механические, термические и физико-химические свойства диэлектриков

Механические свойства диэлектриков. Они характеризуют способность диэлектрика выдерживать внешние статические и динамические нагрузки без недопустимых изменений первоначальных размеров и формы. Статическая нагрузка на материал при эксплуатации или испытаниях плавно возрастает с обусловленной скоростью, динамическая воздействует мгновенно, рывком, ударом, быстро изменяясь по величине и (или) направлению.

Способность диэлектрика выдерживать статические нагрузки характеризуется разрушающим напряжением при растяжении, сжатии или изгибе, пределом текучести, относительным удлинением при разрыве, относительной деформацией при сжатии и другими характеристиками. Перечисленные параметры определяются стандартизированными методами.

Для испытаний используют образцы определенной формы и размеров. Например, определение прочности на разрыв тонких листов бумаги и картона производят на образцах в виде полосок шириной 15 мм (для бумаги) или 50 мм (для картона), длиной 180 или 100 мм. При статических испытаниях анизотропных листовых материалов образцы вырезают вдоль и поперек рулона; образцы, вырезанные вдоль рулона, имеют большее разрушающее напряжение и меньшее относительное удлинение при растяжении по сравнению с образцом, вырезанным поперек рулона.

Для пластмасс важным параметром является сопротивление раскалывания. Для его определения используют об-

разцы размерами 15×15×10 мм. В ходе испытаний в торец образца, размещенного на нижней опорной плите разрывной машины, вдавливается клин, укрепленный на верхней плите. Сопротивление раскалывания рассчитывается по формуле $S_р = F/b$, где F — наибольшая нагрузка в момент раскалывания образца, Н; b — ширина средней части образца, м.

Механические свойства гибких материалов (бумага, лакоткани, пленки) характеризуются таким условным параметром, как стойкостью к надрыву. Для его определения используют полоски материала шириной от 8 до 20 мм. Полоска пропускается в закрепленную в верхнем зажиме разрывной машины скобу, перегибается на 180°, после чего оба ее конца закрепляют в нижнем зажиме. Скоба имеет форму полукольца. В зависимости от ширины полоски радиус полукольца может иметь размеры от 5 до 13 мм. Таким образом, при натяжении полоски наибольшие усилия передаются на ее края. Стойкость к надрыву численно равна нагрузке в ньютонах, при которой происходит надрыв краев полоски.

Твердостью называют способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого материала. В большинстве случаев при определении твердости электроизоляционных материалов, используется статический метод вдавливания индентера в поверхность образца при заданной нагрузке. Обычно индентер представляет собой полированный шарик из закаленной стали с диаметром 5 мм. Твердость H (Н/мм²) определяется глубиной вдавливания индентера по истечении 30 с после нагрузки и рассчитывается по формуле $H = F/(\pi dh)$, где F — нагрузка, Н; d — диаметр шарика, мм; h — глубина вдавливания.

Способность диэлектрика выдерживать динамические механические нагрузки характеризуют ударной вязкостью и стойкостью к вибрации. Удельная ударная вязкость — отношение энергии удара при изломе образца к площади его поперечного сечения. Она характеризует прочность материала при динамическом изгибе. В таком режиме работают многие узлы электротехнического оборудования, выполненные из пластмасс, слоистых пластиков и других материалов. Ударную вязкость измеряют с помощью маятниковых копров, схема работы которых приведена на рис. 5.41. Тяжелый маятник *1* поднимают на высоту h_2 и фиксируют. Образец *2* испытуемого материала, который имеет форму бруска без разреза и с разрезом посередине для вязких материалов, размещают на двух опорах копра. При освобождении фиксатора маятник падает, ломает образец и поднимается по инерции на высоту h_1, которая зависит от свойств испытуемого материала. Разность потенциальных энергий маятника в положениях h_2 и h_1 определяет работу удара $A_{уд} = G(h_2 - h_0)$, где G — вес маятника, Н. Удельная ударная вязкость $W_{уд}$ (Дж/м² или Н·м) рассчитывается по формуле $W_{уд} = A_{уд}/S$, где S — площадь поперечного сечения образца, м².

Стойкость материалов и изделий к вибрациям определяется отсутствием механических повреждений, нарушением герметичности в случае герметизированных конструкций, сохранением в заданных пределах электрических параметров изоляции после воздействия в течение определенного времени вибрации с заданчыми параметрами (амплитудой ускорения, диапазоном частот и др.). Для вибрационных испытаний материалов и изделий используются специальные вибрационные стенды.

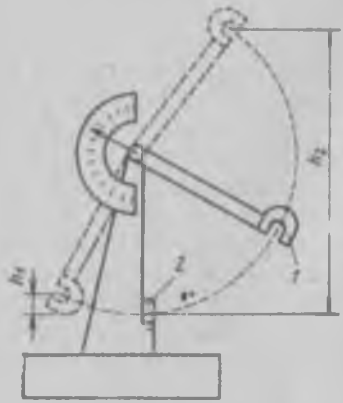


Рис 5.41. Схема работы маятникового копра для определения ударной вязкости материалов

Для многих электроизоляционных материалов важным параметром является **гибкость**, которая обеспечивает сохранение высоких механических и электрических параметров изоляции при самых разнообразных механических деформациях. Методы определения гибкости основаны на определенин числа перегибов тонкого материала, вызывающих его разрушение. Гибкость определяют с помощью приборов, называемых эластометрами. Для испытаний используют образец в виде полоски 25×200 мм, котоpан располагается вертикально и зажимается между двумя парами губок. Верхняя пара губок может поворачиваться вокруг горизонтальной осн на заранее установленный угол. К нижней паре губок подвешивается чашка с грузами. Гибкость определяется числом двойных перегибов, которые доводят образец до разрыва. При определении гибкостн лаковых пленок тонкую медную фольгу с нанесенной лаковой пленкой изгибают вокруг стержней разных диаметров. Показателем гибкости служит наименьший диаметр стержня, при изгибе вокруг которого пленка еще не растрескивается.

Термические свойства диэлектриков. Поведение диэлектрика при нагреванин характеризуется рядом свойств, которые в совокупности определяют его допустимую рабочую температуру. К важнейшим термическим свойствам материала относятся теплопроводность, теплоемкость, плавление и размягчение материала, тепловое расширение, нагревостойкость, стойкость к термоударам.

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

прошедшей за единицу времени через единицу площади при градиенте температуры 1 К/м. Как правило, диэлектрики являются плохими проводниками теплоты λ их мал. Коэффициент теплопроводности имеет значение для газов $(2 \div 5) \cdot 10^{-2}$, а для твердых диэлектриков 0,02—3,0 Вт/(м·К).

Теплоемкость C [Дж/(кг·К)] вещества определяет то количество теплоты Q (Дж), которое необходимо для нагрева тела массой m (кг), от температуры T_0 до T (К) и входит в уравнение $Q = Cm(T - T_0)$. Время нагрева или охлаждения электроизоляционных конструкций зависит от теплоемкости используемых в них материалов, теплоемкость определяет количество теплоты, необходимой для их нагрева в ходе технологии изготовления и целый ряд других процессов. Удельная теплоемкость некоторых диэлектриков при нормальных температурах имеет значения: щелочные алюмосиликатные стекла — 300—1000 Дж/(кг·К), электротехнический фарфор и стеатит — 800—900, органические полимеры — 1200—2200, нефтяные электроизоляционные масла — 1800—2500, вода — 4200 Дж/(кг·К).

Твердые кристаллические диэлектрики при нагреве плавятся и для них характерным параметром является температура плавления $T_{пл}$ (К). Аморфные материалы переходят из твердого состояния в жидкое в интервале температур. Такой переход характеризуют температурой размягчения $T_{разм}$. Температуру размягчения таких диэлектриков, как битум, воск, и некоторых видов компаундов определяют методом «кольца и шара». Для этого испытуемый диэлектрик заливается в цилиндрическое кольцо до самого верха (рис. 5.42, *а*). После затвердевания диэлектрика кольцо помещают на стойку и в центре поверхности кладут стальной шар. Стойку помещают в сосуд с жидкостью. При нагревании происходит размягчение диэлектрика и под нагрузкой, создаваемой шариком, он выдавливается из кольца. За $T_{разм}$ принимают температуру, при которой выдавленная масса коснется пластины, расположенной на глубине h.

Температура размягчения пластмасс определяется по Вика (рис. 5.42, *б*). Образец нагревают в термостате и одновременно подвергают воздействию сжимающего усилия. Усилие создается нагрузкой 10 или 50 Н и передается на образец через стержень и индентер в виде трубочки с диаметром 1,13 мм и длиной 3 мм. За $T_{разм}$ жестких пластмасс принимают температуру, при которой индентер внедрится в образец на глубину 1 мм. Температура размягчения пластмасс и других материалов определяется также при одновременном воздействии температуры и изгибающей нагрузки на образец. Так определяют $T_{разм}$ по Мартенсу (рис. 5.42, *в*). Образец располагают вертикально, закрепляя консольно в нижнем зажиме. Верхний зажим жестко скреплен с рейкой-рычагом, на которой перемещается груз. Таким образом можно изменять изгибающую нагрузку. Деформацию образца при нагреве контролируют с помо-

щью указателя деформации. За $T_{разм}$ принимают температуру, где фиксируемая указателем деформация равна 6 мм. Стандартом предусмотрено определение $T_{разм}$ по прогибу расположенного горизонтально на двух опорах стержня из диэлектрика под действием нагрузки, которая прикладывается к середине стержня. Стержень имеет размеры 110×10×4 мм. За $T_{разм}$ принимают температуру, при которой прогиб составит 0,33 мм.

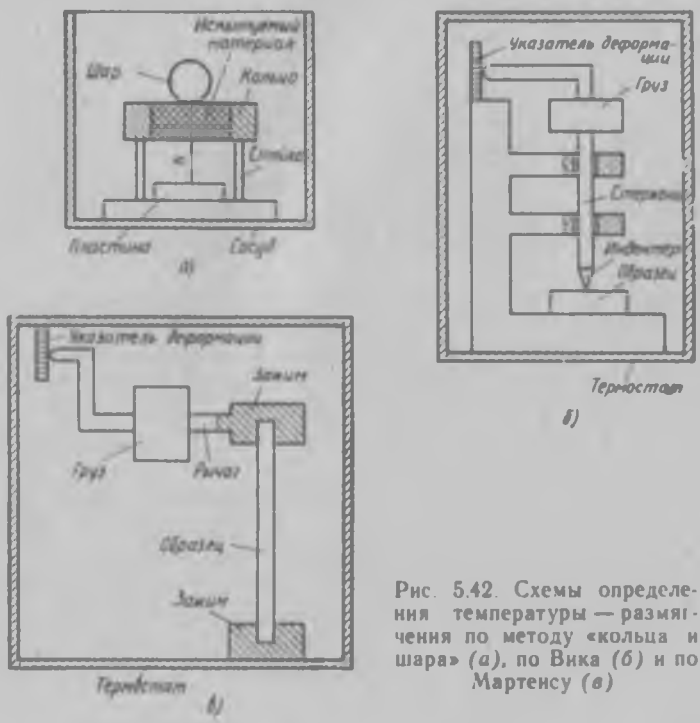


Рис. 5.42. Схемы определения температуры — размягчения по методу «кольца и шара» *(а)*, по Вика *(б)* и по Мартенсу *(в)*

Диэлектрик, как и другие материалы, при нагревании расширяется. Термическое расширение оценивают температурным коэффициентом длины ТКl ($К^{-1}$) и температурным коэффициентом объема ТК V ($К^{-1}$). Температурный коэффициент объема равен утроенному коэффициенту длины: ТКV = 3ТКl. Значение ТК l большинства диэлектриков изменяется в пределах $(0{,}3 \div 20) \cdot 10^{-6} К^{-1}$. Весьма мал ТК l кварцевого стекла: $0{,}055 \times 10^{-6} К^{-1}$, поэтому изделия из него не разрушаются при резких перепадах температур. В композиционном электроизоляционном материале, состоящем из диэлектриков с разными ТК l, при нагревании или охлаждении возникают внутренние механические напряжения. При многократном повторении цикла нагрев — охлаждение в таких материалах образуются трещины, расслоения и другие механические

повреждения, сопровождаемые резким снижением их электрических параметров.

Для жидких и аморфных вязких материалов (смол, компаундов) важным параметром является в я з к о с т ь. Вязкость свойственна текучим телам, где имеет место сопротивление перемещению одной части (одного слоя) тела относительно другой. Это сопротивление характеризуется д и н а м и ч е с к о й вязкостью (Па·с) и кинематической вязкостью ($м^2/с$), равной отношению динамической вязкости к плотности материала. На практике пользуются у с л о в н о й вязкостью (ВУ), которая связана с динамической и кинематической эмпирическими соотношениями. Условная вязкость измеряется с помощью вискозиметров разных типов. С помощью капиллярных или универсальных вискозиметров ВУ измеряется по времени истечения заданного объема жидкости через капилляр или сопло заданного диаметра. В ротационных вискозиметрах испытуемая жидкость загружается в пространство между коаксиальными цилиндрами, один из которых неподвижный, а другой вращается. ВУ определяется по затрате мощности на вращение цилиндра. Вязкость определяет электрические свойства электроизоляционных материалов и такие технологические процессы производства электрической изоляции, как пропитка твердых материалов лаками, компаундами, прессование материалов и изделий из них. Вязкость минерального масла определяет конвекционный теплоотвод от нагретых частей в окружающую среду в масляных трансформаторах, выключателях и других устройствах.

В процессе эксплуатации материалы и изделия подвергаются воздействию различных старящих их факторов. В первую очередь к ним относятся нагрев и электрическое напряжение. Одновременно могут воздействовать влажность, химически активные вещества, радиация, механические нагрузки, в том числе вибрационные, глубокое охлаждение и целый ряд других. Способность электрической изоляции без повреждения и без недопустимого ухудшения практически важных для нее свойств выдерживать действие одного или нескольких факторов в течение времени, сравнимого со сроком эксплуатации, определяет ее стойкость к воздействию таких факторов.

Н а г р е в о с т о й к о с т ь электрической изоляции определяют по изменениям ее электрической прочности, тангенсу угла диэлектрических потерь, потере массы, механической прочности, а также других параметров при выдержке при повышенных по сравнению с рабочей температурах. Например, при температуре размягчения сильно снижается механическая прочность диэлектрика и деформация изделий увеличивается до опасных пределов и они выходят из строя.

Поэтому оценкой нагревостойкости материала может служить $T_{разм}$ по Мартенсу. Критерием выхода из строя изоляции может служить также уменьшение ее электрической прочности вдвое по сравнению со значением до испытаний. Показателем нагревостой-

кости может быть также и время выхода из строя всех образцов при каждой температуре испытаний.

Материалы, используемые в изоляции электрических машин, трансформаторов и аппаратов, по нагревостойкости разделяют на семь классов. Для каждого класса устанавливается определенная максимальная температура, при которой материал может длительно работать без ухудшения свойств (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Обозначение класса	Температура, характеризующая класс, К (°С)	Основные группы электроизоляционных материалов, соответствующие данному классу
Y	363 (90)	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, натурального шелка и полиамидов; пластмассы с органическим наполнителем, не пропитанные связующим составом; поливинилхлорид; вулканизированный натуральный каучук
A	378 (105)	Волокнистые материалы, пропитанные масляными, масляно-смоляными и другими лаками; изоляция эмалированных проводов на поливинилацеталевых лаках; полиамидные смолы
E	393 (120)	Синтетические волокна, пленки, смолы, слоистые пластики, пластмассы на термореактивных связующих; изоляция эмалированных проводов на эпоксидных лаках; поликарбонатные пленки
B	403 (130)	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна в сочетании с органическими связующими и пропитывающими составами соответствующей нагревостойкости; политрифторхлорэтилен
F	428 (155)	Те же материалы в сочетании с синтетическими связующими; изоляция эмалированных проводов на полиэфирамидных и полиэфирциануратных лаках
H	453 (180)	Те же материалы с кремнийорганическим связующим; кремнийорганические эластомеры

Для материалов, работающих при больших температурах, классы нагревостойкости характеризуются температурами 200, 220 и 250 °С, а при еще более высоких — 275, 300 °С и так далее через каждые 25 °С.

Изоляция целого ряда электротехнического и радиоэлектронного оборудования должна сохранять свои свойства при охлаждении до — (60÷70) °С, а в ряде случаев и при температуре жидкого азота (— 196 °С), водорода (—252 °С) и гелия (—268,7 °С). При низких температурах электрические свойства диэлектриков, как

правило, улучшаются. Но механические свойства эластичных и гибких в нормальных условиях материалов при низких температурах изменяются, они становятся жесткими, хрупкими и легко разрушаются, особенно при вибрациях. Холодостойкость электрической изоляции определяется путем сравнения механических характеристик при отрицательной и нормальной температурах. Например, измеряют деформации при растяжении при низкой и при нормальной температурах, возникающие под действием одинакового усилия, и рассчитывают коэффициент холодостойкости: $K_{хол} = l_2/l_1$. Холодостойкость определяется предельно низкой температурой $T_{хол}$, при которой $K_{хол}$ остается еще постоянным.

Стойкость к термоударам определяется для хрупких материалов и изделий из них. Например, изоляторы из электротехнического фарфора должны выдерживать трехкратное нагревание без заметного ухудшения основных свойств. При определении стойкости к термоударам нагретые изоляторы погружают в ледяную воду, где выдерживаются определенное время. После выдержки кондиционируются на воздухе при комнатной температуре. Далее цикл нагрев — охлаждение повторяют. После трех циклов термоударов изоляторы кондиционируются и подвергаются электрическим испытаниям.

Физико-химические свойства диэлектриков. Электроизоляционные материалы имеют самую различную стойкость к разрушению (коррозии) при контактировании с водой, кислотами, щелочами, солевыми растворами, маслами, топливами, газами. При определении химостойкости образцы длительное время выдерживаются в условиях, наиболее близких к эксплуатационным, после чего определяют изменение их внешнего вида, массы, электрических и других параметров. Например, в нефтяных маслах при эксплуатации происходит коррозия погруженных в масло изоляции и металлов, в процессе которой образуются кислоты и масло стареет. Кислоты содержат и плохо очищенное масло. Количество кислоты в масле характеризуется кислотным числом, равным количеству граммов едкого калия, необходимого для нейтрализации всех свободных кислот, содержащихся в 1 кг испытуемого материала.

Влагостойкость диэлектрика определяется его способностью сорбировать влагу из окружающей среды (влажного воздуха). В процессе выдержки во влажной атмосфере контролируют изменение таких параметров диэлектрика, как удельное объемное сопротивление, электрическая прочность, сопротивление изоляции и другие. Параллельно определяют влагопоглощение образца: $w_a = 100\ (m_t - m)/m$, где m — начальная масса образца, m_t — масса образца после его выдержки в течение времени во влажной атмосфере.

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

Под действием ионизирующих излучений (ИИ) могут происходить необратимые изменения структуры диэлектрика, которые называют радиолизом. В полимерах радиолиз приводит к структурированию — образованию связей между молекулами, а также к деструкции — разрушению молекул. В результате изменяются физико-химические свойства полимеров (температура плавления кристаллических полимеров, термопластичность, химическая стойкость, растворимость), механические свойства (разрушающее напряжение, модуль упругости, хрупкость); электрические свойства (электрическая прочность, удельное объемное и поверхностное сопротивление). Радиолиз керамических диэлектриков происходит в результате поглощения значительно больших доз ИИ. В процессе действия ИИ контролируются изменения прежде всего механических свойств диэлектрика. Во многих случаях необратимые изменения механических свойств определяют изменения электрических свойств — электрической прочности и электрического сопротивления диэлектрика.

Тропикостойкость диэлектрика определяется по изменению удельного объемного сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь, электрической и механической прочности, а также других параметров под воздействием тропических климатических факторов. Для районов с тропическим влажным или сухим климатом, с тропическим морским климатом характерными являются следующие факторы: холод, жара, влага, солнечная радиация, атмосфера, загрязненная морской солью, пустынной или степной пылью, песком, пеплом, химическими соединениями, воздействие микроорганизмов — плесневых грибов и бактерий, вредителей животного мира — термитов, муравьев, тараканов, грызунов и других представителей фауны.

Контрольные вопросы

1. Почему диэлектрики проводят ток? Какие параметры характеризуют электропроводность?
2. Чем вызвана электропроводность газов, жидких и твердых диэлектриков?
3. От каких факторов зависит проводимость диэлектриков?
4. Почему диэлектрики поляризуются? Какие параметры характеризуют поляризацию?
5. Что представляют собой быстрые и медленные виды поляризации?
6. Что представляют собой диэлектрические потери? Какие параметры их характеризуют?
7. От каких факторов зависят диэлектрические потери?
8. Почему диэлектрики теряют электрическую прочность? Какие параметры характеризуют пробой?
9. Что представляют собой процессы электрического, электротеплового и электромеханического пробоя?
10. Какими параметрами характеризуются механические, термические и физико-химические свойства диэлектриков?
11. Каким образом связаны механические, термические и физико-химические параметры с электрическими свойствами диэлектриков?

ГЛАВА 6. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 6.1. Газообразные диэлектрики

Преимуществами газов перед остальными видами диэлектрических материалов являются высокое удельное сопротивление, малый тангенс угла диэлектрических потерь, малая (близкая к единице) диэлектрическая проницаемость. Наиболее важным свойством газов является их способность восстанавливать электрическую прочность после разряда.

Кроме воздуха в качестве электрической изоляции широко используют двух- и трехатомные газы — азот, водород, углекислый газ. Электрические прочности этих газов при нормальных условиях мало отличаются друг от друга и могут с достаточной точностью приниматься равными прочности воздуха. В табл. 6.1 приведены отношения электрической прочности некоторых газов, включая и высокопрочные $E_{пр\,г}$, к электрической прочности воздуха $E_{пр\,в}$, которая принята за единицу. В этой же таблице даны точки кипения газов при нормальном давлении.

Таблица 6.1

Газ	Плотность, кг/м³	Температура кипения, °С	$E_{пр\,г}/E_{пр\,в}$
Азот	1,25	−196	1,0
Гексафторид серы (элегаз)	6,70	−64	2,3
Дихлорфторметан (фреон-12)	6,33*	−30	2,4
Гексафторэтан	9,01	−78	2,0
Трифторметилпентафторсера	—	−20,4	3,05

* При −30 °С

Лучше всего требованиям к газам, применяемым в электроизоляционных конструкциях, удовлетворяют элегаз SF_6 и фреон CCl_2F_2. Гексафторэтан нельзя использовать при повышенных давлениях из-за низких критических параметров ($P_{кр}$ = 3,3 МПа, T = −24 °С).

Азот имеет с воздухом практически одинаковую электрическую прочность и часто применяется вместо него для заполнения газовых конденсаторов и других целей, так как не содержит кислорода, оказывающего окисляющее влияние на соприкасающиеся с ним материалы.

Значительный интерес представляет водород, имеющий весьма высокий коэффициент теплопроводности, несмотря на его меньшую электрическую прочность по сравнению с воздухом. Водород применяется в качестве электроизоляционной и охлаждающей среды в крупных турбогенераторах.

Элегаз или гексафторид серы (SF_6) имеет электрическую прочность примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха. Поскольку элегаз обладает низкой температурой кипения и высокой плотностью, примерно в 5,1 раза тяжелее воздуха, он может быть сжат до давления 2 МПа без сжижения. Элегаз нетоксичен, химически стоек, не разлагается при нагреве до 800 °С. Особенно велики его преимущества при повышенных давлениях. Элегаз обладает не только более высокой электрической прочностью, чем воздух, но и существенно более высокой дугогасящей способностью. Поэтому нарастающими темпами идут разработка и создание элегазовых выключателей и распределительных устройств, в которые наряду с выключателями входят разъединители, короткозамыкатели, трансформаторы тока и напряжения. В последнее время наметилась тенденция практического использования элегаза в высоковольтных кабелях, созданы опытные образцы. Преимуществами элегазового кабеля по сравнению с бумажно-масляным являются малая электрическая емкость и диэлектрические потери, хорошее охлаждение. Благодаря таким преимуществам по элегазовым кабелям можно передавать очень большие мощности.

§ 6.2. Жидкие диэлектрики

Жидкие диэлектрики представляют собой электроизоляционные жидкости, используемые в электрических аппаратах высокого напряжения, а также в блоках электронной аппаратуры. Применение электроизоляционных жидкостей позволяет обеспечить надежную и длительную работу электрической изоляции, находящихся под напряжением элементов конструкции, и отводить от них теплоту, выделяющуюся при работе.

Нефтяные масла получают фракционной перегонкой нефти. Выделенные фракции представляют собой сложную смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматического рядов с небольшой примесью других компонентов, содержащих атомы серы, кислорода и азота. Нефтяные масла, в которых преобладают нефтеновые углеводороды, называют нафтеновыми. В трансформаторных маслах их содержание достигает 75—80 %. Необходимой составной частью электроизоляционных нефтяных масел являются также ароматические углеводороды, содержание которых ограничивается определенным оптимумом (обычно 10—12%), обеспечивающим наибольшее увеличение срока службы. Излишнее количество ароматических углеводородов увеличивает тангенс угла диэлектрических потерь.

Чтобы получить трансформаторное масло, пригодное для применения, необходимо очистить масляный дистиллят, который остается после отгонки от нефти легких нефтепродуктов: бензина, керосина, лигроина.

Дистиллят очищают серной кислотой, затем нейтрализуют щелочью, промывают водой и сушат при 75—85 °С, продувая через него воздух. Для очистки от примесей и механических загрязнений масла фильтруют через адсорбенты — вещества, имеющие сильно развитую поверхность.

Свежее трансформаторное (конденсаторное) масло имеет обычно соломенно-желтый цвет, причем чем глубже очистка, тем светлее масло. Масла, бывшие в эксплуатации, из-за накопления продуктов окисления имеют темный цвет.

Конденсаторное масло получают из низкозастывающих высококачественных нефтей или путем дополнительной очистки адсорбентами трансформаторного масла. Операции очистки конденсаторного масла кислотой и щелочью проводятся также, как и для трансформаторного, но более длительно и тщательно.

Так как нефтяные электроизоляционные масла являются горючими жидкостями, то они представляют собой большую пожарную опасность в масляных хозяйствах энергосистем, где часто используются тысячи тонн масла. Поэтому правила пожарной безопасности при работе с маслонаполненным оборудованием должны тщательно соблюдаться. Пожарная опасность оценивается по температуре вспышки паров трансформаторного масла в смеси с воздухом, которая не должна быть ниже 135—140° С. В тех случаях, когда трансформаторное масло применяется в масляных выключателях высокого напряжения, важным параметром масла является температура застывания. Масло в этих электрических аппаратах служит для охлаждения канала дуги и быстрого ее гашения в момент разрыва контактов. В то время как обычное трансформаторное масло имеет температуру застывания около — 45 °С, специальное «арктическое» масло, предназначенное для работы на открытых подстанциях в районах Крайнего Севера, имеет температуру застывания — 70 °С (марка АТМ-65).

Наиболее важные для практического применения трансформаторного масла свойства нормированы ГОСТ 982—80. Из этих характеристик необходимо знать кинематическую вязкость при температуре 20 и 50 °С, так как при увеличении вязкости сверх допустимых пределов хуже отводится теплота от обмоток и магнитопровода трансформатора, что может привести к сокращению срока службы электрической изоляции. Стандартом нормировано также так называемое кислотное число — количество граммов КОН, которым можно полностью нейтрализовать все кислые продукты, содержащие в 1 кг масла. Этот показатель важен для учета старения масла в процессе его эксплуатации и для разных марок масла не должен превышать значений 0,03—0,1 г КОН на 1 кг. Для расчета расширителей трансформаторов, в которые переходит часть масла из бака трансформатора при повышении температуры, важно также учитывать и плотность масла, которая составляет 0,85—0,9 мг/м³, и температурный коэффициент объемного расширения, имеющий

значение около 0,00065 $К^{-1}$. Способность масла отводить теплоту от магнитопровода и обмоток погруженного в него трансформатора зависит от удельной теплоемкости, равной при нормальной температуре примерно 1,5 Дж (кг·К), и коэффициента теплопроводности около 1 Вт/(м·К). Обе эти характеристики при росте температуры увеличиваются.

По своим диэлектрическим характеристикам хорошо очищенное от примесей и влаги трансформаторное масло обладает свойствами неполярного диэлектрика. Значение диэлектрической проницаемости при 20 °С равно 2,2—2,3, tg δ при частоте 50 Гц для трансформаторного масла не должен превышать 0,003. Величина tg δ определяется проводимостью и зависит от степени очистки трансформаторного масла. Получение масел с пониженными диэлектрическими потерями (значение tg δ около 0,002—0,0005) для кабелей и конденсаторов требует очень хорошей очистки с применением адсорбентов. Зависимость tg δ трансформаторного масла от температуры на частоте 50 Гц показана на рис. 6.1. Удельное электрическое сопротивление свежего трансформаторного масла при нормальной температуре не превышает 10^{13} Ом·м.

Важной характеристикой масла является его электрическая прочность, которая чрезвычайно чувствительна к увлажнению. Правила технической эксплуатации электростанций (ПТЭ) предусматривают определенные нормы электрической прочности для чистого и сухого трансформаторного масла, приготовленного для заливки в аппарат, и для масла, находившегося в эксплуатации.

Пробой масла производят в стандартном разряднике между погруженными в масло металлическими дисковыми электродами диаметром 25 мм с закругленными краями при расстоянии между ними 2,5 мм. Пробивное напряжение технически чистых масел в стандартном разряднике составляет 50—60 кВ при 50 Гц и примерно 120 кВ при воздействии импульсного напряжения. Примесь воды в масле снижает значение пробивного напряжения. Если вода находится в масле в виде эмульсии, т. е. в виде мельчайших капелек, которые втягиваются в места, где напряженность поля велика, то в этом месте и начинается развитие пробоя. Характер изменения пробивного напряжения трансформаторного масла, содержащего влагу, в зависимости от температуры показан на рис. 6.2. Увеличение пробивного напряжения с ростом температуры объясняется переходом воды из суспензии в молекулярно-растворенное состояние. Рост пробивного напряжения при уменьшении температуры ниже 0 °С объясняется образованием льда и ростом вязкости масла.

При работе маслонаполненных трансформаторов или других электрических аппаратов, содержащих масло, наблюдается постепенное ухудшение рабочих параметров масла: tg δ, цвета, кислотности, вязкости, температуры замерзания и др. Эти процессы характеризуются понятием «старение», которое сопровождается изменением химических и электрофизических показателей. Наиболее

интенсивно процессы старения масла протекают при повышении температуры масла до максимально допустимой (обычно рабочая температура масла не превышает 95 °С) при одновременном воздействии электрического поля. Старение ускоряется также за счет одновременного воздействия света, излучений высоких энергий и присутствия некоторых материалов и соединений, являющихся катализаторами старения. Активными катализаторами являются медь

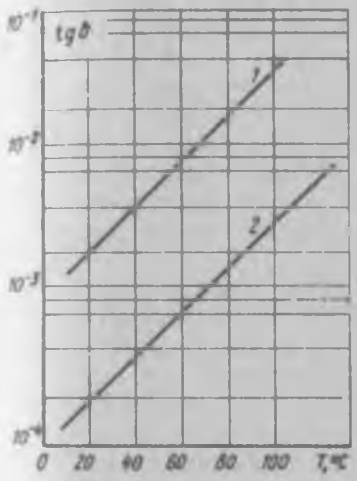


Рис. 6.1. Зависимость tgδ трансформаторного масла от температуры при частоте 50 Гц:

1 — масло, полученное методом кислотной очистки; 2 — масло, очищенное путем обработки адсорбентом

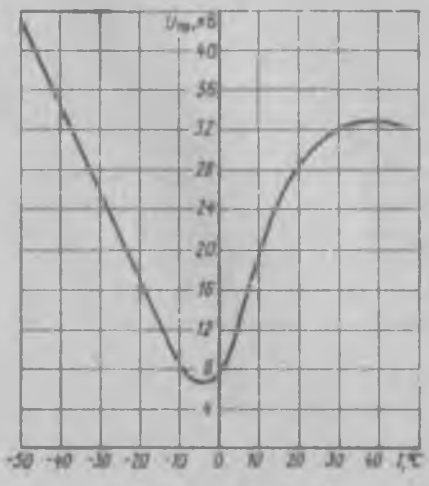


Рис. 6.2. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от температуры (масло Т=1500, содержащее 0,0040 % мас воды при переменном напряжении)

и ее сплавы, а также соли меди, железа, кобальта, органических кислот, растворимые в масле. В начале процесса старения масла образуются частично растворимые загрязняющие продукты — смолы и кислоты, а с течением времени появляются тяжелые нерастворимые осадки, которые в виде «ила» или «шлама» осаждаются на дне бака, на менее нагретых частях трансформатора и в местах с повышенной напряженностью поля. Слой ила значительно ухудшает теплоотвод от нагретых деталей, а низкомолекулярные кислоты, содержащиеся в состаренном масле, разрушают изоляцию обмоток и вызывают коррозию металлов. Электрическое поле ускоряет процесс старения масла и изменяет характер продуктов окисления масел. При старении некоторых сортов масла в электрическом поле может наблюдаться также и газовыделение, от которого избавляются подбирая состав масла.

С целью повышения устойчивости масел к процессам старения и состав подбирают таким образом, чтобы в нем не содержалось естественных катализаторов окисления и сохранялись соединения, замедляющие окисление. Такие вещества называются *ингибиторами*. В масла вводят также синтетические ингибиторы — ионол, ДВРС в концентрации от 0,1 до 0,5 %. Введение ионола замедляет процесс старения масла в 2—3 раза. Чтобы продлить срок службы масла в оборудовании, используют различные методы. Наиболее распространенный способ — герметизация оборудования, в результате которой устраняется непосредственный контакт масла с кислородом воздуха. Этот прием используется в кабельной, конденсаторной технике и в трансформаторостроении. В трансформаторах, кроме того, для замедления накопления продуктов окисления масла используется метод естественной циркуляции масла через так называемый термосифонный фильтр, который можно периодически заменять на свежий, заполненный адсорбентом. Такие фильтры постоянно соединены с трансформатором. Для трансформаторов различных габаритов разработано около 20 типов термосифонов. Особенностью термосифонных фильтров является возможность восстановления масла в трансформаторе без его отключения. Для предотвращения оксидирования и увлажнения масла в трансформаторах свободное пространство между поверхностью масла и крышкой бака или расширителя обычно заполняется азотом.

Масла, побывавшие в эксплуатации, подвергаются регенерации. Влага и крупные твердые примеси удаляются на различных центрифугах (для электрических аппаратов напряжением ниже 35 кВ). Для электрических аппаратов напряжением выше 35 кВ масла очищаются от содержащихся в них влаги, газов и легких примесей путем термовакуумной обработки в специальных аппаратах. Осушка масел производится искусственными цеолитами, которые известны также под названием «молекулярные сита». Масла с кислотным числом ниже 0,4 мг КОН на 1 г подвергаются очистке природными и синтетическими адсорбентами при температуре 50—60 °С.

Основные характеристики регенерированного масла должны соответствовать нормам на свежие масла.

Кроме трансформаторного масла в электротехнической промышленности находят применение другие виды нефтяных масел. К ним относятся конденсаторные, кабельные и масла для масляных выключателей и контакторных устройств регулирования напряжения под нагрузкой.

Синтетические жидкие диэлектрики. Они применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить длительную и надежную работу высоковольтных электрических аппаратов при повышенных тепловых нагрузках и напряженности электрического поля, в пожаро- или взрывоопасной среде. Жидкие диэлектрики находят применение и для заливки герметичных кожухов, в которых располагаются блоки электронной аппаратуры.

Наибольшее применение получили синтетические жидкости на основе хлорированных углеводородов, что связано с их высокой термической устойчивостью, электрической стабильностью, негорючестью, повышенным значением диэлектрической проницаемости и относительно невысокой стоимостью. По зарубежным дачным, если цену нефтяного масла принять равной единице, то стоимость хлорированных углеводородов по отношению к маслу равна 4—10, кремнийорганических жидкостей — от 80 до 370, фторорганических жидкостей — до 1150. Однако в связи с токсичностью хлорированных углеводородов их применение сначала ограничивалось, а в настоящее время почти повсеместно запрещено, хотя в эксплуатации еще имеется их значительное количество.

Хлорированные углеводороды можно получить путем хлорирования дифенила $C_6H_5 — C_6H_5$. При этом можно получать продукты с различной степенью хлорирования: три-, тетра-, пента- и гексахлордифенилы. По мере увеличения степени хлорирования растут молекулярная масса, плотность, вязкость, температура застывания и кипения. Вместе с тем возрастает и экологическая опасность, поэтому в конденсаторостроении пентахлордифенил (совтол) был заменен на трихлордифенил, хотя он и имеет повышенную вязкость при низких температурах.

Для применения в силовых трансформаторах в СССР используют в основном совтол-10, представляющий собой смесь 90% пентахлордифенила и 10 % трихлорбензола, который имеет в рабочем интервале температур вязкость, близкую к вязкости трансформаторного масла. Однако по своим вязкостно-температурным свойствам совтол-10 значительно уступает гексолу, представляющему собой смесь 20 % пентахлордифенила и 80% гексахлорбутадиена. Гексол не застывает при температуре до —60 °С и меньше подвержен влиянию загрязнений. Значения тангенса угла диэлектрических потерь для трихлордифенила, совтола-10 и гексола при 90 °С лежат в пределах 0,015—0,03. Удельное объемное сопротивление полихлордифенилов при рабочих температурах — в пределах $3 \cdot 10^9$—10^{12} Ом·м. Наименее полярные свойства проявляются у гексола, у которого ε при 70 °С не превышает 2,7—2,9. Электрическая прочность большинства жидкостей на основе хлористых углеводородов при 20 °С не превышает 18—22 МВ/м.

Жидкие диэлектрики на основе кремнийорганических соединений (полиорганосилоксанов). Они являются нетоксичными и экологически безопасными. Эти жидкости представляют собой полимеры с низкой степенью полимеризации, в молекулах которых содержится повторяющаяся силоксанная группировка $— \overset{|}{\underset{|}{Si}} — O — \overset{|}{\underset{|}{Si}} —$, атомы кремния которой связаны с органическими ради-

калами. В зависимости от строения радикала (метил-, этил-, фенил-), непосредственно связанного с атомом кремния, основные группы кремнийорганических жидкостей имеют название: полиметилсилоксановые (ПМСЖ), полиэтилсилоксановые (ПЭСЖ), полифенилсилоксановые (ПСФЖ), полиметилфенилсилоксановые (ПМСЖ). Температура вспышки паров этих жидкостей нормируется не ниже 300 °С, температура застывания — ниже —60 °С. При температурах более высоких, чем температура вспышки паров, эти жидкости самовоспламеняются без контакта с открытым пламенем. По своим диэлектрическим характеристикам полиорганосилоксановые жидкости приближаются к неполярным диэлектрикам. Так, для полиэтилсилоксановых жидкостей $\operatorname{tg}\delta = (2\div3)\cdot10^{-4}$; $\varepsilon = 2{,}4\div2{,}5$; $\rho = 10^{11}\div10^{12}$ Ом·м, $U_{пр} \geqslant 45$ кВ.

Полиорганосилоксановые жидкости используют в импульсных трансформаторах, специальных конденсаторах, блоках радио- и электронной аппаратуры и в некоторых других случаях.

Жидкие диэлектрики на основе фтороорганических соединений. Они отличаются негорючестью, высокой химической, окислительной и термической стабильностью, высокими электрофизическими и теплопередающими свойствами. По химическому составу представляют собой углеводороды, амины, эфиры и другие соединения, в которых атомы водорода частично или полностью замещены атомами фтора или хлора (в хлорфторорганических соединениях). Если атомы водорода полностью замещены на атомы фтора, то такие соединения называются *перфторированными*. Некоторые фторуглеводороды и фторхлоруглеводороды нашли применение в качестве хладоагентов и получили название *хладонов* (раньше их называли фреонами). Некоторые сорта хладонов получили применение в качестве жидких диэлектриков. Фторуглеводородные жидкости получили применение для заполнения 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.

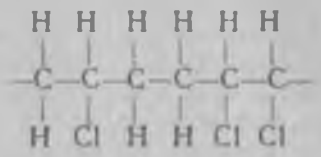
По диэлектрическим свойствам фторированные углеводороды могут быть отнесены к неполярным соединениям. Так, для хладона-112, хладона-113, хладона-114 значение $\operatorname{tg}\delta = 0{,}0001\div0{,}0002$, $\rho = 10^{12}\div10^{14}$ Ом·см, $\varepsilon = 2{,}2\div2{,}5$, $U_{пр} = 28\div49$ кВ в стандартном разряднике.

Смесь хладонов с воздухом взрывобезопасна. Хладоны признаны нетоксичными соединениями, однако в помещении, заполненном их парами, возможна смерть теплокровных животных от удушья, вызванного, по-видимому, недостатком кислорода. При высоких температурах хладоны разлагаются с выделением токсичных продуктов.

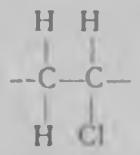
§ 6.3. Полимеры

В настоящем разделе рассмотрены электроизоляционные материалы, относящиеся к группе полимеров. Некоторые полимеры, например полистирол, поливинилхлорид, применяют непосредственно для изготовления электрической изоляции, другие используют для изготовления многочисленных электроизоляционных материалов — слоистых пластиков, резин, пластических масс, композиционных слюдосодержащих материалов и пр.

Основные определения и свойства полимеров. Для изготовления электрической изоляции используют большое число материалов, относящихся к группе полимеров. Полимеры — высокомолекулярные соединения. Они имеют большую молекулярную массу. Молекулы полимеров, называемые *макромолекулами*, состоят из большого числа многократно повторяющихся структурных группировок (элементарных звеньев), соединенных в цепи химическими связями. Например, в молекуле поливинилхлорида

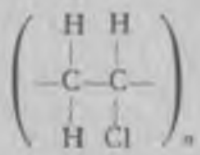


повторяющимся звеном является группировка



Полимеры получают из мономеров — веществ, каждая молекула которых способна образовывать одно или несколько составных звеньев. Так как полимеры представляют собой смеси молекул с различной длиной цепи, то под молекулярной массой полимера понимают ее среднее статистическое значение. Молекулярная масса полимеров может достигать значений в несколько миллионов.

Степень полимеризации — важная характеристика полимеров, она равна числу элементарных звеньев в молекуле. Например, структурную формулу поливинилхлорида можно записать в компактном виде



где n — степень полимеризации. Полимеры с низкой степенью полимеризации называют *олигомерами*.

Полимеризацией называют реакцию образования полимера из молекул мономера без выделения низкомолекулярных побочных продуктов. При этой реакции в мономере и элементарном звене полимера соблюдается одинаковый элементный состав.

Наиболее распространенной разновидностью реакции полимеризации является цепная полимеризация, при которой макромолекула образуется по цепному механизму путем последовательного присоединения молекул мономеров к растущей цепи. Соединения с двойными связями, как правило, полимеризуются по цепному механизму. Примером реакции полимеризации является полимеризация этилена:

$$n\,H_2C{=}CH_2 \rightarrow [{-}CH_2{-}CH_2{-}]_n$$

Поликонденсация — реакция образования полимера из мономеров с выделением низкомолекулярных веществ (воды, спирта и др.). Элементный состав полимерной молекулы отличается от элементного состава полимерной молекулы.

Реакция поликонденсации протекает в том случае, если мономерные соединения содержат химически активные группы, способные вступать во взаимодействие. Реакция поликонденсации лежит в основе получения важнейших высокополимеров, таких, как фенолформальдегидные смолы, полиэфирные и др. Термином «смола» в промышленности иногда пользуются наряду с названием «полимер».

Полимеры делят на два типа — линейные и пространственные - в зависимости от пространственной структуры макромолекул. В линейных полимерах макромолекулы состоят из последовательности повторяющихся звеньев с большим отношением длины молекулы к ее поперечным размерам. Макромолекулы пространственных полимеров связаны в общую сетку.

Термопластичные полимеры (термопласты) получают на основе полимеров с линейной структурой макромолекул. При нагревании они размягчаются, а при охлаждении затвердевают. При этом процессе не происходит никаких химических изменений. Для электрической изоляции термопласты применяются в основном в форме нитей или пленок, получаемых из расплавов. Способность к формованию и к растворению в подходящих по составу растворителях сохраняется у них и при повторных нагревах.

Термореактивные полимеры получают из полимеров, которые при нагревании или при комнатной температуре вследствие образования пространственной сетки из макромолекул (отверждения) переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. Этот процесс является необратимым.

На свойства полимеров влияет не только их химический состав и строение, но также и физическая структура вещества. В полимерах с регулярной структурой макромолекул, т. е. когда наблюдается определенный порядок в чередовании элементарных звеньев, возможно наличие кристаллических областей, характеризуемых строго

определенным пространственным расположением цепей и одновременно элементарных звеньев макромолекул. В аморфных полимерах отсутствует дальний порядок в расположении макромолекул. Линейные аморфные и кристаллизующиеся полимеры могут находиться в трех физических состояниях: стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем.

В стеклообразном состоянии полимеры обладают хрупкостью. Температура, при которой в процессе нагревания полимер приобретает эластичность, называют температурой стеклования (T_c). При более высоких температурах материалы обладают большой упругой деформацией и находятся в высокоэластичном состоянии. Полимеры, находящиеся в высокоэластичном состоянии в широком интервале температур, называются эластомерами или каучуками. Если нагревать полимер, находящийся в высокоэластичном состоянии, до температуры текучести $T_т$, то материал переходит в вязкотекучее состояние. В этом состоянии материал обладает необратимыми пластическими деформациями. Все перечисленные стадии материал проходит при понижении температуры. Обычно эти физические состояния выявляют по зависимости деформация — температура (рис. 6.3).

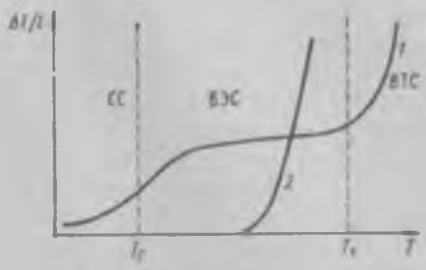


Рис. 6.3. Зависимость деформации от температуры у линейных полимеров
1 — аморфный; *2* — кристаллический; *СС* — стеклообразное состояние; *ВЭС* — высокоэластичное состояние

Кристаллические полимеры обычно содержат как кристаллическую, так и аморфную фазы. Многие свойства полимеров зависят от соотношения аморфной и кристаллической фаз — степени кристалличности.

Совокупность характеристик, определяющих поведение полимеров в электрическом поле ($E_{пр}$, ρ_v, ρ_s, ε_r и $\operatorname{tg}\delta$), в значительной мере зависит от полярности звеньев макромолекул, наличия остаточных реакционноспособных (функциональных) групп и различных примесей и изменяется от температуры, частоты, амплитуды внешнего электрического поля. Диэлектрические свойства полимеров связаны с их строением, молекулярной структурой и зависят от температуры.

Значение ρ_v полимеров определяется наличием в них носителей заряда ионов, полярных групп и их подвижностью. Для неполярных очищенных от примесей полимеров, полученных полимеризацией (полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен), характерны большие значения $\rho_v = 10^{14} \div 10^{16}$ Ом·м, малый $\operatorname{tg}\delta \approx 10^{-4}$, малое значение $\varepsilon_r = 2{,}0 \div 2{,}4$. Полярные полимеры имеют более

низкие значения ρ_v, большие значения ε_r и tg δ. Относительная диэлектрическая проницаемость слабополярных полимеров составляет обычно 2,8—4,0; для полярных в зависимости от строения полимера она меняется от 4 до 20. Влияние строения полимера на ε_r в основном определяется значением дипольного момента отдельного звена макромолекулы и числом полярных групп в единице объема, причем ε_r значительно возрастает при увеличении в полимере содержания воды. Увеличение степени кристалличности также приводит к увеличению ε_r; так, у аморфного полистирола ε_r составляет 2,49—2,55, у кристаллического — 2,61. Для применения полимеров в кабельной технике предпочтительнее материалы, с малой ε_r (неполярные и слабополярные полимеры), в конденсаторостроении — с повышенными значениями ε_r. При высоких частотах используются такие же полимеры, как полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен, у которых малы ε_r и диэлектрические потери. В низкочастотных конденсаторах или при постоянном токе можно применять полимеры с повышенной ε_r в стеклообразном состоянии.

Значения tg δ зависят от химического строения, структуры полимера. Низкомолекулярные примеси и, в частности влага, включения пузырей воздуха, пыль, частицы низко- и высокомолекулярных веществ могут привести к появлению дополнительных максимумов в температурной зависимости tg δ. Значения tg δ для неполярных полимеров лежат в пределах от 10^{-4} до 10^{-3}. Вблизи и выше T_c возможен рост tg δ при повышении температуры, что обусловлено повышением ионной проводимости полимера. Значения tg δ полярных полимеров в сильной степени зависят от частоты и температуры, что ограничивает их применение при высоких частотах.

Электрическая прочность $E_{пр}$ с повышением температуры резко снижается в области T_c для аморфных и $T_{пл}$ для кристаллических полимеров. Полярные полимеры имеют более высокую $E_{пр}$, чем неполярные, в области комнатных и более низких температур.

Нагревостойкость полимерных материалов. Длительная рабочая температура линейных полимеров, за исключением фторсодержащих и полифенилов, не превышает 120 °С, особенно нагревостойки кремнийорганические и некоторые другие элементоорганические полимеры, длительная рабочая температура которых достигает 180—200 °С. Высокую устойчивость к действию повышенной температуры проявляются полимеры пространственного строения.

Природные смолы. К числу природных смол, имеющих значение в электроизоляционной технике, относятся шеллак, канифоль (гарпиус) и янтарь. Природные смолы представляют собой органические соединения в основном растительного и биогенного происхождения. При нагревании природные смолы размягчаются и плавятся. В воде природные смолы нерастворимы, а в спирте, эфире, жирных и эфирных маслах и других органических растворителях растворимы.

Ш е л л а к представляет собой продукт жизнедеятельности некоторых насекомых на ветвях тропических деревьев. Он хорошо растворим в спирте, почти нерастворим в бензине и бензоле, плавится при 80 °С, при длительном нагревании переходит в неплавное и нерастворимое состояние. По диэлектрическим свойствам шеллак относится к слабополярным диэлектрикам. Шеллак применяется в электротехнике главным образом в виде спиртового раствора для изготовления клеящих лаков, для слюдяной изоляции, а также для лакировки деталей.

К а н и ф о л ь — хрупкая смола, получаемая из смолы (живицы) хвойных деревьев. Она растворяется в спирте, бензине, бензоле, нефтяных и растительных маслах и в других растворителях, в воде нерастворима. По диэлектрическим свойствам канифоль может быть отнесена к слабополярным диэлектрикам. Применяется для изготовления лаков и компаундов, используемых в электрической изоляции, добавляется к нефтяному маслу при пропитке бумажной изоляции силовых кабелей, в большом количестве применяется как составная часть многих электроизоляционных смол, в частности фенолоформальдегидных и полиэфирных.

Я н т а р ь — ископаемая смола растений с температурой плавления выше 300 °С; не растворяется почти ни в каких растворителях, растворяется после расплавления в скипидаре, сероуглероде, бензине, маслах. Янтарь — слабополярный диэлектрик с высоким значением удельного сопротивления $\rho_v = 10^{17}$ Ом, которое мало зависит от влажности. Применяется ограниченно из-за дороговизны, главным образом в электроизмерительных приборах, в которых требуется высокое значение сопротивления изоляции.

Синтетические полимеры. Линейные неполярные полимеры. К неполярным полимерам с малыми диэлектрическими потерями относятся полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен. Мономерные звенья макромолекул этих полимеров не обладают дипольным моментом. Эти полимеры имеют наибольшее техническое значение из материалов, получаемых полимеризацией.

П о л и э т и л е н (ПЭ) получают при высоком, среднем и низком давлении полимеризацией этилена в присутствии катализаторов.

Полиэтилен — кристаллизующийся полимер, степень кристалличности которого при комнатной температуре достигает 50—90 % в зависимости от способа получения. От других термопластов отличается весьма ценным комплексом свойств. Для полиэтилена характерны высокая прочность, стойкость к действию агрессивных сред и радиации, хорошие диэлектрические свойства, нетоксичность.

Выпускаемый в промышленности полиэтилен в зависимости от способа получения различается по плотности, молекулярной массе и степени кристалличности. Плотность полиэтилена изменяется в пределах 910—970 кг/м³, температура размягчения 110—130 °С. Наибольшей степенью кристалличности, плотности и температурой

размягчения обладает полиэтилен низкого и среднего давления (полиэтилен высокой плотности). Полиэтилен, получаемый при высоком давлении, имеет меньшую плотность. Так как изделия из полиэтилена становятся хрупкими только при —70 °С, то они могут эксплуатироваться в суровых климатических условиях.

Полиэтилены низкого и среднего давления относятся к полимерам с регулярной структурой молекул и называются *изотактическими полимерами*. С увеличением молекулярной массы и особенно плотности, что характерно для изотактического полиэтилена, возрастает химическая стойкость полимера. Полиэтилен стоек к действию щелочей, растворов солей, органических кислот (даже к концентрированной соляной и плавиковой кислотам). ПЭ выше 80 °С растворяется во многих растворителях, особенно хорошо в углеводородах и их галогенпроизводных. Для увеличения атмосферостойкости и стойкости к термоокислительным процессам в полиэтилен вводят различные стабилизаторы.

Плотность полиэтилена не влияет существенно на его диэлектрические свойства, но примеси в полиэтилене высокой плотности увеличивают диэлектрические потери. Однако малые диэлектрические потери полиэтилена позволяют использовать электроизоляционные материалы и изделия на его основе в широком диапазоне частот и температур.

В промышленности получают полиэтилен со «сшитой» структурой молекул, когда создаются поперечные химические связи между линейными цепями макромолекул. «Сшитый» полиэтилен можно получить при облучении полиэтилена частицами высоких энергий или при действии специальных перекисных соединений, вызывающих сшивку макромолекул при высокой температуре. Такой полимер становится резиноподобным при 110—115 °С и сохраняет прочность при температуре до 200 °С.

Полиэтилен применяется в качестве электроизоляционного материала в электротехнике и радиоэлектронике, в кабельной промышленности, в строительстве, в качестве антикоррозионных покрытий и т. д. Полиэтилен всех марок является физиологически безвредным, поэтому получил широкое применение в производстве товаров народного потребления.

Полистирол $[-H_2C-CH-C_6H_5-]_n$, получат полимеризацией мономерного стирола. Аморфный полистирол получают в виде блоков, эмульсий, суспензий или растворов, а изотактический — в присутствии специальных катализаторов. Полистирол — термопластичный материал с высокими диэлектрическими свойствами. Для электротехнических целей в основном применяется блочный полистирол, эмульсионный имеет худшие диэлектрические показатели и используется для изготовления плиточных пенопластов конструкционного назначения, изотактический в промышленности из-за трудностей переработки в изделия не выпускается.

Полистирол химически стоек, устойчив к воздействию влаги, растворяется в ароматических и хлорированных углеводородах, простых и сложных эфирах. К недостаткам полистирола относятся низкая механическая прочность и невысокая теплостойкость.

Блочный полистирол прозрачен, бесцветен, пропускает 90 % видимой части света. Высокий показатель преломления обусловливает применение блочного полистирола для изготовления оптических стекол. Температура стеклования полистирола 80—82 °С, а температура эксплуатации изделий из него не должна превышать 60 °С.

Из полистирола получают полистирольные пленки толщиной 10—100 мкм, называемые *стирофлексом*. Пленки отличаются большой прочностью, высокими диэлектрическими показателями и применяются в конденсаторной технике.

Полистирол широко применяется для изготовления деталей электро- и радиоэлектронных приборов, в кабельной промышленности в качестве высокочастотного электроизоляционного материала, для изготовления полистирольных лаков. Перерабатывается в изделия всеми способами, используемыми для термопластичных материалов. Основной метод переработки в изделие — литье под давлением.

Свойства полистирола улучшают путем введения специальных веществ — ингибиторов — для предотвращения самопроизвольной полимеризации во время хранения, когда из-за появления внутренних механических напряжений у полистирола возможно появление трещин. В ряд случаев для устранения этого явления в полистирол вводят некоторые виды синтетических каучуков.

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) $[-CF_2-CF_2-]$ в СССР выпускается под названием фторопласт-4 (торговая марка) и получается полимеризацией тетрафторэтилена $F_2C=CF_2$. Степень кристалличности ПТЭФ около 90 % (при температуре эксплуатации 50—70%). Кристаллическая структура нарушается при температуре около 327 °С, после чего полимер переходит в высокоэластическое состояние, сохраняющееся вплоть до температуры разложения (около 415 °С). Рабочая температура от —269 до 260 °С.

Высокая рабочая температура и химическая стойкость выделяют ПТФЭ среди других органических полимеров. ПТФЭ не горит и не растворяется в диапазоне рабочих температур ни в одном растворителе, на него не действуют кислоты, щелочи и другие агрессивные вещества. Превосходя золото и платину по химической стойкости, ПТФЭ не смачивается водой, проявляет стойкость к воздействию тропического климата и грибковой плесени. Некоторое воздействие на ПТФЭ оказывают лишь расплавленные щелочные металлы и атомарный фтор при повышенных температурах. ПТФЭ имеет исключительно высокие электроизоляционные свойства, приведенные в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Свойства	Полиэтилен	Полистирол	Политетрафторэтилен
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	10^{15}	10^{15}—10^{16}	10^{15}—10^{16}
Относительная диэлектрическая проницаемость при 1 МГц	2,2—2,4	2,5—2,6	1,9—2,2
Тангенс угла диэлектрических потерь при 1 кГц—1 МГц	$(2—4)\cdot10^{-4}$	$(2—4)\cdot10^{-4}$	$(2—2,5)\cdot10^{-4}$
Электрическая прочность, МВ*/м	45—55	25	25—27
Длительная рабочая температура, °С	90	70	260

* Электрическая прочность для тонких, толщиной 2—20 мкм, пленок полиэтилена, полистирола, ПТФЭ достигает соответственно 150, 110, 250 МВ/м.

К недостаткам ПТФЭ относятся ползучесть, возникающая под действием небольших механических нагрузок, и низкая устойчивость к воздействию электрической короны.

Обычные для термопластов методы переработки для ПТФЭ непригодны. Изделия из ПТФЭ изготавляются методом спекания при температуре 360—380 С предварительно отформованных из ПТФЭ заготовок.

ПТФЭ не склеивается с другими материалами обычными методами, так как имеет плохую адгезию (клеящую способность, прилипание) к другим материалам, поэтому для склеивания его поверхность необходимо подвергнуть специальной обработке (в тлеющем разряде, химическому травлению и др.).

ПТФЭ применяют в радиоэлектронике, электротехнике для изготовления электрической изоляции проводов, кабелей, конденсаторов, трансформаторов, работающих при высоких и низких температурах или в агрессивных средах.

ПТФЭ физиологически безвреден, но при температуре выше 250 250 °С из него начинается выделение высокотоксичных газообразных продуктов, количество которых резко возрастает при нагревании выше температуры разложения.

Линейные полярные полимеры. По сравнению с неполярными полимерами материалы этой группы обладают большими значениями диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = 3\div6$) и повышенными диэлектрическими потерями [$\mathrm{tg}\,\delta = (1\div6)\cdot10^{-2}$ на частоте 1 МГц]. Такие свойства обусловливаются асимметричностью строения элементарных звеньев макромолекул, благодаря чему в этих материалах возникает дипольно-релаксационная поляризация. Удельное

поверхностное сопротивление этих материалов сильно зависит от влажности окружающей среды. К числу этих полимеров относятся поливинилхлорид, полиэтилентерефталат, фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен), полиамидные смолы. Для электротехнических целей эти полимеры применяются в основном как изоляционные и конструкционные в диапазоне низких частот.

Поливинилхлорид (ПВХ) представляет собой полимер, получаемый полимеризацией хлористого винила с образованием высокомолекулярного соединения по следующей схеме:

$$n\,CH_2{=}CHCl \rightarrow \left[-CH_2-\underset{\displaystyle Cl}{\underset{|}{CH}} \right]_n$$

Молекула хлористого винила асимметрична и поэтому обладает резко выраженными полярными свойствами. ПВХ благодаря высокому содержанию хлора не воспламеняется и практически не горит. Разложение ПВХ начинается при 170 °С. ПВХ нерастворим в воде, спирте, бензине и многих других растворителях. При нагревании он растворяется в хлорированных углеводородах, ацетоне, обладает высокой стойкостью к действию сильных и слабых кислот и щелочей, смазочных масел.

ПВХ хорошо совмещается с пластификаторами, которые улучшают его эластичность, но в то же время несколько ухудшают диэлектрические свойства. В электротехнике жесткий материал, называемый *винипластом*, находит ограниченное применение. Для электрической изоляции, в частности для кабельной изоляции, применяется пластифицированный ПВХ, называемый *пластикатом*. Обычно применяют такие пластификаторы, как дибутилфталат и трикрезилфосфат. Введение пластификатора не только улучшает эластичность ПВХ, но и повышает его морозостойкость. Введением специальных пластификаторов можно получить пластикаты, способные работать при —60 °С, однако следует учитывать, что при введении большого их количества резко возрастают потери проводимости.

Материалы на основе ПВХ имеют высокую влагостойкость, что обеспечивает им широкое применение для изоляции защитных оболочек кабельных изделий, изоляции проводов, а также в виде трубок, лент, листов в электрических машинах и аппаратах, работающих на промышленных частотах. ПВХ применяют также в качестве материала, гасящего электрическую дугу в отключающей аппаратуре.

Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3) $[-CF_2-CFCl-]_n$ получают полимеризацией трифторхлорэтилена. Фторопласт-3 или модифицированный фторопласт-3М—кристаллический полимер с температурой плавления кристаллической фазы около 215 °С. Фторопласт-3 по сравнению с фторопластом-4 имеет меньшую термическую стойкость и способен отщеплять хлор при темпе-

ратуре выше 260 °С. Как и фторопласт-4, этот полимер имеет высокую химическую устойчивость, но в отличие от него может перерабатываться в различные электротехнические изделия методом прессования при температуре 220—250 °С. По своим электроизоляционным свойствам фторопласт-3 занимает промежуточное положение между поливинилхлоридом и фторопластом-4. Фторопласт-3 применяют для изоляции проводов и кабелей, для изготовления различных деталей радио- и электротехнической промышленности, для производства пленок в производстве конденсаторов и фольгированных диэлектриков.

В табл. 6.3 приведены основные показатели рассмотренных линейных полярных полимеров. Следует иметь в виду, что в настоящее время в промышленности выпускается большое число сополимеров рассмотренных полимеров, т. е. таких соединений, которые получаются из нескольких мономеров и поэтому содержат в цепи неодинаковые элементарные звенья. Сополимеры могут быть получены с нужным комплексом тех или других свойств.

Таблица 6.3

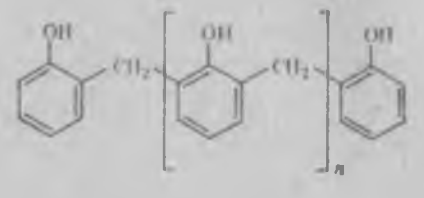
Свойства	Поливинилхлорид	Полиэтиленфторхлорэтилен (фторопласт-3)
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	10^{11}—10^{13}	$1{,}2\cdot10^{16}$
Относительная диэлектрическая проницаемость при 1 МГц	3,1—3,4	2,5—2,7
Тангенс угла диэлектрических потерь при 1 МГц	0,015—0,018	0,01
Электрическая прочность, МВ/м	35—45	13—15
Длительная рабочая температура, °С	90	От —195 до +190

Полимеры, получаемые поликонденсацией. В зависимости от особенностей проведения реакции поликонденсации могут быть получены полимеры как с линейной, так и с пространственной или сетчатой структурой молекул. В связи с тем что при поликонденсации происходит выделение низкомолекулярных побочных продуктов, которые не всегда могут быть полностью удалены из полимера, диэлектрические характеристики поликонденсационных полимеров несколько ниже, чем у получаемых с помощью полимеризации. Однако поликонденсационные полимеры могут быть получены с рядом ценных свойств, обусловливающих их широкое применение для материалов, применяемых в электротехнических целях. Так, линейные поликонденсационные полимеры имеют высокую прочность и большое удлинение при разрыве. Многие из них способны вытягиваться в тонкие нити, из которых можно получать электроизоляционные ткани, пряжу. Некоторые полимеры применяются для изготовления пленочных материалов. В отличие от линейных поликон-

денсационных материалов, которым присущи свойства термопластичных материалов, продукты, являющиеся в своей конечной стадии термоактивными, широко применяются как связующее в пластмассах, в качестве лаковой основы и в производстве слоистых пластиков.

Фенолоформальдегидные полимеры (смолы) — продукты поликонденсации фенолов с формальдегидом. В зависимости от условий проведения поликонденсации можно получить термопластичные смолы, называемые новолачными, или термоактивные, называемые резольными. Термоактивные смолы называют также бакелитом.

Новолачные смолы получают при избытке фенола (обычно 7:6) в присутствии кислоты, а резольные — при избытке формальдегида (6:7) в щелочной среде. Формула новолаков выглядит следующим образом:



Новолачные смолы сохраняют плавкость и растворимость в этиловом спирте и в других растворителях при нагревании. Их можно перевести в резолы действием формальдегида или уротропина (гексаметилентетраамина). Непосредственно после получения бакелит находится в стадии *A* (резол), в которой он сохраняет плавкость и растворимость в спирте. При нагревании бакелита в стадии *A* до температуры 110—140 °С он проходит через промежуточную стадию *B* (резитол), когда смола растворяется лишь частично, и переходит в неплавкую и нерастворимую стадию *C* (резит).

Новолачные смолы применяются для производства лаков и пресс-порошков для изготовления электрической изоляции, причем процесс перехода линейного полимера в пространственный осуществляется в прессах при изготовлении изделий после смешения смолы с уротропином.

Резит (бакелит в стадии *C*) отличается высокой механической прочностью и сравнительно хорошими электроизоляционными характеристиками. Полярность как новолачных смол, так и бакелита в стадии *C* связана с наличием в их молекулах гидроксильных групп OH. Разложение резитов, сопровождаемое обугливанием, наблюдается при температуре выше 300 °С.

При замене фенола анилином или крезолом получаются а н и л и н о- и крезолоформальдегидные смолы. Электрические свойства и водостойкость резитов этих смол лучше, чем у полученных на основе фенола и формальдегида. Все смолы резольного типа широко

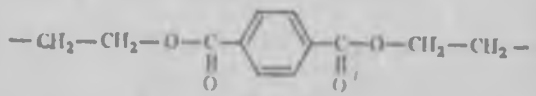
применяются при изготовлении слоистых пластиков (гетинакса и текстолита).

Полиэфирные смолы получают при поликонденсации многоосновных кислот с многоатомными спиртами. Для электроизоляционных целей используют преимущественно этиленгликоль и глицерин. Линейные полиэфиры терефталевой кислоты являются термопластичными полимерами и применяются в виде пленок и волокон, а термореактивные полиэфиры используются в качестве основы лаков.

Термореактивные полиэфиры на основе фталевой кислоты называют глифталевыми смолами, которые на практике находят применение после модификации жирными кислотами. Электроизоляционные лаки на основе модифицированных глифталевых смол применяются для пропитки обмоток электрических машин, трансформаторов и других аппаратов, работающих в погруженном состоянии в минеральном масле.

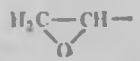
Глифталевые лаки применяют в кабельной промышленности в качестве связующего стекловолокнистой изоляции обмоточных проводов.

Термопластичный полимер, получаемый из этиленгликоля и терефталевой кислоты, имеет строение



и называется полиэтилентерефталатом. В СССР этот полимер называется лавсаном, в США — дакроном или майларом, в Великобритании — териленом. Пленки и нити лавсана применяют в производстве конденсаторов и в качестве пазовой изоляции электрических машин, а также для производства синтетических бумаг. Прочность пленок из лавсана в 10 раз выше, чем из полиэтилена (до 290 МПа). Они имеют высокую электрическую прочность (до 180 МВ/м) и повышенную нагревостойкость (длительная рабочая температура 120—130 °С). Лавсан отличается стойкостью к подавляющему числу органических растворителей. По диэлектрическим показателям лавсан относится к слабополярным диэлектрикам и отличается высокими диэлектрическими свойствами.

Эпоксидные полимеры широко применяются в различных областях техники, что связано с рядом их ценных свойств, среди которых важное значение имеет способность отверждаться без давления при действии теплоты и отвердителей в толстых слоях с малыми усадками. Эпоксидные смолы характеризуются наличием в их молекулах эпоксидных групп (колец)



В исходном состоянии эпоксидные смолы представляют собой вязкие жидкости, которые под действием особых веществ — отвердителей — переходят в твердое состояние, становясь термореактивными материалами. В процессе отверждения, который протекает равномерно, эпоксидные смолы приобретают пространственное строение. Процесс отверждения является чистой полимеризацией, т. е. протекает без выделения каких-либо побочных продуктов. Эпоксидные смолы могут отверждаться при комнатной температуре (холодное отверждение) или при нагреве до 80 - 150 °С. В последнем случае получается более высокая электрическая прочность. Выбор отвердителя оказывает большое влияние на различные свойства отвержденных эпоксидных смол, такие, как эластичность, нагревостойкость и др. Для холодного отверждения эпоксидных смол применяют часто азотсодержащие вещества (амины), для отверждения при нагреве — ангидриды органических кислот. Применению в электротехнике эпоксидных смол способствует их малая усадка при отвердевании, которая не превосходит 0,5—2 %.

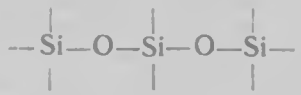
В качестве электроизоляционных и герметизирующих материалов эпоксидные полимеры широко применяются в радиоэлектронике, приборостроении, электротехнике. Как высокопрочные конструкционные материалы они находят применение в ракетной и космической технике, авиации, судостроении, машиностроении. Благодаря хорошей адгезии к стеклу, керамике, древу, пластмассам, металлам эпоксидные полимеры применяются для изготовления высокопрочных клеев. Клеевые швы устойчивы к действию воды, неполярных растворителей, кислот, щелочей и характеризуются высокой механической прочностью. Эпоксидные полимеры применяются также для изготовления лакокрасочных покрытий. На основе эпоксидных полимеров изготовляют компаунды горячего и холодного отверждения. В качестве наполнителей широко применяют минеральные и органические вещества.

Многие эпоксидные смолы и их отвердители оказывают на организм человека токсическое действие, поэтому работа с ними требует соблюдения необходимых правил предосторожности. Отвержденные эпоксидные смолы уже не токсичны.

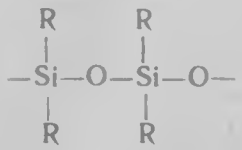
Кремнийорганические смолы (полиорганосилоксаны, силиконы) были впервые синтезированы в Советском Союзе в 1937 г. благодаря работам К. А. Андрианова. В настоящее время в промышленности выпускается огромное количество кремнийорганических высокомолекулярных соединений, которые находят широкое применение благодаря ряду ценных свойств, прежде всего высокой термо-, тепло-, водо-, атмосферостойкости и хорошим диэлектрическим свойствам.

Кремнийорганические полимеры представляют собой неорганические цепи, состоящие из атомов кремния и кислорода и обрамленные органическими радикалами. Основу строения молекул состав-

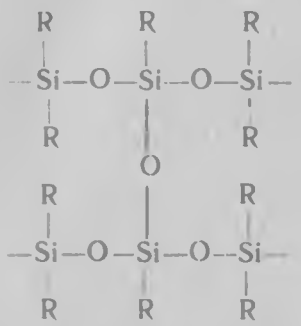
ляет «силоксанная» цепочка из чередующихся атомов кремния и кислорода:



Полиорганосилоксаны могут быть как термопластичными, т. е. иметь линейную структуру молекул



так и термоактивными с пространственной структурой типа



где под R подразумеваются органические радикалы, такие, как этил — C_2H_5, метил — CH_3, фенил — C_6H_5.

Свойства полиорганосилоксанов зависят от характера силоксановой связи и наличия органических радикалов у атомов кремния. Связь кремний — кислород термически более устойчива, чем углерод — углеродная связь. Органические радикалы у атомов кремния снижают термическую стойкость полиорганосилоксанов, но в то же время придают им водостойкость и эластичность, характерные для органических материалов.

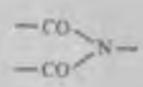
Кремнийорганические полимеры могут быть получены в виде эластичных смол, твердых тел и жидких диэлектриков. Благодаря тому что кремнийорганические соединения практически не смачиваются водой, они находят применение для придания водоотталкивающих свойств пластическим массам, керамике и другим материалам.

К недостаткам этих смол относятся их сравнительная дороговизна, низкая механическая прочность, плохая адгезия к большинству других материалов и низкая маслостойкость.

Полиорганосилоксановые лаки находят применение в качестве связующих для различных композиционных электроизоляцион-

ных материалов, например слюдяных материалов, пластмасс, слоистых пластиков, стеклотканей, в качестве пропиточных составов для изоляции электрических машин класса нагревостойкости Н, влагостойкого исполнения, а также для работы в условиях тропиков, для заливки и компаундирования узлов и деталей электронного оборудования.

Полиимиды (ПИ) — полимеры, содержащие имидную группировку атомов



— относятся к числу наиболее нагревостойких органических полимеров. При 500 °С пленка из полиимидов вдвое прочнее, чем пленка из полиэтилена при 20 °С. Разложение полимера начинается при температуре выше 400 °С, пленка не плавится и не размягчается при температуре до 800 °С. Наряду с высокой нагревостойкостью полиимиды обладают исключительной холодостойкостью вплоть до —269 °С. Отличаются хорошими диэлектрическими показателями. Применяют полиимиды для изготовления пленок, лаков, нагревостойких волокон.

Свойства термореактивных электроизоляционных полимеров без наполнителей приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Свойства	Фенолоформальдегидные	Эпоксидные	Кремнийорганические
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	10^9—10^{10}	10^{12}—10^{13}	10^{12}—10^{14}
Электрическая прочность, МВ/м	12—16	20—80	15—25
Диэлектрическая проницаемость при 50 Гц	5,0—5,5	3,0—4,0	3,5—5,0
Тангенс угла диэлектрических потерь при 50 Гц	0,06—0,1	0,01—0,03	0,01—0,03
Длительная рабочая температура, °С	105—120	120—140	180—220

§ 6.4. Пластмассы и пленочные материалы

Пластмассы находят применение в электротехнике как в качестве электроизоляционных, так и в качестве конструкционных материалов. По составу в большинстве случаев пластмассы представляют собой композиции из связующего и наполнителя. В качестве связующего используют наиболее часто полимерные материалы, способные деформироваться под воздействием давления. Связующие связывают в единое целое другие компоненты и придают мате

свойства. Иногда применяется и неорганиче-
риалу характерны пример стекло в микалексе, цемент в асбоцемен-
ское связующее, на е л и используются для улучшения прочност-
те. Н а п о л н и ения усадки, повышения стойкости к воздейст-
ных свойств, умень , а также для снижения стоимости. Наполни-
вию различных ср на органические и неорганические, а каждая из
ли подразделяются дь, подразделяется на порошкообразные и во-
групп, в свою оче ническим порошкообразным относятся древес-
локнистые. К орг ые полимеры, к органическим волокнистым на-
ная мука, диспер ковые очесы, сульфитная целлюлоза, бумаж-
полнителям — хло ческие волокна. К неорганическим порошкообб-
ная крошка, синте м относятся молотая слюда, кварцевая мука,
разным наполнит н, стекловолокно и др.
асбест, тальк, као х и наполнителей применяют пластификаторы—

Кроме связующ хнологических и эксплуатационных свойств
для улучшения ификаторы также увеличивают холодостойкость
пластмасс. Пласти вость их к воздействию ультрафиолетового из-
пластмасс и устой рых пластмассах содержание пластификатора
лучения. В некот 40%. На определенных стадиях переработки в
может достигать 30 ют «сшивающие реагенты», различные инициа-
пластмассы добав в сочетании с ускорителями и активаторами,
торы полимеризаци х классов и неорганические пигменты. В неко-
красители различн водятся стабилизаторы — химические соедине-
торые пластмассы е длительному сохранению свойств пластмасс
ния, способствующ ости пластмасс к воздействию теплоты, света,
и повышению стой По способности к формованию полимерные ма-
кислорода воздуха ются на две группы: термопластичные (термо-
териалы подразде ктивные (реактопласты). При формовании из-
пласты) и термор ов химический состав полимеров не изменяет-
делий из термопла х происходит изменение их структуры и сос-
ся, а в реактопла
тава.

Изготовление д алей из пластмасс производится на специаль-
ном оборудовании После предварительных операций смешения,
таблетирования, с ки производят механическую обработку, сва-
окрашивают, металлизируют. Термопласты пре-
ривают, склеивают под давлением, прямым прессованием, экстру-
рерабатывают литье различными способами. Реактопласты перера-
зией и обрабатыва литьевым прессованием и литьем под давлением,
батывают прямым ническим путем, склеиванием и иногда химиче-
обрабатывают мех
ской сваркой. ко основные методы изготовления изделий из

Рассмотрим кр ласты прессуют в пресс- формах прямым или
пластмасс. Реакто Схема прямого способа показана на рис. 6.4.
литьевым способом материал в виде таблеток, порошка или волокни-
При этом способе ается в нагретую загрузочную камеру матрицы
стой массы заклады на *1* к нему прикладывается давление, материал
2. С помощью пуан ет теплоты форма уплотняется, заполняет всю
размягчается и за

оформляющую полость *3* и затем отверждается и выталкивается с помощью штока *4*.

При литьевом прессовании материал в пресс-форме в отдельной камере сначала разогревается, а затем через литниковые каналы выдавливается в оформительную камеру. Прямое прессование применяется для относительно несложных деталей, литьевое — для небольших деталей сложной конфигурации с повышенной точностью размеров.

Литье под давлением реактопластов проводится на литьевых машинах различных типов. Схема литья под давлением пластмасс с использованием червячной пластикации показана на рис. 6.5. Реактопласт в виде порошка или гранул поступает из бункера *4* в цилиндр *5*, стенки которого обогреваются до 50—100 °С (подогреватель *2*). После пластикации материал перемещается червяком *3* вперед, где накапливается определенная доза материала, и затем при поступательном движении червяка впрыскивается через сопло *6* в форму *1*, нагретую до 130 — 250 °С. По окончании отверждения материала форма раскрывается и готовая деталь *7* выталкивается толкателем. Литье под давлением термопластов в общих чертах соответствует литью реактопластов, но в период формования термопластов литьевая форма охлаждается.

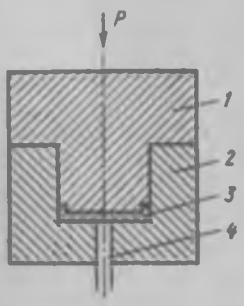


Рис 6 4. Схема прямого (компрессионного) прессования:

1 — пуансон; *2* — матрица; *3* — оформляющая полость (деталь); *4* — выталкиватель

Переработка термопластичных материалов экструзией осуществляется на специальных машинах — экструдерах (червячных прессах). Детали или полуфабрикаты получаются путем непрерывного выдавливания материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, через отверстия определенного сечения. Выдавливаемые заготовки проходят через калибрующие, охлаждающие и приемные устройства. Экструзией перерабатывают большинство термопастов, из которых получают профильные изделия, трубы, пленки, листы, кабельную изоляцию.

Широкое применение в электрических машинах, аппаратах, трансформаторах, приборах получили слоистые пластики, преимущественно электроизоляционного назначения. К слоистым пластикам относятся гетинакс, текстолит с разными наполнителями и древеснослоистые.

Гетинакс получается путем горячего прессования бумаги, пропитанной термореактивной смолой. Гетинакс изготовляется по ГОСТ 25500—82 и 2718—74 (из сульфатно-целлюлозной бумаги). При изготовлении гетинакса бумага пропитывается раствором смолы определенной концентрации и сушится при 100—140 °С на пропиточных машинах со скоростью 10—60 м/мин. После выхода из

сушильных камер бумага нарезается на листы, сортируется и укладывается в пачки в зависимости от требуемой толщины готовых листов. Затем пачки закладываются в многоэтажные гидравлические прессы, на которых при 150—160 °С и под давлением 6—10 МПа прессуются. Время выдержки принимается из расчета 2—5 мин на 1 мм толщины прессуемого листа, изготовляемого на основе фенольных смол, и 7—10 мин на 1 мм для гетинакса на основе эпоксидных смол. После выдержки при высокой температуре листы гетинакса охлаждаются без снятия давления до комнатной температуры, затем снимают давление, пачки вынимают из пресса, обрезают и упаковывают. Гетинакс согласно упомянутому ГОСТу выпускается не-

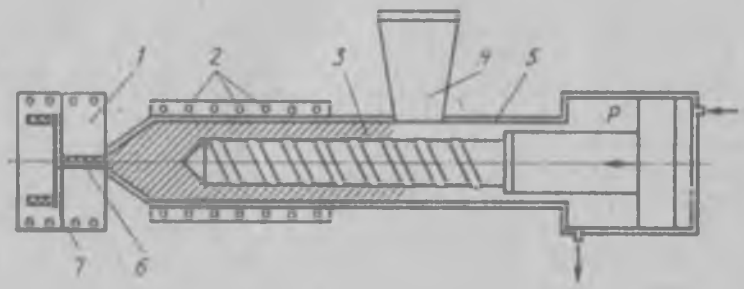


Рис. 6.5. Схема литья под давлением пластмасс с использованием червячной пластикации:

1 — форма; *2* — нагревательные элементы; *3* — червяк (дозатор-пластикатор); *4* — загрузочный бункер, *5* — материальный цилиндр; *6* — сопло; *7* — деталь

скольких марок. Отметим гетинакс марки Х, который имеет повышенную штампуемость, и марки ЛГ, изготовляемый на основе лавсановой бумаги и эпоксидной смолы. Основные особенности лавсанового гетинакса — повышенная способность к штампованию, высокие влагостойкость, механические и электрические свойства. Благодаря высокому уровню электрических свойств в условиях повышенной влажности детали из него не требуют лакировки.

Гетинакс марки 1 используется для панелей распределительных устройств, щитов, изоляционных перегородок в устройствах низкого напряжения. Выпускается на основе фенолоформальдегидных смол. Электрическая прочность гетинакса в перпендикулярном направлении слоям $E_{пр} = 20 \div 40$ МВ/м, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_r = 5 \div 6$. Дугостойкость гетинакса на фенолоформальдегидном связующем невысока — после воздействия дуги на поверхности материала остается науглероженный след. Так как гетинакс — слоистый материал, то его электрические свойства в направлении вдоль и поперек слоев не одинаковы. Удельное объемное сопротивление вдоль слоев в 50—100 раз, а электрическая прочность в 5—8 раз ниже, чем поперек слоев. Гетинакс обрабатывается режущим ин-

струментом из твердых сплавов. Поверхностный слой материала при обработке не снимается, так как это ведет к ухудшению влагостойкости.

Для изготовления печатных схем радиоэлектронной аппаратуры выпускается около 10 различных марок фольгированного с одной и с двух сторон гетинакса. Для изготовления такого гетинакса используется электролитическая медная фольга толщиной 0,035 — 0,01 мм.

Текстолит аналогичен гетинаксу, но изготовляется из пропитанной ткани (ГОСТ 25500—82 и 2910—74). Текстолит, изготовленный на основе хлопчатобумажной ткани, пропитанной фенолоформальдегидной смолой, может работать в интервале температур от—60 до + 105 °С. Отличительной особенностью текстолита является повышенное сопротивление раскалыванию и истиранию. Текстолит в 5—6 раз дороже гетинакса.

За последние 10—15 лет промышленностью освоен и серийно выпускается ряд новых марок листовых электротехнических стеклотекстолитов, например стеклотекстолит марки СТЭФ, обладающий высокой механической прочностью при повышенных температурах, огнестойкие стеклотекстолиты СТЭБ и СТЭБ-Н, стеклотекстолит СТЭД с повышенными диэлектрическими характеристиками в условиях повышенной относительной влажности. Применение стеклопластиков в качестве электроизоляционного и конструкционного материала в электромашиностроении позволяет создавать электрические машины разных классов нагревостойкости, повышать их надежность в эксплуатации и решать ряд новых технических задач.

К другим видам слоистых пластиков относятся д р е в е с н о с л о и с т ы е п л а с т и к и (ДСП) типа фанеры на бакелитовой смоле, более дешевые, чем гетинакс, но с худшими электроизоляционными свойствами и более гигроскопичные.

Кроме листовых слоистых пластиков находят применение и намотанные изделия, которые известны под названием гетинаксовых (бакелитовых) трубок и цилиндров различной длины и диаметра. Свойства намотанных изделий уступают свойствам листовых слоистых пластиков.

В различных областях электротехники находят применение электроизоляционные органические полимерные пленки — тонкие и гибкие материалы, которые могут быть намотаны в рулоны различной ширины. Пленки нашли широкое применение в производстве конденсаторов, электрических машин, аппаратов и кабельных изделий. Электроизоляционным пленкам для отличия их от пленок другого назначения присваиваются специальные марки. Это необходимо, так как от электроизоляционной пленки требуются особая чистота исходного полимера, отсутствие следов катализатора и других загрязнений, чистота пленки при изготовлении и ряд других специфических требований. Органические полимерные пленки могут быть разделены на две большие группы, разделяющиеся по электрофизи-

ческим свойствам: неполярные и полярные пленки. Неполярные пленки характеризуются низким значением $\varepsilon_r = 2 \div 2{,}5$ и малыми значениями тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-4}$), благодаря чему они могут применяться в высокочастотной технике, хотя достаточно широко используются и при постоянном и переменном напряжении промышленной частоты. Полярные пленки имеют повышенные значения ε_r от 3 до 10—15 и $\operatorname{tg}\delta = 10^{-3} \div 10^{-2}$. Они применяются как при переменном напряжении промышленной частоты, так и при постоянном напряжении.

Для изоляции обмоток низковольтных электрических машин важную роль играют полимерные пленки с повышенной нагревостойкостью. Малая толщина пленок наряду с высокими значениями электрической и механической прочности обеспечивает не только увеличение надежности, но и существенное улучшение технико-экономических показателей. Применение пленок толщиной 0,2—0,35 мм позволяет механизировать обмоточно-изолировочные работы.

§ 6.5. Резины

Широкое применение в электропромышленности и особенно в кабельных изделиях получила резина. Резина состоит из многокомпонентной смеси на основе каучуков и близких к ним по свойствам веществ, называемых эластомерами. Резина для получения необходимых свойств подвергается процессу так называемой вулканизации.

Натуральный каучук (НК) получают из млечного сока (латекса) растений — каучуконосов. По химическому составу он представляет собой полимерный углеводород состава $(C_5H_8)_n$, в отдельных звеньях молекулы которого имеются двойные связи:

$$-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}=C-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}=CH-CH_2-$$

Высокая эластичность каучука обусловлена тем, что его молелекулы имеют зигзагообразную, «шарнирную» форму. Под действием растягивающих усилий форма цепочки каучука приближается к прямолинейной, при этом получаются рентгенограммы, характерные для кристаллических тел, имеющих упорядоченное расположение молекул в пространстве. В нерастянутом состоянии каучук имеет свойства аморфных тел. Чистый натуральный каучук для изготовления электрической изоляции не применяется, так как он и его растворители имеют малую стойкость к действию как повышенных, так и пониженных температур. Эти недостатки устраняются после проведения процесса вулканизации, т. е. нагрева после введения в каучук серы. При вулканизации двойные связи некоторых цепочечных молекул разрываются и сшивают цепочки молекул через атомы — S — с образованием пространственной структуры.

По своим диэлектрическим характеристикам натуральный каучук может быть отнесен к практически неполярным диэлектрикам $\rho \approx 10^{14}$ Ом·м; $\varepsilon_r = 2{,}4$; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}002$. При увеличении в составе резины серы после вулканизации каучука наблюдается увеличение ε_r и $\mathrm{tg}\delta$, связанное с усилением полярных свойств материала из-за влияния атомов серы. Зависимости ε_r и $\mathrm{tg}\,\delta$ вулканизированного каучука от содержания в нем серы показаны на рис. 6.6. При содержании серы в количестве 1—3 % получают мягкую резину, обладающую высокой растяжимостью и упругостью. Диэлектрические свойства резин сильно зависят от состава резиновой смеси и от технологии. Для сажевых резин, в которые в качестве наполнителей для улучшения механических свойств вводится сажа, электроизоляционные свойства понижены, поэтому в электротехнике они применяются только там, где не требуются высокие электрические свойства, например для изготовления защитных оболочек (шлангов) резиновых кабелей. Для обычных электроизоляционных резин диэлектрические характеристики лежат в следующих пределах: $\rho \approx 10^{13}$ Ом·м; $\varepsilon_r = 3 \div 7$; $\mathrm{tg}\,\delta = 0{,}02 \div 0{,}1$ (для сажевых резин 0,25); $E_{пр} = 20 \div 30$ МВ/м.

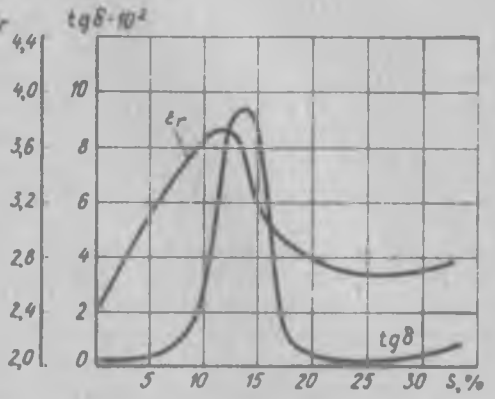


Рис. 6.6. Зависимость ε_r и $\mathrm{tg}\delta$ вулканизированного каучука от содержания в нем серы

При изготовлении резин в состав резиновой смеси вводят различные наполнители (мел, тальк), а также красители, катализаторы (ускорители) процесса вулканизации и другие вещества. На токопроводящие жилы резиновая смесь накладывается в виде трубки определенной толщины (методом экструзии) и в таком виде вулканизируется. Различные конструкционные диэлектрические изделия вулканизируют в прессах с помощью пресс-форм.

Преимуществом применения резины для изоляции и защитной оболочки кабелей является возможность получения требуемой гибкости, влагостойкости, маслостойкости, способности не распространять горение и высоких электрических и физико-механических характеристик. Повышенная нагревостойкость резин достигается применением синтетических каучуков типа кремнийорганических.

Резина находит применение для изготовления изоляции установочных и монтажных проводов, гибких переносных проводов и кабелей, а также для защитных перчаток, калош, ковриков и изоляционных трубок, применяемых при монтаже проводов.

Как электроизоляционный материал резина имеет и ряд недостатков. К их числу следует отнести низкую нагревостойкость. При нагреве резина стареет, становится хрупкой и трескается. Быстрое старение резины наблюдается также при воздействии на нее света, особенно ультрафиолетового. Резина не устойчива к действию озона, который может образовываться при ионизации воздушных включений или в окружающем воздухе при высоких напряженностях электрического поля. Особенно резко озон влияет на старение резины, если она работает в растянутом состоянии, так как при этом образующиеся в начале старения трещины могут углубляться, в результате чего озон проникает все дальше в глубь материала. Свободная сера, не связанная химически с каучуком, которая использовалась как вулканизирующий агент, действует на медные жилы, образуя на поверхности сернистую медь, кроме того, она ухудшает электроизоляционные свойства резин. Поэтому сера не рекомендуется для изготовления изоляционной резины, а применяется только при изготовлении шланговых резин. В качестве вулканизирующего агента для изоляционных резин используют тиурам — органическое соединение, содержащее серу. Тиурам обладает тем свойством, что придает резинам более высокую стойкость против теплового старения по сравнению с сернистыми соединениями. В то время как для сернистых резин допускается рабочая температура +55 °С, для тиурамовых резин она повышается до +65 °С, а при наличии свинцовой или поливинилхлоридной оболочки даже до +80 °С. Если необходимо на медную жилу кабельного изделия нанести обычную резиновую изоляцию, то медь предварительно покрывается разделительным слоем олова либо другого металла, не подверженного влиянию серы, или бумагой.

При высокой степени вулканизации в структуре молекулы каучука почти полностью исчезают двойные связи и получается твердый электроизоляционный материал, называемый эбонитом. Эбонит содержит от 30 до 35 % серы, отличается высокой твердостью, не эластичен, имеет малую холодостойкость. Относительное удлинение перед разрывом для технических резин составляет 150—500 %, а для эбонита — 2—6 %. Выпускают эбонит в виде прутков и трубок, которые хорошо поддаются механической обработке. В электротехнической промышленности эбонит применяется как материал, имеющий конструкционное и электроизоляционное значение.

Синтетический каучук (СК) широко применяют помимо натурального каучука, особенно в кабельной промышленности. Резины для защитных оболочек кабелей изготовляются исключительно на основе СК, а в изоляционных смесях более половины НК заменяют на СК.

Бутиловый каучук (бутилкаучук) получают совместной полимеризацией изобутилена с небольшим количеством изопрена или бутадиена. Бутилкаучук отличается более высокой стойкостью, чем натуральный, к тепловому старению. Резины на основе

бутилкаучука отличаются влагостойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами, имеют более высокую озоностойкость, чем резины на основе НК, что определяет их применение для изготовления резиновой изоляции, работающей при относительно высоких температурах и высоких напряжениях. К недостаткам бутилкаучука относятся значительные остаточные деформации при растяжении и сжатии.

Хлоропреновый каучук получают полимеризацией хлоропрена. В СССР этот каучук выпускают под названием «наирит», за рубежом — «неопрен». Химическое строение хлоропренового каучука обусловливает его весьма ценные специфические свойства из-за присутствия атомов хлора в молекуле хлоропрена, который, является полярным диэлектриком и обладает невысокими электроизоляционными свойствами, но в то же время имеет высокую стойкость к действию масла, керосина, бензина. Резины на основе этого каучука имеют значительно более высокую стойкость против действия озона и большую устойчивость к старению, чем резины на основе НК. С наличием хлора связано и другое свойство хлоропренового каучука — негорючесть.

Стойкость наиритовых резин к нефтепродуктам выгодно используется в кабелях, эксплуатируемых при буровых и разведочных работах. Негорючие резины используются в кабелях, предназначенных для работы в шахтах и пожароопасных помещениях.

Недостаток хлоропренового каучука и резин на его основе — низкие электроизоляционные характеристики, повышенная влагопроницаемость, низкая холодоустойчивость, резкое снижение прочности и относительного удлинения при повышении температуры.

Кремнийорганические каучуки в основе строения молекулы имеют полисилоксановую цепочку (см. с. 214). Для получения резиновых смесей на основе кремнийорганического каучука к нему добавляют наполнители — кремнекислоту (белая сажа) и диоксид титана и вулканизующий агент — пероксид бензоила. Резины на основе кремнийорганических каучуков обладают высокой нагревостойкостью. Длительная рабочая температура 250 °С, разложение полимера наступает при 400 °С. К числу преимуществ кремнийорганических резин относится их высокая холодоустойчивость — они сохраняют гибкость при температуре от —70 до — 100° С и высокие электроизоляционные свойства.

Недостатками кремнийорганических каучуков и резин на их основе являются невысокие механические свойства, малая стойкость к растворителям и дороговизна.

В кабельных изделиях находят применение кремнийорганические резины марок К-69, К-1520, К-673, К-69Т.

§ 6.6. Лаки, эмали, компаунды

Электроизоляционные лаки представляют собой коллоидные растворы на лаковой основе, образующей после удаления растворителя пленку, которая обладает электроизоляционными свойствами.

Лаковая основа представляет собой ту часть лака, которая образует пленку и состоит из битумов, высыхающих растительных масел, природных или синтетических смол, а также из их композиций.

Синтетические и природные смолы, применяемые при изготовлении электроизоляционных лаков, эмалей и компаундов, описаны в § 6.3. Рассмотрим также применяемые для лаковой основы растительные масла и битумы.

Растительные масла, получаемые из семян различных растений, способны под действием нагрева, освещения, соприкосновения с кислородом воздуха и других факторов переходить в твердое состояние. Высыхание масел является сложным химическим процессом, связанным с полимеризационными процессами и поглощением маслом некоторого количества кислорода из воздуха, поэтому масса льняного и подобного масел при сушке может несколько увеличиваться. Наиболее широко применяются льняное и тунговое масла. Эти масла, если их нанести на поверхность, быстро высыхают с образованием твердой неплавкой пленки. Пленки из тунгового масла не растворяются в органических растворителях, стойки к действию воды, а пленки льняного масла почти не растворяются в растворителях. Наиболее высокими электроизоляционными свойствами обладает тунговое масло, которое является токсичным продуктом. Катализаторами реакций высыхания масел являются соединения свинца, кобальта, кальция, вводимые в масла в виде солей, различных кислот. Такие вещества называются *сиккативами*.

Битумы — черные, твердые или пластичные вещества с аморфной структурой, состоящие в основном из сложной смеси углеводородов и продуктов их дальнейшей полимеризации и окисления. Природные битумы, называемые также асфальтами, содержат различные минеральные примеси. Битумы при нагревании переходят в жидкое состояние, при охлаждении затвердевают. При низких температурах они хрупки и дают характерный излом в виде раковины. Лучшие электроизоляционные свойства, как правило, имеют более тугоплавкие битумы, они труднее растворяются и более хрупки. Температура размягчения битумов может быть повышена путем пропускания воздуха через расплавленный битум. По своим диэлектрическим характеристикам битумы могут быть отнесены к слабополярным соединениям. Для электроизоляционной техники наиболее широко применяют нефтяные битумы марок БН-III, БН-IV, БН-V и более тугоплавкие спецбитумы марок В и Г.

Растворители — летучие жидкости, применяемые для растворения лаковых основ и улетучивающиеся в процессе образования

пленки. Растворителями могут служить ароматические углеводороды, спирты, сложные и простые эфиры, скипидар и др. В состав лака, кроме того, могут входить следующие дополнительные вещества.

Сиккативы — вещества, ускоряющие процесс высыхания растительных масел и лаков. Пластификаторы — вещества, придающие эластичность и ударную прочность лаковой пленке. Отвердители — соединения, способствующие отверждению пленки лака. Инициаторы и ускорители — вещества, ускоряющие процесс образования полимеров. Ингибиторы — соединения, препятствующие преждевременному загустеванию.

Электроизоляционные эмали представляют собой лаки, в состав которых входят пигменты — высокодисперсные неорганические вещества, повышающие твердость и механическую прочность лаковой пленки, теплопроводность, дугостойкость. В качестве пигментов часто применяют диоксид титана, железный сурик и др.

Электроизоляционные компаунды в основном состоят из тех же веществ, которые входят в состав лаковой основы электроизоляционных лаков, но в отличие от лаков не содержат растворителей. В момент применения при нормальной и повышенной температуре компаунды находятся в жидком состоянии и твердеют после охлаждения или в результате происходящих в них химических процессов.

Кроме того, в состав компаундов могут входить активные разбавители, понижающие вязкость компаунда, пластификаторы, отвердители, инициаторы и ингибиторы, назначения которых те же, что и в лаках. В состав компаунда могут также входить наполнители — неорганические и органические порошкообразные или волокнистые материалы, применяемые для уменьшения усадки, улучшения теплопроводности, уменьшения температурного коэффициента расширения и снижения стоимости. В качестве наполнителей применяют пылевидный кварц, тальк, слюдяную пыль, асбестовое и стеклянное волокно и ряд других.

Электроизоляционные лаки и компаунды широко применяются в электроизоляционной и кабельной технике, в производстве электрических машин, турбо- и гидрогенераторов, аппаратов, трансформаторов, распределительных устройств, в высокочастотной технике.

Выбор электроизоляционных лаков или компаундов для той или иной конструкции основывается на знании технических требований для данной конструкции и условий ее работы, на физических и электрических характеристиках лаков и компаундов, определяемых соответствующими ГОСТами и техническими условиями (ТУ).

По назначению и выполняемым функциям электроизоляционные лаки принято подразделять на три основные группы: пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки предназначены для пропитки изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, для пропитки различных

электроизоляционных материалов волокнистого строения — бумаги, ткани, стеклоткани, электрокартона и др.

Покровные лаки используют для создания внешней защитной отделки различных электроизоляционных деталей, металлических узлов и деталей, покрытия предварительно пропитанных обмоток электрических машин и аппаратов. К этой группе относятся также эмаль-лаки, применяемые в кабельной промышленности, и полупроводящие лаки, обладающие повышенной удельной проводимостью.

Клеящие лаки предназначаются для склеивания различных электроизоляционных материалов и деталей, слюды, бумаги, картона и т. п.

Приведенная классификация лаков в значительной мере является условной, так как один и тот же лак иногда может служить и пропиточным и клеящим, например бакелитовый лак при производстве слоистых пластиков.

По способу сушки электроизоляционные лаки делятся на лаки воздушной, или холодной, сушки и печной, или горячей.

Лаки воздушной сушки высыхают и образуют пленки требуемого качества при комнатной температуре. Образование пленки лака воздушной сушки может происходить в результате удаления летучих растворителей, окислительных или полимеризационных процессов (в масляных или битумных лаках), а также при введении соответствующих отвердителей холодного отверждения в лаках на основе некоторых синтетических смол.

Лаки печной, или горячей, сушки содержат в основе высококипящие растворители, медленно улетучивающиеся при нормальной температуре, или композиции различных термореактивных синтетических смол, в которых во время сушки при высокой температуре 100 °С и выше происходят реакции окисления, полимеризации или поликонденсации.

По химическому составу лаковой основы электроизоляционные лаки делятся на три основные группы: масляные, смоляные, эфироцеллюлозные.

Масляные (маслосодержащие) лаки состоят из высыхающих растительных масел и натуральных или синтетических смол или битумов с добавкой сиккативов. Из высыхающих масел наиболее часто применяют льняное, тунговое, ойтисиковое или их смеси. Растворителями являются алифатические углеводороды (керосин, уайт-спирит), ароматические (толуол, ксилол) или их смеси, а также скипидар. К группе масляных лаков относятся масляно-битумные, масляно-канифольные, масляно-алкидные лаки. В состав масляно-битумных лаков входят растительные масла в композиции с асфальтами и асфальтитами либо искусственными нефтяными битумами с добавкой сиккатива. В состав масляно-канифольных лаков входят кроме высыхающих растительных масел препараты, содержащие канифоль. Масляно-алкидные лаки представляют собой продукт ре-

акции поликонденсации многоатомных спиртов с многоосновными кислотами.

Смоляные лаки получаются на основе синтетических смол. Примером являются фенолоформальдегидные смолы, растворенные в этиловом спирте, водные феноло -или крезолоформальдегидные лаки, не содержащие спирта. К этой же группе относятся лаки на основе полиэфирных, эпоксидных, кремнийорганических смол, лаки на основе полиэфирных, эпоксидных, кремнийорганических смол, лаки на основе натуральных смол или битумов.

Эфироцеллюлозные лаки, представляющие собой растворы различных эфиров целлюлозы (нитроцеллюлоза, этилцеллюлоза) с добавкой пластификаторов смеси со сложными эфирами, спиртами, кетонами и ароматическими углеводородами имеют ограниченное применение в электротехнической промышленности.

Электроизоляционные компаунды по своему назначению и выполняемым функциям делятся на две основные группы: пропиточные и заливочные. Пропиточные компаунды служат для заполнения пор, капилляров и воздушных включений в электроизоляционных материалах, используемых главным образом для обмоток электрических машин, катушек аппаратов, трансформаторов и других электротехнических конструкций. После пропитки повышается электрическая прочность материала и всей конструкции в целом, улучшаются теплопроводность, теплоотдача обмоток, что позволяет увеличить мощность электрических машин и аппаратов при тех же габаритах, увеличиваются механическая прочность, влагостойкость, срок службы всей конструкции.

По отношению к нагреву электроизоляционные компаунды делятся на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные компаунды твердые при нормальной температуре, при нагревании размягчаются, становятся пластичными и переходят в жидкое состояние, при охлаждении снова затвердевают. Расплавление и отверждение компаундов этой группы можно проводить многократно. Для изготовления этих компаундов часто применяют нефтяные битумы в сочетании с растительными и минеральными маслами, канифолью и некоторыми термопластичными полимерами.

Термореактивные компаунды в момент их применения находятся в жидком состоянии, а затем затвердевают в результате происходящих в них химических реакций. Отверждение компаундов этой группы происходит под действием отвердителя или катализатора. После отверждения компаунд становится твердым, неплавким и не растворимым в обычных растворителях. Как и лаки, эти компаунды делятся на компаунды горячего и холодного отверждения. Компаунды горячего отверждения переходят в твердое состояние при специальной термической обработке, а компаунды холодного отверждения переходят в твердое состояние под действием отвердителей.

По химическому составу электроизоляционные компаунды делятся на компаунды, изготовляемые на основе нефтяных битумов, растительных или минеральных масел и канифоли, и компаунды на основе синтетических смол. В компаунды, изготовляемые на основе различных нефтяных битумов, иногда добавляют льняное или минеральное масло и канифоль. Компаунды на основе синтетических смол изготовляются на основе полиэфирных, эпоксидных, эпоксидно-полиэфирных кремнийорганических и прочих смол и их композиций.

§ 6.7. Волокнистые материалы

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.

Непропитанные волокнистые материалы по виду исходного сырья можно подразделить на материалы из: а) растительных волокон; б) бумаги, картона, хлопчатобумажной пряжи и ткани, в) животных волокон (натуральный шелк); г) искусственных и синтетических волокон (ацетатный шелк, капрон и др.); д) неорганических волокон (стеклянное волокно, асбест).

Дерево является одним из первых электроизоляционных и конструкционных материалов, получивших применение в электротехнике, чему способствовали его дешевизна и легкость механической обработки. Основой дерева, как и всякого растительного волокна, является органическое вещество — целлюлоза, представляющая собой полимерный углеводород $(C_6H_{10}O_5)_n$, молекулы которого имеют вид длинных цепей с числом звеньев до двух тысяч. В каждом элементарном звене молекулы содержится по три гидроксильных группы OH, обусловливающих полярность целлюлозы. Эти группы смещаются в электрическом поле по отношению ко всей молекулярной цепи, что создает эффект дипольно-радикальной поляризации. Поэтому целлюлоза имеет относительно большие диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь ($\varepsilon_r = 6{,}5 \div 7$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}005 \div 0{,}01$).

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 и горючесть. При

пропитке дерева льняным маслом или различными смолами свойства улучшаются. Если детали из дерева предназначены для работы в трансформаторном масле, то после сушки они пропитываются тем же маслом.

В электротехнике дерево применяется для изготовления деревянных опор линий электропередачи, крепежных деталей трансформаторов высокого и низкого напряжения, пазовых клиньев электрических машин и т. п.

Бумаги и картоны — листовые или рулонные материалы коротковолокнистого строения, состоящие в основном из целлюлозы. Наиболее тонкий и высококачественный вид электроизоляционных бумаг — конденсаторная бумага, применяемая для изготовления диэлектрика конденсаторов. Конденсаторную бумагу изготовляют из сульфатной древесной целлюлозы. В СССР разработан простой способ производства борированной целлюлозы, обеспечивающий конденсаторной бумаге резко сниженную зависимость tg δ от плотности бумаги. По новой технологии в СССР выпускается бумага марок: КОН — обычная, СКОН — специальная, улучшенного качества, МКОН — с малыми диэлектрическими потерями, ЭМКОН — с высокой электрической прочностью и малыми потерями.

При использовании конденсаторной бумаги в качестве диэлектрика обычно берут несколько слоев с применением различных пропиточных масс, в качестве которых могут использоваться различные неполярные, полярные, жидкие, полужидкие и твердые пропиточные массы. Применение нескольких слоев обеспечивает перекрытие сквозных отверстий и проводящих включений в отдельных листах. Бумага не является высокочастотным диэлектриком. На переменном токе она используется до частоты 10 кГц.

К числу старейших материалов, применяемых в качестве электроизоляционных, относится электрокартон. 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.

Для производства электроизоляционных картонов наиболее широко применяют сульфатную целлюлозу, а в некоторые виды картонов добавляют хлопковую целлюлозу высокой степени чистоты. Картон марки АМ, в который добавляется хлопковая целлюлоза, имеет лучшие электрические характеристики, чем картон марки А. Электроизоляционные свойства картона улучшают при пропитке его жидким диэлектриком, поэтому электроизоляционный картон широко применяется в качестве основного твердого материала в силовых трансформаторах, для которых он выпускается пяти различных марок.

Из материалов волокнистого строения в электромашинно-и аппаратостроении широко применяется листовая и трубчатая фибра, в основном в качестве конструкционного и изоляционного матери-

ала. Так как под действием электрической дуги фибра выделяет большое количество газов, то в электрических аппаратах она используется также и в качестве дугогасительных элементов, однако использование фибры для этой цели сокращается из-за возможности применения других материалов с более высокими диэлектрическими и механическими характеристиками (органическое стекло, винипласт, фенолоформальдегидные смолы). Изготовляется фибра из тонкой бумаги, пропускаемой через раствор хлористого цинка. После намотки на стальной барабан и получения нужной толщины слоя, в котором отдельные слои бумаги прилипают друг к другу, фибра срезается с барабана, тщательно промывается водой и прессуется. Промывка необходима для удаления следов хлористого цинка, ухудшающего электроизоляционные свойства фибры. Листовую электротехническую фибру изготовляют марки ФЭ по ГОСТ 14613—69 толщиной 0,4—12 мм. Цвет фибры в зависимости от использованного красителя может быть красного, коричневого, черного или серого цвета.

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 180 °С фибра медленно обугливается и при температуре около 300 °С воспламеняется.

Лакоткани — гибкие электроизоляционные материалы, представляющие собой ткань, пропитанную электроизоляционным лаком. К пропитанным волокнистым материалам относятся также лакобумаги и электроизоляционные ленты. 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 изготовляют 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), изготовляемые на масляных лаках, и черные — на масляно-битумных лаках. Светлые лакоткани имеют высокие электрические характеристики, устойчивы к воздействию нефтяных масел, бензина, воды, но имеют повышенную склонность к тепловому старению, в процессе которого быстро нарастает жесткость при нагреве. Черные лакоткани 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 шел-

ковые, но они менее устойчивы к резкому повышению температуры, например при пайке изолированных проводников. В производстве лакотканей используется также стеклоткань с различными типами пропитывающих составов (масляных, кремнийорганических, фторопластовых), многие марки которых отличаются высокой устойчивостью к воздействию температуры, влажной среды и других факторов.

Основой лакотканей является, как это было отмечено, различного рода ткань, выполненная методами специальной обработки длинноволокнистого сырья, называемого волокном. Для электроизоляционной техники используются различные типы волокон, в том числе асбестовые волокна, получаемые из минерала «асбест» довольно сложного состава. Асбестовые волокна по сравнению с органическими менее прочны и более жестки, поэтому в ряде случаев к асбестовому волокну добавляют хлопковые синтетические и другие волокна. Асбестовая пряжа применяется для оплетки нагревостойких проводов и кабелей, предназначенных для работы при температуре 50–450 °С. В электропромышленности выпускаются асбестовые электро- и теплоизоляционные ленты, шнуры, картоны, доски.

В электромашино- и электроаппаратостроении и других отраслях народного хозяйства широко используются электроизоляционные гибкие трубки. Наиболее широкое применение получили лакированные трубки и трубки, изготовляемые на основе каучука и называемые эластомерными.

§ 6.8. Слюда и слюдяные материалы

Слюды представляют собой группу материалов, относящихся к водным алюмосиликатам с ярко выраженной слоистой структурой, которая обусловливает высокую анизотропию свойств, т. е. неодинаковость физико-механических и электрических характеристик в направлении вдоль и поперек слоев. В качестве электрической изоляции в настоящее время применяют два вида минеральных слюд: мусковит и флогопит.

Кроме природных слюд применяются также и синтетические. Слюда является весьма ценным природным минеральным электроизоляционным материалом. Использование ее в качестве изоляции крупных турбо- и гидрогенераторов, тяговых электродвигателей и в качестве диэлектрика в некоторых конденсаторах связано с ее высокой электрической прочностью, нагревостойкостью, механической прочностью и гибкостью. В природе слюда встречается в виде кристаллов, которые способны легко расщепляться на пластинки по параллельным друг другу плоскостям (плоскостям спайности).

Слюды — достаточно широко распространенные минералы и составляют 3,8 % массы земной коры, однако промышленные месторождения мусковита и флогопита, содержащие кристаллы доста-

точно крупных размеров, немногочисленны. В нашей стране крупноразмерный мусковит добывается в Карельской АССР, в Иркутской и в Мурманской областях, а флогопит — в Мурманской области и в Якутской АССР. За рубежом крупными слюдяными месторождениями располагает Индия.

Химический состав природных слюд может быть приближенно выражен следующими формулами:

мусковит — $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$

флогопит — $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$

Кроме того, в слюды могут входить другие химические элементы, оказывающие влияние на их свойства.

В месторождениях слюду обычно находят вместе с кварцем, полевым шпатом и другими минералами. Примесь трехвалентного железа придает мусковиту коричневую или красноватую окраску, причем мусковит с такой окраской считается наилучшим. Мусковит зеленоватого цвета с примесью двухвалентного железа имеет ухудшенные диэлектрические свойства, в частности пониженное удельное объемное сопротивление.

Мусковит и флогопит в практических условиях применения слюдяной изоляции имеют высокую химическую стойкость, причем мусковит более стоек, чем флогопит. Сильные кислоты и щелочи действуют на мусковит и флогопит только при значительной концентрации, при нагревании и длительном контакте.

По электрическим свойствам мусковит является одним из лучших электроизоляционных материалов и превосходит в этом отношении флогопит. Кроме того, он более прочен механически, более тверд, гибок и упруг, чем флогопит. При нагревании слюды до некоторой температуры из нее начинает выделяться входящая в ее состав вода. При этом в результате вспучивания слюда теряет прозрачность, толщина ее увеличивается, механические свойства и электрические характеристики ухудшаются. Для различных слюд температура обезвоживания колеблется в весьма широких пределах: у мусковитов она обычно не менее 200 °С, у флогопитов — не менее 800 °С. Некоторые разновидности флогопита имеют более низкие температуры обезвоживания (150—250 °С), что связано с повышенным содержанием воды. Такие слюды находят применение только для малоответственных целей.

Температура плавления слюд зависит от их химического состава и находится в пределах 1145—1400 °С. Расплавленная слюда при застывании не образует кристаллов прежнего состава. Получаемый после остывания расплава стекловидный материал не является слюдой.

Синтетическая слюда получается путем расплавления в высокотемпературной печи шихты специально подобранного состава с последующим весьма медленным охлаждением расплава, в результате

чего кристаллизуется синтетическая слюда. Синтетическая слюда, называемая фторфлогопитом, обладает более высокой химической стойкостью, нагревостойкостью, радиационной стойкостью, чем природный флогопит. Это связано с тем, что во фторфлогопите отсутствует кристаллизационная вода, гидроксильные группы OH в нем замещены на ионы фтора. Синтетическая слюда значительно дороже, чем природная. Она получается в виде сравнительно небольших кристаллов и труднее, чем природная слюда, расщепляется. По этим причинам синтетическая слюда не может рассматриваться как заменитель природной, однако она представляет большой интерес из-за высоких электрических свойств. Фторфлогопит находит применение в качестве изоляционных материалов в электронных лампах, для окон волноводов, в качестве диэлектрика конденсаторов, работающих до температуры 600—700 °С, и для других изделий, применяемых в радиоэлектронике. Кроме того, на основе синтетической слюды может быть изготовлено, как и на основе природной слюды, много различных интересных для техники материалов. Сравнение свойств мусковита, флогопита и фторфлогопита приведено в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Вид слюды	Нагревостойкость, °С	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц	Плотность, кг/м³
Мусковит	500—600	10^{12}—10^{14}	0,0003	$(2,6 \div 2,8) \cdot 10^3$
Флогопит	800—900	10^{11}—10^{12}	0,0015	$(2,7 \div 2,8) \cdot 10^3$
Синтетическая слюда (фторфлогопит)	1100	10^{14}—10^{15}	0,0002	$(2,6 \div 2,8) \cdot 10^3$

Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь слюды мусковита от температуры при разных частотах приведены на рис. 6.7, а зависимость электрической прочности мусковита, флогопита и фторфлогопита от толщины — на рис. 6.8.

Слюдяные материалы изготовляют на основе так называемой щепаной слюды. После очистки слюды от посторонних минералов при ее извлечении из горных пород она носит название *забойного сырца*. Забойный сырец разбирается вручную, раскалывается ножом на пластинки и обрезается. Полученная щепаная слюда применяется для производства миканитов.

Миканиты представляют собой листовые или рулонные материалы, получаемые склеиванием между собой пластинок щепаной (щипанной) слюды. В качестве склеивающих материалов применяются

различные, преимущественно синтетические, смолы или лаки. Часто миканитами называют листовые материалы на основе щепаной слюды. Гибкие или рулонные материалы называются микалентой или микафолием.

В зависимости от вида применяемой слюды различают миканиты из мусковита и флогопита и их смеси. По областям применения различают пять основных видов слюдяных листовых материалов: коллекторный, прокладочный, формовочный, гибкий и термоупорный.

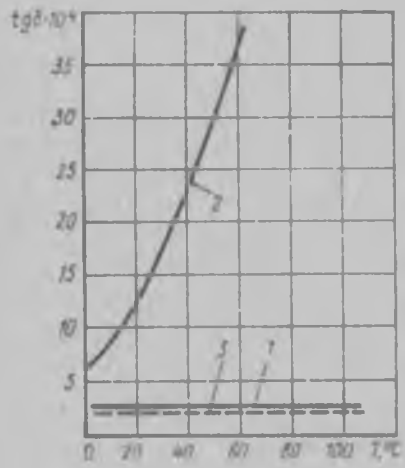


Рис. 6.7. Зависимость tgδ слюды от температуры:

1 — мусковит при $f=1$ МГц; 2 — мусковит при $f=50$ Гц; 3 — синтетическая слюда (фторфлогопит) при $f=1$ МГц и 50 Гц

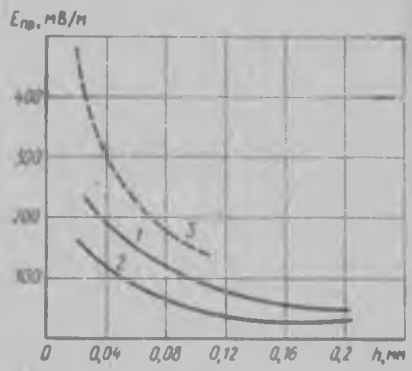


Рис. 6.8. Зависимость электрической прочности слюды от толщины:

1 — мусковит; 2 — флогопит; 3 — фторфлогопит

Различные миканитовые материалы обладают сравнительно высокой нагревостойкостью.

Коллекторный миканит, изготовляемый из флогопита, как более легко истирающегося, используют в виде штампованных заготовок, которые прокладываются между медными пластинами коллекторов электрических машин. Коллекторный миканит обладает хорошими механическими свойствами и дает малую (не более 2 %) усадку в условиях большого давления и повышенной температуры (до 160 °С).

Прокладочный миканит применяют для создания различных электроизоляционных прокладок, шайб и т. п. Он изготовляется из мусковита, флогопита или их смеси с малым количеством связующего — глифталя или кремнийорганической смолы (3—20 %).

Формовочные миканиты содержат от 5 до 20 % связующего (глифталя или кремнийорганической смолы), остальное — слюда.

При нагреве они способны формоваться и сохранять приобретенную конфигурацию при охлаждении. Применяются при изготовлении коллекторных манжет, фланцев, каркасов, катушек, трубок и других изделий.

Разновидностью формовочного миканита является микафолий — один или несколько слоев щепаной слюды, склеенных лаком между собой и бумажной или стекловолокнистой подложкой, покрывающей слюду с одной стороны. Он применяется для изготовления твердой изоляции стержней якорных обмоток машин высокого напряжения, а изготовляется из флогопита или мусковита на глифталевом, полиэфирном или кремнийорганическом связующем.

Микалента является разновидностью гибкого миканита. Она клеится из щепаной слюды крупных размеров только в один слой и имеет подложки из стеклоткани, стеклосетки или микалентной бумаги с двух сторон. Микалента является основной изоляцией обмоток многих электрических машин высокого напряжения.

Термоупорный (нагревостойкий) миканит не содержит органического связующего. Изготовляется он на основе флогопита, связующим которого служит фосфорнокислый аммоний (аммофос). Такой миканит, применяемый для изготовления изоляции электронагревательных приборов, способен работать при температуре в несколько сотен градусов.

Слюдиниты и слюдопласты являются разновидностью слюдяных бумаг, получаемых из слюдяных отходов без предварительной ручной щепки.

Слюдиниты, называемые за рубежом «самика», изготовляют из слюды «мусковит». Измельченная слюда с водой отливается на сетку бумагоделательной машины, в результате получается слюдинитовая бумага толщиной 10—150 мкм. Такая бумага разрушается при соприкосновении с полярными жидкостями или водой. При пропитке и склеивании с подложками получаются листовые слюдиниты (коллекторный, формовочный, гибкий), слюдинифолий (рулонный материал) и слюдинитовые ленты. Слюдинитовые материалы по свойствам приближаются к миканитовым, но, как правило, имеют пониженную по сравнению с миканитами влагостойкость и малое удлинение перед разрывом.

Слюдопластовые бумаги служат для изготовления слюдопластов (делятся по применению на те же группы, что и слюдиниты). Слюдопластовые бумаги изготовляются, как и слюдинитовые бумаги, на бумагоделательной машине, но без применения связующего. Такая технология возможна благодаря тому, что сразу после расщепления кристаллы (чешуйки) природной слюды способны прочно соединяться за счет сил межмолекулярного взаимодействия (силы когезии). По сравнению со слюдинитами слюдопласты имеют, как правило, более высокую механическую прочность и более высокую устойчивость к воздействию электрической короны (короностойкость).

§ 6.9. Стекло и керамика

Стеклообразное состояние является основной разновидностью аморфного состояния вещества. Стеклами называют аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава независимо от их химического состава и температурной области затвердевания, приобретающие в результате постепенного увеличения вязкости механические свойства твердых тел, причем процесс перехода из жидкого состояния в твердое является обратимым.

В настоящее время в составы стекол введена большая часть элементов Периодической системы Д. И. Менделеева. По химическому составу имеющие практическое значение стекла делятся на три основных типа: оксидные — на основе оксидов (SiO_2, GeO_2, B_2O_3, P_2O_5, Al_2O_3, галогенидные — на основе галогенидов (BeF_2, фторберилатные стекла), халькогенидные — на основе сульфидов, селенидов и теллуридов.

Наиболее широко применяются оксидные стекла, которые в зависимости от состава делятся на ряд классов и групп:

по виду оксида-стеклообразователя — силикатные, боратные, фосфатные, германатные, алюмосиликатные и т.д;

по содержанию щелочных оксидов — бесщелочные (могут содержать щелочно-земельные оксиды MgO, CaO, BaO), малощелочные, многощелочные.

Получение стекол производится путем «варки» исходных компонентов стекла в стекловаренных печах и при быстром охлаждении расплавленного материала. При расплавлении шихты в результате реакции составляющих оксидов и удалении летучих составных частей (H_2O, CO_2, SO_3) получается однородная стекломасса, которая и идет на выработку стеклянных изделий. Изготовленные стеклянные изделия подвергаются отжигу при достаточно высокой температуре с последующим медленным охлаждением для устранения механических напряжений.

Физико-химические свойства стекла. Наиболее высокие показатели механических свойств имеют кварцевые и бесщелочные стекла, а наиболее низкие — стекла с повышенным содержанием оксидов PbO, Na_2O, K_2O.

Плотность стекол обычно находится в пределах 220—6500 кг/м^3. Теплопроводность стекла по сравнению с другими телами исключительно низкая (наибольшую теплопроводность имеют кварцевое и боросиликатное стекла). Термическая стойкость стекла прямо пропорциональна его прочности при разрыве и обратно пропорциональна его упругости и коэффициенту линейного расширения.

Химическая устойчивость стекла зависит от сопротивляемости его разрушающему воздействию различных реагентов — воды, кислот, щелочей. Для электротехнических стекол химическая устойчивость имеет в ряде случаев существенное значение. Наибольшей стойкостью к воздействию влаги обладает кварцевое стекло. Гидро-

литическая стойкость стекол сильно уменьшается при введении в состав стекла щелочных оксидов.

Электрические свойства стекла. Они в сильной степени зависят от состава стекла. Большинство стекол характеризуется ионной проводимостью. Некоторые специальные виды стекол — халькогенидные, ванадиевые (полупроводниковые) — имеют электронную или смешанную проводимость. Наиболее сильно понижают электропроводность стекол SiO_2 и B_2O_3. Наименьшую электропроводность имеет кварцевое стекло, а наибольшую — высокощелочные. Обычно более химически устойчивые стекла имеют меньшую электропроводность. Электропроводность стекол очень быстро возрастает при увеличении температуры из-за увеличения подвижности ионов. Удельное объемное сопротивление промышленных стекол при невысоких температурах колеблется в пределах 10^8 — 10^{15} Ом·м. Заметный вклад в электропроводность стекол вносит поверхностная проводимость, сильно зависящая от адсорбированной водяной пленки.

Диэлектрические потери в стеклах складываются из потерь проводимости и потерь релаксационных и структурных; tg δ стекол увеличивается с ростом содержания щелочных оксидов при малом содержании оксидов тяжелых металлов. Стекла с большим содержанием оксидов PbO и BaO имеют низкий tg δ.

Самую низкую диэлектрическую проницаемость имеет кварцевое стекло ($\varepsilon_r = 3{,}7 \div 3{,}8$) и стеклообразный борный ангидрид ($\varepsilon_r = 3{,}1 \div 3{,}2$) у которых наблюдается преимущественно электронная поляризация. При наличии в составе стекол оксидов металлов свинца и бария, обладающих высокой поляризуемостью, ε_r стекол увеличивается и становится высокой (около 20).

Пробой стекол вызывается электрическими и тепловыми процессами. При постоянном напряжении электрическая прочность стекла весьма велика и достигает 500 МВ/м, а при увеличении температуры резко снижается. В переменном электрическом поле электрическая прочность стекол составляет 17—80 МВ/м.

Наиболее высокими свойствами обладает кварцевое стекло, выплавляемое из горного хрусталя или чистых кварцевых песков. Кварцевые стекла отличаются высокой оптической прозрачностью, механической прочностью при высоких температурах (свыше 1000° С), инертностью к действию многих химических реагентов, высокими электрическими характеристиками: при нормальной температуре tg δ = 0,0002; $\varepsilon_r = 3{,}8$; ρ_r при 200 °С около 10^{15} Ом·м.

Кварцевое стекло находит применение для изготовления различных изделий в электрорадиовакуумной промышленности: трубчатые, опорные и проходные изоляторы для электрических газоочистительных установок, высоковольтные изоляторы для высоковольтных линий, различные детали переменных конденсаторов, катушек самоиндукции, ламп, приборов, аппаратов и пр.

Закаленные изоляторы из обычного щелочного стекла, хотя и несколько уступают по своим свойствам таким же изоляторам из

малощелочного стекла, могут эффективно использоваться в качестве подвесных изоляторов. В СССР подвесные закаленные стеклянные высоковольтные изоляторы ПС-4-5 установлены на линиях электропередачи 31, 110 и 220 кВ. Конструкция такого изолятора приведена на рис. 6.9.

Разнообразие и особенности свойств полупроводниковых стекол открывают широкие возможности для их применения в электронных приборах и устройствах, например в термосопротивлениях, в светофильтрах и фотосопротивлениях, сочетающих избирательное поглощение света с повышенной электропроводностью.

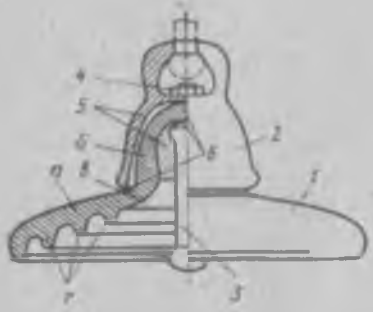


Рис 6.9 Высоковольтный линейный подвесной стеклянный изолятор ПС-4-5:

1 — изоляционная деталь из закаленного стекла (*а* — тарелка, *б* — головка *в* — шейка, *г* — ребра); *2* — шапка (ковкий чугун); *3* — стержень (сталь Ст3); *4* — замок (сталь); *5* — цементно песчаная связка; *6* — прокладка (толь или кожа)

Электрическая керамика. Она представляет собой материал, получаемый в результате отжига формовочной массы заданного химического состава из минералов и оксидов металлов. При соответствующем выборе состава керамики из нее можно получить материалы, обладающие разнообразными свойствами. В электротехнической и радиоэлектронной промышленности керамическая технология применяется для изготовления диэлектрических, полупроводниковых, пьезоэлектрических, магнитных, металлокерамических и других изделий. Многие керамические материалы имеют высокую механическую прочность и нагревостойкость, высокие электрические характеристики, отсутствие механических деформаций при длительном приложении нагрузки, большую, чем у органических материалов, устойчивость к электрическому и тепловому старению. Керамику можно подвергать металлизации обычно методом выжигания серебра и осуществлять герметичные спаи с металлом.

Широкое применение в качестве электроизоляционного материала находит электротехнический фарфор, который является основным керамическим материалом, используемым в производстве широкого ассортимента низковольтных и высоковольтных изоляторов и других изоляционных элементов с рабочим напряжением до 1150 кВ переменного и до 1500 кВ постоянного тока. Электротехнический фарфор, как и любая керамика, состоит из кристаллической, аморфной и газовой фаз. Его свойства определяются химическим и фазовым составом, микро- и макроструктурой и технологией изготовления.

Рассмотрим основные особенности керамической технологии на примере электротехнического фарфора. Основными компонентами

фарфора являются сырьевые материалы минерального происхождения — глинистые вещества (каолин и глина, кварц, полевой шпат, гипс, пегматит). Глинистые вещества в сыром виде при замешивании их с водой обладают свойствами пластичности и при достаточно высокой температуре способны спекаться. Пластичность глинистых веществ дает возможность формовать их них изделия различной формы, которая сохраняется после сушки и обжига при высоких температурах. Изделия, изготовленные из глинистых веществ, дают большую усадку при сушке и при обжиге, кроме того, они склонны к образованию трещин. Температура спекания таких веществ высока. Поэтому в состав фарфора вводят «отощающие» материалы, снижающие усадку и деформацию изделий при сушке. Такими материалами служат кварц и битые фарфоровые изделия. Полевой шпат и пегматит являются плавнями при образовании фарфора: они плавятся при более низких температурах, чем глинистые вещества и кварц. Главной составной частью каолина является гидроалюмосиликат, называемый глинистым веществом или каолинитом, его состав $Al_2O_3 \cdot 2\,SiO \cdot 2\,H_2O$ — это высокосортная глина. В воде каолин образует суспензию. Пластичные огнеупорные глины в качестве составной части содержат каолинит. Кварц состоит из кремнезема SiO_2 с ничтожными примесями. Полевые шпаты представляют собой безводные алюмосиликаты, содержащие ионы Na^+, K^+, Ca^{2+}. Пегматит состоит из полевого шпата и кварца. Твердые компоненты фарфоровой массы подвергаются грубому и тонкому помолу и после добавления небольшого количества воды взмучиваются, образуя суспензию, и подаются в сборники через вибросито и магнитные сепараторы. Затем на фильтр-прессах отжимается избыточная вода и масса после переминки в вакуумных прессах, проходя через мундштук определенной формы, превращается в заготовки требуемой длины, которые и подаются на формовку.

Изделия из фарфоровой массы получают различными способами: обточкой, прессовкой, отливкой в гипсовые формы, выдавливанием через отверстие нужной конфигурации. После оформления изделия производится сушка полуфабриката для удаления воды, вводимой в массу для придания ей пластичности. Следующая операция — глазурование фарфоровых изоляторов — производится для предохранения от загрязнения и создания поверхности, легко очищаемой в условиях эксплуатации. При обжиге глазурное покрытие плавится и покрывает поверхность изолятора тонким стекловидным слоем. Глазурь увеличивает механическую прочность, «заглаживая» трещины и другие дефекты, уменьшает ток утечки по поверхности изоляторов и повышает их напряжение перекрытия. Обжиг фарфоровых изоляторов в зависимости от размеров длится от 20 до 70 ч по соответствующему режиму. Максимальная температура обжига в зависимости от вида фарфора от 1300 до 1410 °С. Фарфоровые изделия помещаются в печь в специальных коробках — капселях, изготовляемых из огнеупорных глин, чтобы предохранить из-

делия от топочных газов и других загрязнений. Обжиг производится в горнах — печах прерывного действия — или в туннельных печах непрерывного действия. При обжиге происходит усадка изделий (уменьшение размеров обжигаемого изделия), которая может достигать 20%, поэтому усадку необходимо учитывать при конструировании изделий.

Наличие стекловидной фазы определяет довольно высокую механическую прочность фарфора. Фарфор имеет высокий предел прочности на сжатие (400—700 МПа), значительное меньший предел прочности при растяжении (45—70 МПа) и при изгибе (80—150 МПа). Электроизоляционные свойства фарфора при нормальной температуре позволяют использовать его при низких частотах: $\varepsilon_r \simeq 6 \div 7$, $\operatorname{tg}\delta \approx 0{,}02$; $\operatorname{tg}\delta$ электротехнического фарфора, однако, быстро растет при увеличении температуры, что затрудняет применение его при высоких температурах и на высоких частотах.

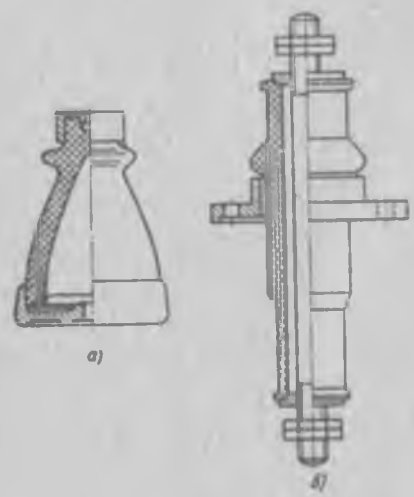


Рис. 6.10. Изоляторы:
а — опорный группы А и Б на 6 кВ; б — проходной группы Б на 6 кВ

Электротехнический фарфор находит применение для изготовления высоковольтных и низковольтных изоляторов различного типа. К числу высоковольтных изоляторов относятся: 1) стационарные для оборудования распределительных устройств и аппаратуры — опорные, проходные, вводы, маслонаполненные, покрышки разного назначения, 2) линейные для линий электропередачи — подвесные и штыревые. На рис. 6.10 показаны некоторые типы изоляторов, изготовляемые из электротехнического фарфора.

Для изготовления высокочастотных высоковольтных изоляторов применяют стеатитовую керамику, так как фарфор имеет сильную зависимость электрических характеристик от температуры из-за наличия большого количества полевошпатового стекла с повышенной электропроводностью. Стеатитовая керамика изготовляется на основе тальковых минералов, основной кристаллической фазой которых является метасиликат магния $MgO \cdot SiO_2$. Стеатитовые материалы характеризуются высокими значениями ρ, в том числе при высокой температуре, малым $\operatorname{tg}\delta$, за исключением материала группы 210 ГОСТ 20419—83, предназначенного для производства крупных высоковольтных изоляторов. Стеатитовая керамика характеризуется высокими механическими свойствами, стабильно-

стью параметров при воздействии различных внешних факторов (влаги, температуры, высокого напряжения и др.). Благодаря высоким электромеханическим свойствам стеатит нашел применение для изготовления высокочастотных установочных деталей, высоковольтных и низковольтных конденсаторов, высоковольтных антенных внутриламповых пористых и других изоляторов. Пластичный высокочастотный высоковольтный стеатитовый материал СПК-2 применяется для изготовления крупногабаритных изоляторов, а непластичные СНЦ, СК-1, Б-17, С-55 и С-4 — для изготовления электроизоляционных деталей и высокочастотных конденсаторов.

Для применения в радиотехнической и электронной промышленности было разработано большое количество новых керамических материалов, обладающих повышенными свойствами по сравнению с фарфором. Отметим лишь некоторые из этих материалов.

Радиофарфор представляет собой фарфор, стекловидная фаза которого облагорожена введением в нее тяжелого оксида BaO. Ультрафарфор различных марок характеризуется большим содержанием Al_2O_3 и является дальнейшим усовершенствованием радиофарфора. Ультрафарфор имеет по сравнению с обычным фарфором повышенную механическую прочность и теплопроводность.

Высокоглиноземистая керамика (алюминооксид) в основном состоит из оксида алюминия (глинозема) Al_2O_3. Это материал требует весьма высокой температуры обжига (до 1750 °С), затрудняющей его изготовление. Он отличается высокими характеристиками: нагревостойкостью до 1600° С, высоким ρ и малым tg δ при повышенных температурах, чрезвычайно высокой теплопроводностью и механической прочностью. Поликор, имеющий особо плотную структуру (близкую к теоретической для Al_2O_3), обладает оптической прозрачностью и применяется для изготовления колб некоторых специальных источников тока. Электрические характеристики некоторых высокочастотных керамических материалов приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.6

Материал	tg δ·10⁴ при 1 МГц		Электрическая прочность при 20 °С и 50 Гц, МВ/м
	при 20 °С	при 100 °С	
Радиофарфор	35—45	50—60	15—20
Ультрафарфор	6—9	16—13	15—20
Стеатит	12—20	15—24	20—30
Ультрастеатит	3—6	6—10	20—30

Конденсаторная керамика имеет повышенные ($\varepsilon_r = 10 \div 230$) и высокие ($\varepsilon_r = 900$) значения диэлектрической проницаемости. В первом случае керамика относится к высокочастотным диэлек

трикам и tg δ на частоте 1 МГц не должен превышать 0,0006, во втором случае керамика низкочастотная — на частоте 1000 Гц tgδ = 0,002÷0,025. К конденсаторной керамике обычно предъявляется требование возможно меньшего значения температурного коэффициента диэлектрической проницаемости. Многие из конденсаторных материалов имеют в своем составе диоксид титана — рутил (TiO_2). В принятом в СССР обозначении такие составы имеют букву Т («титановая керамика»); последующая цифра обычно обозначает номинальную диэлектрическую проницаемость. Эти материалы называют также тикондами. Среди них можно выделить керамику на основе титаната кальция и титаната стронция — $CaTiO_3$ и $SrTiO_3$. При высоких частотах у этих материалов температурная зависимость tgδ выражена слабо, однако эти виды материалов характеризуются пониженной электрической прочностью (8—12 МВ/м). При длительной выдержке под постоянным напряжением тикондовая керамика подвергается электрохимическому старению. Из-за высокого отрицательного значения температурного коэффициента ε_r эти материалы применяются для конденсаторов, к которым не предъявляются требования температурной стабильности емкости. Для повышения температурной стабильности в керамику вводят компоненты с положительным значением температурного коэффициента ε_r. Такие материалы часто называют термокомпенсированными. К этой группе относятся титано-циркониевая керамика TiO_2 — ZrO_2; $CaTiO_3$ — $CaZrO_3$; лантановая керамика системы $LaAlO_3$ — $CaTiO_3$, станнатная и другие керамические материалы. Преимуществом беститановой керамики является более высокая устойчивость к воздействию постоянного напряжения.

В ряде случаев для изготовления конденсаторов применяют ультрафарфор, стеатит и другие виды установочной керамики.

Основу низкочастотной керамики составляют титанат бария $BaTiO_3$ и твердые растворы на его основе. Эти материалы отличаются высокими значениями диэлектрической проницаемости и ее нелинейной зависимостью от напряженности электрического поля.

§ 6.10. Активные диэлектрики

В то время как к пассивным диэлектрикам предъявляются требования сохранения стабильности свойств при различных внешних воздействиях, к диэлектрикам, выполняющим активные функции управления энергией или преобразования поступающей информации, предъявляются требования совершенно противоположные. Чем сильнее изменяются свойства материала при внешних возмущениях, тем лучше такой элемент выполняет свои функции.

Диэлектрики, свойствами которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий и использовать эти воздействия для создания функциональных элементов электроники, относятся к группе активных диэлектриков: сегнето-, пьезо- и пироэлект-

рики; электро-, магнито- и акустооптические материалы; диэлектрические кристаллы с нелинейными оптическими свойствами и др.

Рассмотрим активные диэлектрики, нашедшие наиболее широкое применение.

Сегнетоэлектрики — вещества, обладающие спонтанной поляризацией (см. § 5.3), направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля. Сегнетоэлектрики обладают рядом специфических свойств, которые проявляются лишь в определенном диапазоне температур. Температура T_K (сегнетоэлектрическая точка Кюри) является температурой фазового перехода, ниже этой температуры сегнетоэлектрик обладает домен-

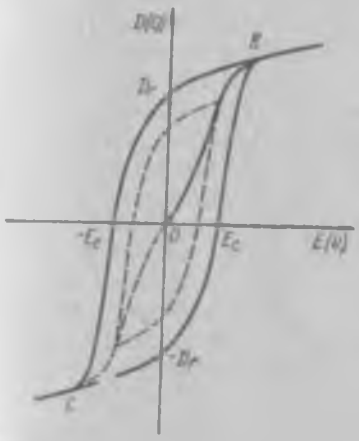


Рис. 6.11. Основная кривая поляризации сегнетоэлектрика и петля диэлектрического гистерезиса

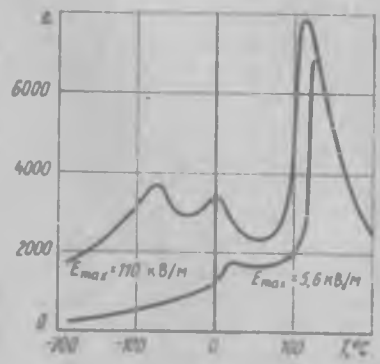


Рис. 6.12. Диэлектрическая проницаемость титаната бария в зависимости от температуры при различной напряженности электрического поля

ной структурой и характерными сегнетоэлектрическими свойствами; выше этой температуры происходит распад доменной структуры и сегнетоэлектрик переходит в параэлектрическое состояние. Следствием доменного строения сегнетоэлектриков являются нелинейная зависимость их электрической индукции от напряженности электрического поля (рис. 6.11), которая носит название диэлектрической петли гистерезиса (см. § 5.1), и резко выраженная температурная зависимость диэлектрической проницаемости, в которой максимум диэлектрической проницаемости достигается при температуре, соответствующей точке Кюри. На рис. 6.12 приведена зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры при различной напряженности электрического поля.

В настоящее время известно несколько сотен сегнетоэлектриков, которые по типу химической связи и физическим свойствам принято подразделять на две группы: 1) ионные кристаллы, к которым от-

ГЛАВА 7. ПРОВОДА, ШИНЫ И КАБЕЛИ

§ 7.1. Провода и шины

Обмоточные провода предназначены для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и различных приборов. По материалам, применяемым для изготовления токопроводящих жил, они делятся на медные, алюминиевые и из сплавов сопротивления. Выпускаются также провода с проводниками из драгоценных металлов, биметаллов и специальных сплавов, в частности сверхпроводящих, но объем их выпуска незначителен и используются они в основном в изделиях, работающих в специфических условиях (высокая или низкая температура, вакуум, агрессивные среды).

По видам изоляцию обмоточных проводов можно классифицировать следующим образом: эмалевая; волокнистая и эмалево-волокнистая; бумажная; пластмассовая, включая пленочную; стекловолокнистая, стеклоэмалевая и сплошная стеклянная.

Обмоточные провода с эмалевой изоляцией относятся к самой массовой и наиболее прогрессивной группе проводов, что обусловлено целым рядом их достоинств. Обладая малыми толщинами изоляции (несколько микрометров), хорошими физико-механическими и электроизоляционными характеристиками, нагревостойкостью, они позволяют создавать на их базе электрические машины и аппараты с повышенным коэффициентом использования паза, что способствует увеличению их мощности или снижению габаритов при сохранении существующих параметров. Кроме того, производство эмалированных проводов отличается меньшей трудоемкостью и высокой производительностью технологического оборудования, но связано, как правило, с использованием токсичных веществ.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает эмалированные провода с изоляцией на основе масляных и высокопрочных синтетических лаков с температурными индексами (ТИ) 105, 120, 130, 155, 180 и выше, под которыми понимается та температура, при которой ресурс провода равен 20 000 ч.

К числу проводов с ТИ 105 относятся обмоточные провода на масляной и поливинилацеталевой основах.

Медные эмалированные провода с изоляцией на основе масляных лаков (марка ПЭЛ) выпускаются в диапазоне диаметров 0,02—2,5 мм. Эти провода имеют достаточно высокие электроизоляционные характеристики, которые сохраняются даже в условиях воздействия повышенных температур и влажности. Однако по механическим свойствам стойкости к воздействию растворителей они существенно уступают проводам с изоляцией на синтетических лаках. Провода марки ПЭЛ применяются, как правило, для изготовления катушек электрических аппаратов, рамок приборов и т.п.

Круглые медные провода марок ПЭВ-1 и ПЭВ-2 (диаметром 0,02—2,5 мм), прямоугольные медные провода марки ПЭВП (сече-

нием 1,4—20 мм²) — это эмалированные провода с изоляцией на поливинилацеталевой основе; круглые алюминиевые провода марок ПЭВА и ПЭВАт (диаметром 0,08—2,44 мм) — на поливинилформальэтилалевом лаке «винифлекс»; круглые медные провода марок ПЭМ-1 и ПЭМ-2 (диаметром 0,02—2,5 мм) и прямоугольные медные провода марки ПЭМП (сечением 1,4—20 мм²) — на поливинилформалевом лаке «металвин». Цифры 1 и 2 в марках проводов соответствуют нормальной и повышенной толщине изоляции.

Некоторая часть проводов с изоляцией на лаке «винифлекс» выпускается с жилами из сплавов высокого сопротивления: ПЭВКТ-1 и ПЭВКТ-2 (твердый константан) диаметров 0,032—0,8 мм; ПЭВКМ-1 и ПЭВКМ-2 (мягкий константан) диаметром 0,10—0,80 мм; ПЭВМТ-1 и ПЭВМТ-2 (твердый манганин) диаметром 0,02—0,80 мм; ПЭВММ-1 и ПЭВММ-2 (мягкий манганин) диаметром 0,05—0,8 мм; ПЭВНХ-1 и ПЭВНХ-2 (мягкая нихромовая проволока марки Х20Н80) диаметром 0,02—0,4 мм. Кроме того, на лаке «металвин» выпускаются медные хладостойкие провода марки ПЭМВМ, ПЭС, ПЭСА, ПЭСВ и др.

Провода с изоляцией на поливинилацеталевой основе отличаются высокими механическими характеристиками, хорошими электроизоляционными свойствами, стойкостью к действию некоторых агрессивных сред, что позволяет с успехом использовать их для изготовления обмоток электрических машин и аппаратов без дополнительных покрытий.

Эмалированные провода с ТИ 120 выпускаются марок ПЭВТЛ-1 и ПЭВТЛ-2 диаметром 0,05—1,6 мм с изоляцией на основе полиуретанового лака. Отличительной особенностью этих проводов является возможность облуживания их без предварительной зачистки эмали, что значительно облегчает пайку. Электроизоляционные и физико-механические свойства этих проводов примерно соответствуют свойствам проводов с изоляцией на основе поливинилацеталевых лаков, но отличаются повышенной термопластичностью, что исключает их использование для электрических машин большой и средней мощности. Они применяются в основном в приборостроении и радиотехнической промышленности.

Основную часть эмалированных проводов с ТИ 130 составляют провода с изоляцией на полиэфирных (полиэтилентерефталатных) лаках. Круглые медные провода марок ПЭТВ-1 и ПЭТВ-2 выпускаются в диапазоне диаметров 0,03—2,5 мм. Аналогичные провода выпускаются с изоляцией из расплава полиэфирной смолы ТС-1 (провода марки ПЭТВ-2-ТС) с диаметром 0,40—1,56 мм. Выпускаются также и круглые алюминиевые провода марки ПЭТВА, диаметр которых составляет 0,14—2,5 мм. Прямоугольные провода с полиэфирной изоляцией (марки ПЭТВП) выпускаются только медные сечением 1,4—24,3 мм². Для механизированной намотки электродвигателей выпускаются провода марки ПЭТВМ с диаметром

0,25—1,40 мм, которые отличаются повышенной толщиной изоляции.

Изоляционные пленки на основе полиэфиров достаточно стойки к действию растворителей, выдерживают испытание на термопластичность при 200 °С, отличаются повышенной электрической прочностью, но механические характеристики их ниже, чем у поливинилацеталевых пленок. Основным недостатком этих проводов является низкая стойкость к тепловому удару, т. е. кратковременному воздействию высоких температур, что обусловлено химической природой полимера. В связи с этим провода марки ПЭТВ не рекомендуется использовать в электрооборудовании, режим работы которого предполагает наличие токовых перегрузок.

К ТИ 155 относятся в основном эмалированные провода с изоляцией на полиэфирамидной основе марки ПЭТ-155. Они выпускаются с медными жилами как круглого (диаметром 0,06—2,44 мм), так и прямоугольного (марка ПЭТП-155) сечения в диапазоне 1,6—11,2 мм². По своим электроизоляционным и механическим характеристикам данные провода идентичны проводам марки ПЭТВ, но обладают более высокой нагревостойкостью и стойкостью к тепловому удару, что значительно расширяет области их использования.

Более высокие параметры, чем провода марки ПЭТ-155, имеют провода марки ПЭТМ с изоляцией на основе полиэфирциануритимидного лака, также относящиеся к ТИ 155. Они выпускаются в диапазоне диаметров 0,80—1,32 мм и применяются для изготовления обмоток электродвигателей единой серии, работающих при температуре не выше 155 °С. Для электродвигателей, эксплуатирующихся в холодильном оборудовании, применяются провода марки ПЭФ-155 (диаметром 0,29—1,04 мм), которые отличаются от проводов марки ПЭТМ только тем, что удовлетворяют специальным требованиям по хладостойкости. На более высокие температуры (180 °С и выше) используются, как правило, эмалированные провода с изоляцией на полиамидной и полиимидной основах.

Круглые провода выпускаются в диапазоне диаметров 0,50—2,50 мм, а прямоугольные — в диапазоне сечений от 1,6 до 11,2 мм². Помимо высокой нагревостойкости эти провода отличаются повышенными механическими характеристиками, стойкостью к токовым перегрузкам и хладонам, имеют достаточно хорошие электрические свойства. Эти провода используются в тех случаях, когда необходимо обеспечить надежную работу электрооборудования с ТИ 180 и выше, особенно при тяжелых условиях изготовления обмоток.

Медные круглые провода марки ПЭТ-200 и прямоугольные марки ПЭТП-200 имеют ТИ 200.

Для длительной работы в интервале температур 220—240°С применяются медные и медные никелированные эмалированные провода с изоляцией на полиимидной основе. Круглые медные про-

вода марки ПЭТ-имид (ТИ 220) и медные никелированные марки ПНЭТ-имид (ТИ 240) выпускаются в диапазоне диаметров 0,10—2,50 мм. Прямоугольные медные никелированные провода имеют марку ПНЭТП-имид и изготовляются в диапазоне сечений 1,4—5,1 мм².

Обмоточные провода с полиимидной изоляцией имеют самую высокую нагревостойкость среди эмалированных проводов, достаточно хорошие электрические характеристики, которые практически не изменяются при их нагревании до температуры 230 °С. Однако производство этих проводов связано с использованием дорогих дефицитных и токсичных материалов, что затрудняет их производство и существенно ограничивает области их применения.

Провода с волокнистой изоляцией на основе хлопчатобумажной пряжи, натурального шелка, а также синтетических волокон изготовляются, как правило, методом двухслойной обмотки токопроводящих жил. Медные круглые (диаметром 0,36—5,20 мм) и прямоугольные (сечением 1,7—83,1 мм²) провода с двухслойной хлопчатобумажной изоляцией имеют марку ПБД. Алюминиевые провода с тем же типом изоляции (АПБД) выпускаются в диапазоне диаметров 1,32—8,00 мм и сечений 6,8—88,7 мм².

Провода с изоляцией из двух слоев натурального шелка выпускаются как с медными прямоугольными жилами сечением 2,24—8,00 мм² (марки ПШД), так и с жилами круглой формы из мягкого (марки ПШДКМ) и твердого (марки ПШДКТ) константана в диапазоне диаметров 0,09—0,40 и 0,09—0,15 мм соответственно. Изоляцию из двух слоев лавсановых нитей имеют круглые медные провода марки ПЛД, которые выпускаются в диапазоне диаметров 0,40—1,32 мм в очень ограниченном количестве, так как лавсановая изоляция имеет малую стойкость к ударным нагрузкам.

Для волокнистой изоляции, которая имеет ТИ 105, характерны большая толщина изоляции (0,1—0,2 мм) и гигроскопичность, невысокая электрическая прочность, что ограничивает их использование без дополнительных покрытий, которыми, как правило, являются эмаль-лаки на масляной, поливинилацеталевой, полиэфирной и других основах. В связи с этим в качестве полуфабриката при производстве этих проводов используются эмалированные провода.

Медные круглые провода марок ПЭБО (диаметром 0,40—2,20 мм), ПЭШО (диаметром 0,05—1,50 мм), ПЭЛО (диаметром 0,20—1,32 мм) имеют изоляцию из одного слоя хлопчатобумажного, шелкового и лавсанового волокна соответственно и относятся к ТИ 105. Такой же температурный индекс имеют провода марок ПЭВЛО, ПЭЛШКО, ПЭЛШКД, ПЭЛБД и т. д.

На ТИ 120 выпускаются провода марок ПЭВТЛЛО (диаметром 0,20—1,32 мм) и ПЭПЛОТ (диаметром 0,08—0,50 мм), а на ТИ 130 — провода марки ПЭТВЛО (0,20—1,32 мм).

Обмоточные провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией используются, как правило, для намотки электрических ма-

0,25—1,40 мм, которые отличаются повышенной толщиной изоляции.

Изоляционные пленки на основе полиэфиров достаточно стойки к действию растворителей, выдерживают испытание на термопластичность при 200 °С, отличаются повышенной электрической прочностью, но механические характеристики их ниже, чем у поливинилацеталевых пленок. Основным недостатком этих проводов является низкая стойкость к тепловому удару, т. е. кратковременному воздействию высоких температур, что обусловлено химической природой полимера. В связи с этим провода марки ПЭТВ не рекомендуется использовать в электрооборудовании, режим работы которого предполагает наличие токовых перегрузок.

К ТИ 155 относятся в основном эмалированные провода с изоляцией на полиэфирамидной основе марки ПЭТ-155. Они выпускаются с медными жилами как круглого (диаметром 0,06—2,44 мм), так и прямоугольного (марка ПЭТП-155) сечения в диапазоне 1,6—11,2 мм². По своим электроизоляционным и механическим характеристикам данные провода идентичны проводам марки ПЭТВ, но обладают более высокой нагревостойкостью и стойкостью к тепловому удару, что значительно расширяет области их использования.

Более высокие параметры, чем провода марки ПЭТ-155, имеют провода марки ПЭТМ с изоляцией на основе полиэфирциануритимидного лака, также относящиеся к ТИ 155. Они выпускаются в диапазоне диаметров 0,80—1,32 мм и применяются для изготовления обмоток электродвигателей единой серии, работающих при температуре не выше 155 °С. Для электродвигателей, эксплуатирующихся в холодильном оборудовании, применяются провода марки ПЭФ-155 (диаметром 0,29—1,04 мм), которые отличаются от проводов марки ПЭТМ только тем, что удовлетворяют специальным требованиям по хладостойкости. На более высокие температуры (180 °С и выше) используются, как правило, эмалированные провода с изоляцией на полиамидной и полиимидной основах.

Круглые провода выпускаются в диапазоне диаметров 0,50—2,50 мм, а прямоугольные — в диапазоне сечений от 1,6 до 11,2 мм². Помимо высокой нагревостойкости эти провода отличаются повышенными механическими характеристиками, стойкостью к токовым перегрузкам и хладонам, имеют достаточно хорошие электрические свойства. Эти провода используются в тех случаях, когда необходимо обеспечить надежную работу электрооборудования с ТИ 180 и выше, особенно при тяжелых условиях изготовления обмоток.

Медные круглые провода марки ПЭТ-200 и прямоугольные марки ПЭТП-200 имеют ТИ 200.

Для длительной работы в интервале температур 220—240°С применяются медные и медные никелированные эмалированные провода с изоляцией на полиимидной основе. Круглые медные про-

вода марки ПЭТ-имид (ТИ 220) и медные никелированные марки ПНЭТ-имид (ТИ 240) выпускаются в диапазоне диаметров 0,10—2,50 мм. Прямоугольные медные никелированные провода имеют марку ПНЭТП-имид и изготовляются в диапазоне сечений 1,4—5,1 мм².

Обмоточные провода с полиимидной изоляцией имеют самую высокую нагревостойкость среди эмалированных проводов, достаточно хорошие электрические характеристики, которые практически не изменяются при их нагревании до температуры 230 °С. Однако производство этих проводов связано с использованием дорогих дефицитных и токсичных материалов, что затрудняет их производство и существенно ограничивает области их применения.

Провода с волокнистой изоляцией на основе хлопчатобумажной пряжи, натурального шелка, а также синтетических волокон изготовляются, как правило, методом двухслойной обмотки токопроводящих жил. Медные круглые (диаметром 0,36—5,20 мм) и прямоугольные (сечением 1,7—83,1 мм²) провода с двухслойной хлопчатобумажной изоляцией имеют марку ПБД. Алюминиевые провода с тем же типом изоляции (АПБД) выпускаются в диапазоне диаметров 1,32—8,00 мм и сечений 6,8—88,7 мм².

Провода с изоляцией из двух слоев натурального шелка выпускаются как с медными прямоугольными жилами сечением 2,24—8,00 мм² (марки ПШД), так и с жилами круглой формы из мягкого (марки ПШДКМ) и твердого (марки ПШДКТ) константана в диапазоне диаметров 0,09—0,40 и 0,09—0,15 мм соответственно. Изоляцию из двух слоев лавсановых нитей имеют круглые медные провода марки ПЛД, которые выпускаются в диапазоне диаметров 0,40—1,32 мм в очень ограниченном количестве, так как лавсановая изоляция имеет малую стойкость к ударным нагрузкам.

Для волокнистой изоляции, которая имеет ТИ 105, характерны большая толщина изоляции (0,1—0,2 мм) и гигроскопичность, невысокая электрическая прочность, что ограничивает их использование без дополнительных покрытий, которыми, как правило, являются эмаль-лаки на масляной, поливинилацеталевой, полиэфирной и других основах. В связи с этим в качестве полуфабриката при производстве этих проводов используются эмалированные провода.

Медные круглые провода марок ПЭБО (диаметром 0,40—2,20 мм), ПЭШО (диаметром 0,05—1,50 мм), ПЭЛО (диаметром 0,20—1,32 мм) имеют изоляцию из одного слоя хлопчатобумажного, шелкового и лавсанового волокна соответственно и относятся к ТИ 105. Такой же температурный индекс имеют провода марок ПЭВЛО, ПЭЛШКО, ПЭЛШКД, ПЭЛБД и т. д.

На ТИ 120 выпускаются провода марок ПЭВТЛЛО (диаметром 0,20—1,32 мм) и ПЭПЛОТ (диаметром 0,08—0,50 мм), а на ТИ 130 — провода марки ПЭТВЛО (0,20—1,32 мм).

Обмоточные провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией используются, как правило, для намотки электрических ма-

шин, аппаратов и приборов в тех случаях, когда при изготовлении обмоток провод испытывает повышенные механические нагрузки и нет жестких ограничений по толщине изоляции.

Обмоточные провода с бумажной изоляцией относятся к ТИ 105 и выпускаются главным образом для изготовления обмоток масляных трансформаторов. Круглые медные и алюминиевые провода марок ПБ и АПБ с изоляцией из лент телефонной или кабельной бумаги толщиной не более 0,12 мм выпускаются в диапазоне диаметров 1,18—5,2 и 1,32—8,00 мм соответственно. Прямоугольные провода, имеющие такие же марки, выпускаются в диапазоне сечений: медные — 3,0—90 мм², алюминиевые — 7,2—100 мм².

Для трансформаторов высокого напряжения используются провода марки ПБУ (сечением 12—109 мм²) с изоляцией из уплотненной высоковольтной кабельной бумаги толщиной 0,08 мм.

В мощных силовых трансформаторах и реакторах для уменьшения потерь вследствие поверхностного эффекта и повышения гибкости провода используются подразделенные и транспонированные провода.

Подразделенные провода марок ПБП и ПБПУ состоят из двух или трех элементарных изолированных проводников, которые располагаются в проводе параллельно и имеют общую бумажную изоляцию, удвоенная толщина которой составляет 0,96—2,96 мм. Элементарные проводники для подразделенных проводов изготовляются в диапазоне сечений 13,5—68,8 мм².

Транспонированные провода марок ПТБ и ПТБУ представляют собой конструкцию, которая состоит из нечетного количества элементарных прямоугольных проводников с эмалевой изоляцией, расположенных в два слоя с разделительной бумажной прокладкой между ними и с общей бумажной изоляцией. В данных проводах каждый проводник непрерывно изменяет свое положение по сечению по всей длине провода, что решает проблему уравнительных токов и резко снижает потери в обмотках. Провода марок ПТБ и ПТБУ выпускаются в диапазоне сечений 6,75—30,53 мм².

Обмоточные провода с пластмассовой изоляцией относятся к ТИ 105 и применяются в основном для изготовления обмоток погружных электродвигателей, которые работают в среде перекачиваемой жидкости при повышенных температурах и давлениях. Они выпускаются, как правило, с одно-, семи- и девятнадцатипроволочной жилой, номинальный диаметр которой находится в диапазоне 2,24—7,8 мм. Провода марок ПВДП-1 и ПВДП-2 имеют двухслойную изоляцию из полиэтилена низкой и высокой плотности, что позволяет их эксплуатировать при напряжениях соответственно 380 и 660 В. На рабочее напряжение до 3 кВ выпускается провод марки ППВЛ с двухслойной полиэтиленовой изоляцией. Провод марки ППВМ в качестве наружного слоя имеет композицию на основе модифицированного полипропилена.

Обмоточные провода с пленочной изоляцией также очень широко применяются для погружных электродвигателей. Провода марок ПЭТВПДЛ-3 и ПЭТВПДЛ-4 выпускаются с медными жилами в диапазоне диаметров 1,74—2,83 мм. Изоляция данных проводов состоит из слоя полиэфирной эмали, трех (четырех) слоев лавсановой пленки и двух слоев лавсановой нити с подклейкой и пропиткой полиэфирной смолой марки ТФ-60 и относится к ТИ 120.

Нагревостойкие провода с пленочной изоляцией (ТИ 180) выпускаются в основном прямоугольной формы и имеют следующие марки: ППФ — с изоляцией из ленточного фторопласта-4; ППФИ— с изоляцией из ленточного фторопласта-4 и полиимидно-фторопластовой пленки (размеры сторон $a = 1{,}68 \div 2{,}26$ мм, $b = 2{,}44 \div 3{,}28$ мм); ППИ, ППИ-К, ППИ-V — с изоляцией из полиимидно-фторопластовой пленки (диаметр 2,00—3,15 мм); ППИП-1, ППИП-2, ППИПК-1, ППИПК-2, ППИПК-3 — с изоляцией одной, двумя или тремя лентами дублированной полиимидно-фторопластовой пленки (размеры сторон $a = 1{,}12 \div 4{,}00$ мм, $b = 7{,}50 \div 12{,}60$ мм).

Некоторая часть обмоточных проводов с пленочной изоляцией применяется для обмоток высоковольтных электрических машин. К их числу относится прямоугольный провод марки ППЛБО, изоляция которого состоит из трех слоев лавсановой пленки и одного слоя хлопчатобумажной пряжи. Данный провод выпускается в диапазоне сечений 3,0—80 мм^2 и относится к ТИ 105.

Обмоточные провода со стекловолокнистой изоляцией получили очень широкое распространение ввиду высокой надежности, повышенной нагревостойкости, стойкости к токовым перегрузкам. Они применяются в основном для обмоток электродвигателей, работающих в тяжелых условиях (химостойкое оборудование), электродвигателей для кранов: морских судов и сухих трансформаторов. Выпускаются они с медными и алюминиевыми жилами как круглого, так и прямоугольного сечения. На ТИ 155 изготовляются провода с изоляцией из двух слоев стекловолокна, которое подклеивается и пропитывается глифталевым лаком (провода марок ПСД, ПСДТ, ПСД-Л, ПСДТ-Л, АПСД). Индекс Т в марке провода указывает на применение утоненного стекловолокна, Л — на дополнительный слой лака, А — на алюминиевую жилу. При использовании для подклейки и пропитки стекловолокна кремнийорганического лака выпускаются провода марок ПСКД, ПСДКТ, ПСДКТ-Л, ПСДК-Л (ТИ 180). На более высокие температуры (500—600 °С) применяются провода марки ПОЖ, которые имеют биметаллическую жилу (медь — никель) и стекловолокнистую изоляцию на кремнийорганическом замасливателе, пропитанную органосиликатными составами. Аналогичную медно-никелевую жилу имеет провод марки ПНСДК.

В незначительном объеме выпускается также провод марки ПЭТВСД (ТИ 155), имеющий медную эмалированную полиэфирным лаком жилу со стекловолокнистой изоляцией.

Основные параметры указанных проводов приведены в табл. 7.1

Таблица 7.1

Марка провода	Номинальные размеры токопроводящий жилы, мм	Удвоенная толщина изоляции, мм
ПСД	Ø 1,0—5,0	0,23—0,35
ПСДЛ	$a=0,9\div5,6$; $b=2,24\div12,5$	0,32—0,50; 0,27—0,42
ПСДК	Ø 1,0—5,0	0,23—0,35
ПСДК-Л	$a=0,9\div5,6$; $b=2,24\div12,5$	0,32—0,50; 0,27—0,42
ПСДТ	Ø 0,35—2,12	0,18—0,25
ПСДТ-Л	Ø 0,315—2,12	0,14—0,24
ПСДКР	$a=0,9\div3,55$; $b=2,24\div10,00$	0,26—0,34; 0,22—0,24
ПСДКТ-Л	Ø 1,16—2,44	0,35
ПЭТВСД	$a=1,01\div3,53$; $b=2,83\div8,0$	0,51—0,61
	Ø 1,60—3,05	0,27—0,33
АПСД	$a=1,8\div3,6$; $b=3,35\div14,0$	0,39—0,50; 0,27—0,40
	Ø 0,315—3,00	0,28—0,36
ПОЖ	$a=0,9\div3,55$; $b=2,12\div10,6$	0,44—0,62; 0,35—0,43

Примечание. Размеры токопроводящей жилы: для круглой — диаметр Ø, для прямоугольной — размеры сторон a, b.

Стеклоэмалевая изоляция обмоточных проводов в своей основе содержит систему SiO_2 — PbO — B_2O_3, что позволяет данным проводам длительно работать при высоких температурах. Наличие биметаллической медно-никелевой жилы (никель наносится методом плакирования) повышает стойкость проводов к действию окислительной среды. Для повышения эластичности и электрических характеристик стеклоэмалевая изоляция покрывается, как правило, органосиликатными составами. Для длительной эксплуатации при 400 °С выпускаются обмоточные провода со стеклоэмалевой изоляцией марки ПЭЖБ. Радиальная толщина изоляции составляет 3—7 мкм, а пробивная напряженность — около 30 МВ/м.

Для работы при более высоких температурах (500 °С) выпускают провод с жилой из биметаллической проволоки серебро-никель, который имеет марку ПЭЖБ-700 и обладает повышенной толщиной изоляции (7—10 мкм).

Обмоточные провода со сплошной стеклянной изоляцией получаются методом вытягивания тонкой металлической нити из разогретого токами высокой частоты прутка металла, находящегося в стеклянной трубке, и относятся к классу микропроводов. Провода с манганиновой жилой (диаметр 3—100 мкм) имеют марку ПССМ и используются в основном для приготовления резисторов. Медные провода марки ПМС имеют диаметр 5—200 мкм, а толщина изоляции составляет 1—35 мкм. Провода со сплошной стеклянной изоляцией оценивают по погонному электрическому сопротивлению и температурному коэффициенту сопротивления. В соответствии с этими параметрами они подразделяются на восемь групп и три класса.

Помимо указанных в классификации выпускаются также высокочастотные провода, жилы которых скручиваются из отдельных эмалированных проволок для уменьшения потерь от поверхностного эффекта и эффекта близости (марки ЛЭШО, ЛЭШД, ПЭЛО, ЛЭЛД, ЛЭП, ЛЭПКО); обмоточные провода с дельта-асбестовой изоляцией (марка ПДА), применяемые в тяговых электродвигателях; сверхвысокопроводящие и криопроводящие провода с жилами на основе сплавов ниобий — титан, ниобий — цирконий, эмалированные различными лаками.

Установочные провода предназначены для распределения электрической энергии в силовых и осветительных установках при неподвижной прокладке на открытом воздухе и внутри помещений, а также для питания электродвигателей и подключения промышленных и лабораторных переносных приборов и аппаратуры. Данные провода выпускаются на напряжение 380, 660 и 3000 В круглой и плоской формы с медными и алюминиевыми жилами, которые изолируются резиной или пластмассой и располагаются параллельно либо скручиваются в сердечник.

Провода с резиновой изоляцией, основные марки которых приведены в табл. 7.2, допускают длительный нагрев жил до 65 °С, при использовании теплостойкой резины на основе бутилкаучука — до 85 °С, а провода с кремнийорганической резиновой изоляцией мо-

Таблица 7.2

Марка провода	Число жил	Номинальное сечение жилы, мм²	Наружный диаметр, мм
ПРТО	1	0,75—120	3,7—19,3
	2; 3	1—120	7,5—38,9
	4; 7	1,5; 2,5	7,9—41,6
			9,6—15,8
			11,6—19,9
	10	1,5; 2,5	15,0; 16,5
	14	2,5—120	16,4; 18,6
АПРТО	1; 2; 3		3,7—19,3
			7,5—38,9
			7,9—41,6
	7	2,5—10	11,6—19,6
	10	2,5	16,6
	14		18,3
ПРН	1	1,5—120	3,8—18,6
ПРГН			3,9—21,4
АПРН	1	2,5—120	4,2—18,7
ПРИ	1	0,75—120	3,4—18,6
АПРИ	1	2,5—120	4,2—18,7
ПРГИ	1	0,75—120	3,5—21,4
АППР	2; 4	2,5—10	5,14,0—9,2·19,4
			12,1—17,3
	3	2,5	5,0—19,0

гут длительно работать при 180 °С. В некоторых случаях эти провода могут иметь резиновую (ПРРП), пластмассовую (ПРВД) или металлическую (ПРФЛ) оболочку.

Пластмассовая (полиэтиленовая или из поливинилхлоридного пластиката) изоляция допускает длительный нагрев до 70 °С. Их основные марки приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Марка провода	Сечение, мм²	Диаметр, мм	
		380/660 В	660/1100 В
АПВ	2,0—120	3,40—16,9	3,40—17,70
ПВ1	0,5—95	2,0—15,6	2,40—15,80
ПВ2	2,0—95	3,20—15,66	3,80—16,10
ПВ3	0,5—95	2,10—17,97	2,50—18,40
ПВ4	0,5—10	2,14—7,28	2,54—7,68

Монтажные провода применяются в основном короткими отрезками для неподвижной прокладки при внутри- и межблочных соединениях приборов, аппаратов и других электрических и радиотехнических устройств. В связи с разнообразием условий их применения монтажные провода имеют большое количество марок, содержащих следующие буквенные обозначения: первая буква М — монтажный; вторая буква В — поливинилхлоридная изоляция, П — полиэтиленовая, ПО — облученная полиэтиленовая, Р — резиновая, С — из стекловолокна, Л — лавсановая, Ф — фторопластовая, Ш — шелковая. Последующие буквы обозначают: К — капроновая оболочка; Э — экран в виде оплетки из медной проволоки; Т — тропическое исполнение; У — усиленная жила и т.д. Иногда на втором месте в марке провода ставится буква Г (гибкий).

По типу изоляции монтажные провода можно разделить на три группы: общего применения, нагревостойкие и высоковольтные.

Монтажные провода общего применения выпускаются обычно с медными луженными жилами с волокнистой, пластмассовой и комбинированной изоляцией в капроновой оболочке или без нее и предназначены для работы при переменном напряжении до 1000 В в диапазоне температур от —50 до +70 °С.

Нагревостойкие монтажные провода изготовляются, как правило, с применением изоляции из сшитого (облученного) полиэтилена, кремнийорганической резины, фторопластов, а также комбинации стекловолокна с фторопластовой пленкой, что позволяет их использовать в интервале температур от —60 до +250 °С.

Высоковольтные монтажные провода (например, марки ПВМП-2) с полиэтиленовой изоляцией используются при напряжениях 2, 2,5 и 4 кВ и при температурах от —60 до +85 °С.

Основные типы монтажных проводов различного назначения представлены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Общего применения			Нагревостойкие		
марка провода	число жил	сечение жил, мм²	марка провода	число жил	сечение жил, мм²
МГШ	1	0,05—0,12	МКР	1	0,75—120
МШДЛ	1	0,12—0,75	МКРТ		
			МКРЭ		
МГСЛ	1	0,20—1,50	МПО	7—49	0,12—0,75
МГСЛЭ	1	0,35—1,50	МПОЭ		
МВ	1	0,08—1,00	МПОУ		
МП	1	0,08—2,50	МСТП	1	0,08—6,00
МВЭ	2,3	0,12—1,00	МСТПЛ		
МВК	1	0,08—2,50	МСТПГ		
МПК	1	0,08—2,50	МГДПО	2	0,12; 0,20
МВК	2,3	0,12—1,00	МГДПЭО		
МПК	2,3	0,12—1,00	МФОЛ	7—20	0,20

Для воздушных линий электропередачи выпускаются неизолированные провода из меди, алюминия, алюминиевых сплавов, а также сталеалюминиевые провода, которые изготовляются путем скрутки из отдельных элементарных проволок. В некоторых случаях для повышения стойкости проводов к атмосферным воздействиям их поверхность покрывают термостойкой смазкой.

Медные провода (марки М) выпускаются в диапазоне сечений 4—400 мм² с числом проволок от 1 до 37; алюминиевые (марки А) — 16—800 мм² с числом проволок от 7 до 61; из алюминиевого упрочненного сплава (марки Ап) — 16—185 мм² с числом проволок от 7 до 19.

§ 7.2. Кабели

Силовые кабели предназначены для передачи и распределения электрической энергии при напряжении промышленной частоты и постоянном напряжении и являются наиболее ответственными изделиями кабельной отрасли.

Основу классификации силовых кабелей (рис. 7.1) составляет значение номинального напряжения, при котором кабель может работать длительное время. В соответствии с данной классификацией группу кабелей низкого напряжения составляют кабели, предназначенные для работы в электрических сетях с изолированной и заземленной нейтралью переменного напряжения 1, 3, 6, 10, 20 и 35 кВ, частотой 50 Гц, а также в сетях постоянного напряжения (одно- и двухжильные кабели).

В СССР силовые кабели низкого напряжения выпускаются с бумажной пропитанной, резиновой и пластмассовой изоляцией в одно-двух-, трех- и четырехжильном исполнении (рис. 7.2—7.4). Одно- и трехжильные кабели предназначены для работы в сетях с напряжением 1—35 кВ, а двух- и четырехжильные — с напряжением до 1 кВ. Четвертая жила в кабеле является заземляющей или зануляющей, и поэтому ее сечение, как правило, меньше сечения основных жил. Жилы кабелей низкого напряжения изготовляются из меди и алюминия однопроволочные либо многопроволочные уплотненного

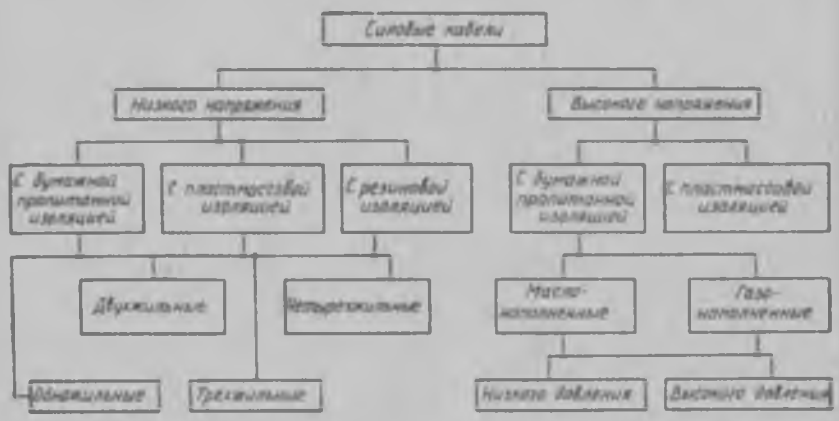


Рис. 7.1. Классификация силовых кабелей

типа. Применение скрученных из отдельных проволок жил силовых кабелей позволяет сохранить их гибкость при больших сечениях.

Система маркировки силовых кабелей отличается достаточной простотой и однозначностью. Согласно этой системе, медные токоироводящие жилы в маркировке кабелей не обозначаются специальной буквой. Наличие алюминиевой жилы обозначается буквой А, которая ставится в начале марки кабеля. Следующая за ней буква указывает на материал изоляции кабеля: П — полиэтилен, В — поливинилхлоридный пластикат, Р — резина, Пс — самозатухающий полиэтилен, Пв — вулканизированный полиэтилен.

Бумажная пропитанная изоляция не имеет буквенного обозначения. Третья буква марки кабеля обозначает тип защитной оболочки: А — алюминиевая, С — свинцовая, П — полиэтиленовая, В — поливинилхлоридная, Р — резиновая, НР — оболочка из резины, не поддерживающей горения. Последние буквы обозначают тип защитного покрытия: Б — броня из двух стальных оцинкованных лент с антикоррозионным защитным покровом, Бн — то же, но не с горючим защитным покровом, Г — отсутствие защитных покровов по-

верх брони или оболочки, К — броня из круглых стальных оцинкованных проволок с защитным покровом, П — броня из плоских стальных оцинкованных проволок с защитным покровом, Бб — броня из профилированной стальной ленты, Шв (Шп) — защитный покров из выпрессованного шланга из поливинилхлоридного пластиката (полиэтилена).

Силовые кабели низкого напряжения с бумажной пропитанной изоляцией по конструктивным признакам делятся в основном на кабели с поясной изоляцией (до 10 кВ) и с отдельно освинцованным и жилами (20 и 35 кВ).

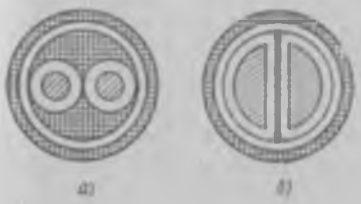


Рис. 7.2. Двухжильные кабели с круглыми (*а*) и сегментными (*б*) жилами

Рис. 7.3 Трехжильные кабели с круглыми (*а*) и секторными (*б*) жилами

Силовые кабели с поясной изоляцией выпускаются трехжильного типа с секторными жилами из меди или алюминия в диапазоне сечений 6—240 мм². В качестве изоляции в них используется кабельная бумага, которая накладывается на жилу методом обмотки и пропитывается затем вязким маслоканифольным составом. Поверх скрученного из изолированных жил сердечника кабеля накладывается поясная изоляция, толщина которой меньше, чем толщина фазной (жильной) изоляции, так как жильная изоляция рассчитывается на линейное напряжение, которое в три раза больше фазного.

Рис. 7.4. Четырехжильные кабели

В кабелях на напряжения 1 и 3 кВ толщина изоляции выбирается, как правило, из условия ее механической прочности (отсутствия повреждений при изгибах). Промежутки между изолированными жилами заполняются жгутами из сульфатной бумаги.

Так как бумажная пропитанная изоляция имеет большую гигроскопичность, то при ее использовании необходимо применять металлические оболочки (свинцовые или алюминиевые), которые защищаются от механических повреждений и коррозии специальными покрытиями. Силовые кабели с поясной изоляцией составляют по-

В СССР силовые кабели низкого напряжения выпускаются с бумажной пропитанной, резиновой и пластмассовой изоляцией в одно-двух-, трех- и четырехжильном исполнении (рис. 7.2—7.4). Одно- и трехжильные кабели предназначены для работы в сетях с напряжением 1—35 кВ, а двух- и четырехжильные — с напряжением до 1 кВ. Четвертая жила в кабеле является заземляющей или зануляющей, и поэтому ее сечение, как правило, меньше сечения основных жил. Жилы кабелей низкого напряжения изготовляются из меди и алюминия однопроволочные либо многопроволочные уплотненного

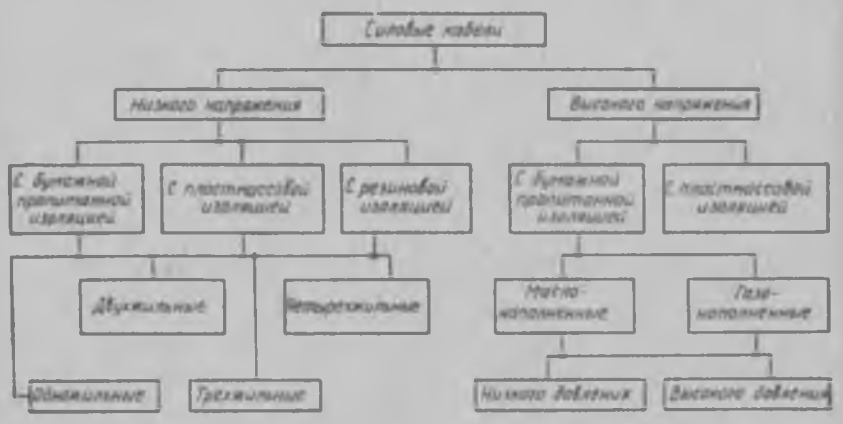


Рис. 7.1. Классификация силовых кабелей

типа. Применение скрученных из отдельных проволок жил силовых кабелей позволяет сохранить их гибкость при больших сечениях.

Система маркировки силовых кабелей отличается достаточной простотой и однозначностью. Согласно этой системе, медные токопроводящие жилы в маркировке кабелей не обозначаются специальной буквой. Наличие алюминиевой жилы обозначается буквой А, которая ставится в начале марки кабеля. Следующая за ней буква указывает на материал изоляции кабеля: П — полиэтилен, В — поливинилхлоридный пластикат, Р — резина, Пс — самозатухающий полиэтилен, Пв — вулканизированный полиэтилен.

Бумажная пропитанная изоляция не имеет буквенного обозначения. Третья буква марки кабеля обозначает тип защитной оболочки: А — алюминиевая, С — свинцовая, П — полиэтиленовая, В — поливинилхлоридная, Р — резиновая, НР — оболочка из резины, не поддерживающей горения. Последние буквы обозначают тип защитного покрытия: Б — броня из двух стальных оцинкованных лент с антикоррозионным защитным покровом, Бн — то же, но не с горючим защитным покровом, Г — отсутствие защитных покровов по-

верх брони или оболочки, К — броня из круглых стальных оцинкованных проволок с защитным покровом, П — броня из плоских стальных оцинкованных проволок с защитным покровом, Бб — броня из профилированной стальной ленты, Шв (Шп) — защитный покров из выпрессованного шланга из поливинилхлоридного пластиката (полиэтилена).

Силовые кабели низкого напряжения с бумажной пропитанной изоляцией по конструктивным признакам делятся в основном на кабели с поясной изоляцией (до 10 кВ) и с отдельно освинцованными жилами (20 и 35 кВ).

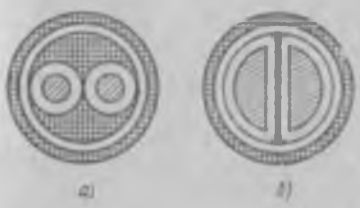


Рис. 7.2. Двухжильные кабели с круглыми (*а*) и сегментными (*б*) жилами

Рис. 7.3 Трехжильные кабели с круглыми (*а*) и секторными (*б*) жилами

Силовые кабели с поясной изоляцией выпускаются трехжильного типа с секторными жилами из меди или алюминия в диапазоне сечений 6—240 мм². В качестве изоляции в них используется кабельная бумага, которая накладывается на жилу методом обмотки и пропитывается затем вязким маслоканифольным составом. Поверх скрученного из изолированных жил сердечника кабеля накладывается поясная изоляция, толщина которой меньше, чем толщина фазной (жильной) изоляции, так как жильная изоляция рассчитывается на линейное напряжение, которое в три раза больше фазного.

Рис. 7.4. Четырехжильные кабели

В кабелях на напряжения 1 и 3 кВ толщина изоляции выбирается, как правило, из условия ее механической прочности (отсутствия повреждений при изгибах). Промежутки между изолированными жилами заполняются жгутами из сульфатной бумаги.

Так как бумажная пропитанная изоляция имеет большую гигроскопичность, то при ее использовании необходимо применять металлические оболочки (свинцовые или алюминиевые), которые защищаются от механических повреждений и коррозии специальными покрытиями. Силовые кабели с поясной изоляцией составляют по-

ка еще большую часть кабельной продукции и имеют следующие марки: АС, АСГ, СГ, ААШв, ААШп, СБ, СБГ, СШв, ААБ и т.д.

Существенным недостатком силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией является ограничение при прокладке на местности с большим перепадом высот, так как в этом случае пропиточный состав постепенно стекает в нижнюю часть трассы, что приводит к повышению давления в кабеле и может вызвать повреждение оболочки. Одновременно верхний участок кабеля лишается значительной части пропиточного состава, что приводит к образованию пустот и, следовательно, к уменьшению электрической прочности кабеля. Поэтому указанные кабели рекомендуется применять при перепаде высот не более 20 м, для кабелей на напряжение 1 кВ, 15 м для кабелей на напряжение 10 кВ.

На трассах с большим перепадом высот рекомендуется применять специальные кабели для вертикальной прокладки типа СБВ и ЦСБ. Кабель марки СБВ имеет обедненно пропитанную бумажную изоляцию, которая изготовляется путем удаления некоторой части пропиточного состава при нагреве в специальных устройствах. Снижение электрической прочности изоляции компенсируется повышением ее толщины. Для кабелей с обедненно пропитанной изоляцией перепад высот по трассе составлет не более 100 м. В местностях с с большим перепадом высот применяется кабель марки ЦСБ, бумажная изоляция которого пропитывается нестекающими пропиточными составами на основе синтетического церезина, обладающими большой вязкостью при рабочей температуре кабеля, хорошей адгезией к жиле и достаточно высокими электроизоляционными свойствами, что позволяет использовать их в сетях с напряжением до 10 кВ.

На напряжения 20 и 35 кВ в СССР изготовляются кабели либо в одножильном исполнении в свинцовой и алюминиевой оболочке с сечением жил 120—300 мм², либо в трехжильном исполнении, при котором кабель скручивается из трех круглых изолированных бумажной пропитанной изоляцией жил, каждая из которых имеет свинцовую оболочку, что позволяет создать в кабеле радиальное электрическое поле (марки ОСБ, ОСК, АОСБ, АОСБГ, АОСК). Кабели с отдельно освинцованными жилами сечением 120—150 мм² сохраняют достаточную гибкость, содержат меньшее количество пропиточного состава и имеют лучшие условия для теплоотвода. Недостатком их являются большая масса и повышенный расход металла для оболочек.

Силовые кабели с резиновой изоляцией предназначены в основном для неподвижной прокладки с малыми радиусами изгиба в сетях переменного напряжения 660 В или постоянного напряжения 1, 3, 6 и 10 кВ. Данные кабели могут иметь медные или алюминиевые токопроводящие жилы как круглой, так и секторной формы, изолированные изоляционной резиной. Поверх изолированных жил или сердечника кабеля, скрученного из нескольких жил, накладывает-

ся оболочка из свинца, поливинилхлоридного пластиката или шланговой резины. В некоторых случаях, которые определяются условиями прокладки кабелей, они могут иметь упрочняющие покровы, состоящие из двух стальных лент, и защитные антикоррозионные покровы обычной конструкции. Основные марки кабелей с резиновой изоляцией приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Марка кабеля	Число основных жил	Переменное напряжение 660 (постоянное 1000), В	Постоянное напряжение, В		
			300	6000	10000
СРГ	1	1—240	1,5—500	2,5—500	240—400
АСРГ	1	4—300	4—500	4—500	240—400
СРГ	2, 3	1—185	—	—	—
АСРГ	2	4—240	—	—	—
АСРГ	3	2,5—240	—	—	—
ВРГ, НРГ	1—3	1—240	—	—	—
АВРГ, АНРГ	1—3	4—300; 2,5—300	—	—	—
СРБГт, АСРБГт	1		240, 400, 500		—
СРБГ, АСРБГ	1		—	95, 240, 400, 500	
СРБ, СРБГ, ВРБи, СРБ, ВРБГ, НРБ, НРБГ	2, 3	2,5—185	—	—	—
АСРБ, АСРБГ, АВРБ, АВРБи, АВРБГ, АНРБ, АНРБГ	2, 3	4—240 2,5—240	—	—	—

Силовые кабели с пластмассовой изоляцией предназначены для неподвижной прокладки и могут эксплуатироваться в электрических сетях переменного напряжения 1—35 кВ. Это наиболее перспективный тип кабелей, поскольку они достаточно просты в изготовлении, удобны при монтаже и эксплуатации. Применение пластмассовой (полиэтиленовой или поливинилхлоридной) изоляции, которая отличается хорошей технологичностью, гибкостью, достаточно высокими электроизоляционными характеристиками и влагостойкостью, позволяет во многих случаях отказаться от применения металлических оболочек, что значительно снижает массу кабеля и его стоимость. Они изготовляются в одно- и многожильном исполнении с медными и алюминиевыми токопроводящими жилами круглой или секторной формы в диапазоне сечений 1,5—240 мм² (табл. 7.6). Для кабеля на напряжение 1—10 кВ может использоваться как поливинилхлоридная, так и полиэтиленовая изоляция, причем применяется не только термопластичный (линейный) полиэтилен, но и сшитый, который имеет большую нагревостой-

счет многократных полных внутренних отражений световых лучей от границы раздела сердечник — оболочка. Диаметр сердечника не превышает 50 мкм, оболочки — 100—150 мкм. Такая стеклянная нить требует упрочнения и защиты от внешних воздействий, поэтому ОВ поверх светоотражающей кварцевой оболочки имеет защитное полимерное покрытие.

Существуют разные варианты наложения защитной оболочки: в виде трубки, внутри которой свободно лежит стеклянная нить; в виде плотно наложенной полимерной оболочки. Двухслойная защитная оболочка, внутренний слой которой выполнен из легкого полимерного материала (например, силиконовой резины), предназначена для демпфирования механических воздействий на стекловолокно со стороны внешнего полимерного защитного покрытия.

ВОК состоит из одного или нескольких ОВ, скрученных вместе или помещенных в специальный профильный сердечник с пазами, а также из упрочняющих элементов (высокопрочные синтетические нити) и защитных полимерных (полиэтилен, ПВХ-пластикат) оболочек.

Таким образом, ВОК могут изготовляться без применения металлических элементов, что принципиально отличает их от всех других кабелей и проводов.

Можно отметить следующие достоинства ВОК:

широкополосность, позволяющая по одному ОВ передавать частоты до 1—3 ГГц, обеспечивающие передачу огромного объема информации;

полная защищенность передачи от влияния внешних электромагнитных полей;

малые габариты и масса;

отсутствие в конструкции остродефицитных цветных металлов (медь, свинец, алюминий), которые в огромных количествах используются при производстве обычных кабелей связи;

секретность передачи информации, так как излучение в окружающее пространство практически отсутствует, а искусственный вывод энергии без разрушения ОВ чрезвычайно затруднен.

Эти и другие достоинства обусловили тенденцию к замене традиционных кабелей связи волоконно-оптическими.

Контрольные вопросы

1. Дать классификацию силовых кабелей.
2. В чем состоит отличие кабелей высокого и низкого напряжений?
3. Для каких целей применяют изоляцию из вулканизированного полиэтилена и почему?
4. В чем состоит преимущество эмалированных проводов?
5. Какие типы проводов применяются для воздушных линий электропередач?
6. Какова отличительная черта контрольных кабелей?
7. Какова отличительная черта волоконно-оптических кабелей?

ГЛАВА 8. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 8.1. Общие сведения и классификация полупроводников

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

в большом интервале температур их удельное сопротивление уменьшается, т. е. они имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления;

при введении в полупроводник ничтожного количества примесей их удельное сопротивление резко изменяется;

полупроводники чувствительны к различного рода внешним воздействиям — свету, ядерному излучению, электрическому и магнитному полям, давлению и т.д.

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

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

Полупроводниками являются сложные соединения различных элементов таблицы Д. И. Менделеева, соответствующие общим формулам:

двойные (бинарные) соединения: $A^{I}B^{VII}$ (CuCl, AgBr и др); $A^{I}B^{VI}$ (Cu_2O, CuS и др); $A^{I}B^{V}$ (KSb, K_3Sb и др.); $A^{II}B^{VII}$ ($ZnCl_2$, $CdCl_2$ и др.); $A^{II}B^{VI}$ (ZnO, ZnS, CdS и др.); $A^{II}B^{V}$ (ZnSb, Mg_3Sb_2, и др.); $A^{II}B^{IV}$ (Mg_2Sn, CaSi и др.); $A^{III}B^{VI}$ (GaS, In_2Fe_3 и др.); $A^{III}B^{V}$ (GaP, GaAs, InSb и др); $A^{IV}B^{VI}$ (GeO_2, PbS и др.); $A^{IV}B^{IV}$ (SiC); $A^{V}B^{VI}$ (Sb_2Te_3, Bi_2S_3 и др.); $A^{VI}B^{VI}$ (MoO_3, WO_3); $A^{VII}B^{VI}$ (Fe_2O_3, NiO);

тройные соединения: $A^{I}B^{III}B^{VI}_2$ ($CuAlS_2$, $CuInS_2$ и др.); $A^{I}B^{V}B^{VI}_2$ ($CuSbS_2$), $CuAsS_2$ и др.); $A^{I}B^{VIII}B^{VI}_2$ ($CuFeS_2$ и др); $A^{II}B^{IV}B^{V}_2$ ($ZnSiAs_2$, $ZnGeAs_2$); $A^{IV}B^{V}B^{VI}_2$ ($PbSiSe_2$);

твердые растворы: GeSi, $GaAs_{1-x}P_x$; $In_xAl_{1-x}Sb$ и др.

К органическим полупроводникам относятся фталоцианин, актрацин, нафталин, коронел и др.

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

Полупроводник, в котором в результате разрыва связей образуется равное количество свободных электронов и дырок, называется *собственным*. На рис. 8.1, *а* показана плоская картина расположения атомов в собственном полупроводнике, например кремния. Каждый атом на своей внешней оболочке содержит четыре электрона. Каждый из этих четырех электронов создает пару с электроном соседнего атома, образуя ковалентную связь. Ковалентная связь достаточно прочная, и для того, чтобы освободить электрон, требуется определенная энергия.

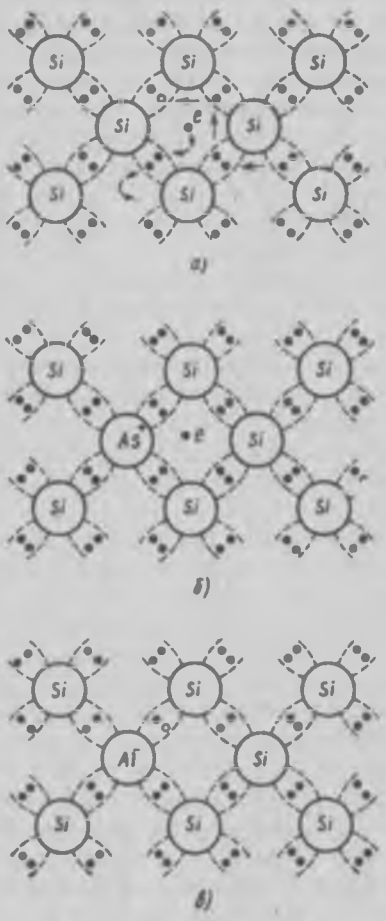


Рис. 8.1. Плоское изображение полупроводника:
а — собственного; *б* — электронного; *в* — дырочного

С повышением температуры из-за увеличения тепловой энергии некоторые электроны разрывают ковалентную связь и появляются в зоне проводимости (рис. 8.2, *а*). В кристалле собственного полупроводника каждому электрону в зоне проводимости соответствует одна дырка, оставленная им в валентной зоне. В этом случае свободный электрон обладает энергией, большей той, которую он имел в связанном состоянии, на величину не менее энергии ширины запрещенной зоны.

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

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

Для большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники.

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

Если в полупроводник IV группы (кремний или германий) ввести элемент V группы таблицы Менделеева, например мышьяк, то атому примеси для завершения ковалентных связей с атомами основного вещества необходимо четыре валентных электрона

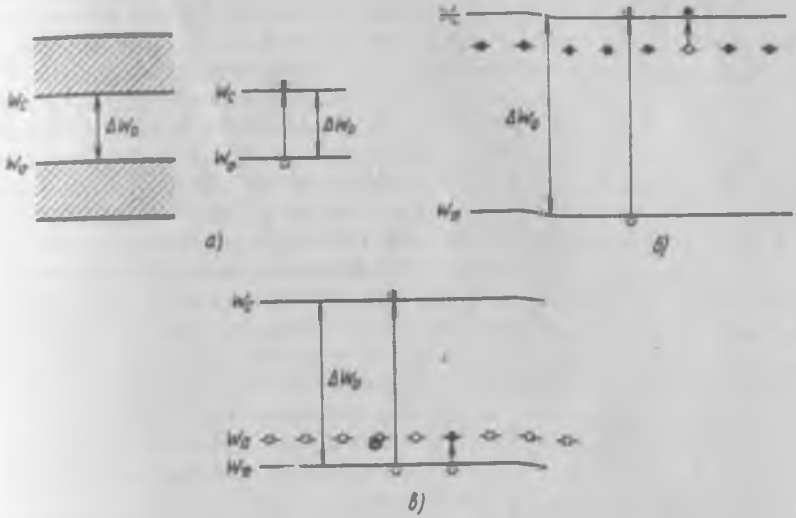


Рис. 8.2. Зонная диаграмма полупроводника:
а — собственного; *б* — электронного;; *в* — дырочного

(рис. 8.1, *б*). Пятый электрон атома примеси в ковалентной связи не участвует. Со своим атомом он связан силой кулоновского взаимодействия. Энергия этой связи невелика — порядка сотых долей электрон-вольт. Так как при комнатной температуре тепловая энергия $\approx 0{,}03$ эВ, то очевидно, что при этой температуре будет происходить ионизация примесных атомов мышьяка вследствие отрыва пятого валентного электрона, который становится свободным. Наряду с ионизацией примеси может происходить и ионизация атомов основного вещества. Но в области температур ниже той, при которой имеет место значительная собственная проводимость, число электронов, оторванных от примеси, будет значительно больше количества электронов и дырок, образовавшихся в результате разрыва ковалентных связей. В силу этого преобладающую роль в проводимости кристалла будут играть электроны, и поэтому они называются основными носителями заряда, а дырки — неосновными.

Такой полупроводник называется электронным или *n*-типа, а примесь, отдающая электроны, носит название донорной.

На энергетической диаграмме наличие примеси в решетке полупроводника будет характеризоваться появлением локального уровня, лежащего в запрещенной зоне. Так как при ионизации атома мышьяка образуется свободный электрон и для его отрыва требуется значительно меньшая энергия, чем для разрыва ковалентных связей кремния, то энергетический уровень донорной примеси должен располагаться в запрещенной зоне на небольшой глубине под дном зоны проводимости (рис. 8.2, *б*).

Если теперь в полупроводник IV группы таблицы Менделеева ввести элемент III группы, например алюминий, то все три валентных электрона примесного атома будут участвовать в образовании ковалентных связей, одна из четырех связей с ближайшими атомами основного вещества окажется незавершенной (рис. 8.1, *в*). В незаполненную связь около атома алюминия за счет тепловой энергии может перейти электрон от соседнего атома основного вещества. При этом образуются отрицательный ион алюминия и свободная дырка, перемещающаяся по связям основного вещества и, следовательно, принимающая участие в проводимости кристалла. Примесь, захватывающая электроны, называется акцепторной. Для образования свободной дырки за счет перехода электрона от атома основного вещества к атому примеси требуется значительно меньше энергии, чем для разрыва ковалентных связей кремния. В силу этого количества дырок может быть значительно больше количества свободных электронов и проводимость кристалла будет дырочная.

В таком полупроводнике основными носителями заряда будут дырки, а неосновными — электроны.

Полупроводник с акцепторными примесями носит название дырочного полупроводника или *p*-типа.

На энергетической диаграмме, представленной на рис. 8.2, *в*, акцепторная примесь имеет энергетический уровень E_a, расположенный на небольшом расстоянии над потолком валентной зоны. При ионизации акцепторной примеси происходит переход электрона из валентной зоны на уровень E_a, а в валентной зоне появляется дырка, которая и является свободным носителем заряда.

В полупроводниках могут одновременно содержаться как донорная, так и акцепторная примесь. Такие полупроводники называются *компенсированными*.

§ 8.2. Электропроводность полупроводников и ее зависимость от различных факторов

Основным свойством вещества по отношению к электрическому полю является электропроводность, т. е. способность проводить электрический ток под воздействием постоянного (не изменяющегося во времени) электрического напряжения. Если полупроводник

находится в электрическом поле с напряженностью E, то имеющиеся в нем свободные носители заряда приобретают под действием этого поля направленное движение. Такое упорядоченное движение электрических зарядов и есть электрический ток.

Модельные представления механизма образования носителей заряда в собственном и примесных полупроводниках были рассмотрены ранее.

В собственном полупроводнике носителями заряда являются свободные электроны и дырки, концентрации которых одинаковы. При наличии внешнего электрического поля плотность электронной составляющей тока, который протекает через собственный полупроводник, т. е. число электрических зарядов переносимых за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной направлению электрического поля, определяется как

$$j_n = qnv_n, \tag{8.1}$$

где $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ — заряд электрона, Кл; n — концентрация электронов зоны проводимости, м$^{-3}$; v_n — средняя скорость упорядоченного движения электронов, возникшая под действием электрического поля (дрейфовая скорость), м/с.

Обычно скорость v_n пропорциональна напряженности поля:

$$v_n = \mu_n E, \tag{8.2}$$

где μ_n — коэффициент пропорциональности, называемый подвижностью, м^2/(В·с).

С учетом (8.1) уравнение (8.2) можно представлять в виде

$$j = E\,\delta_n = E/\rho_n, \tag{8.3}$$

где $\sigma = qn\mu_n$ — удельная электрическая проводимость полупроводника, обусловленная электронами, См/м; $\rho = 1/\sigma$ — удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

Аналогично, дырочная составляющая плотности тока для собственного полупроводника

$$j_p = qp\,\mu_p E, \tag{8.4}$$

где p — концентрация дырок валентной зоны, м$^{-3}$; μ_p — подвижность дырок, м^2/(В·с).

Удельная электрическая проводимость полупроводника, обусловленная дырками,

$$\sigma_p = qp\,\mu_p. \tag{8.5}$$

Суммарная плотность тока через собственный полупроводник

$$j = j_n + j_p = (qn\,\mu_n + qp\,\mu_p)\,E. \tag{8.6}$$

Удельная электрическая проводимость собственного полупроводника

$$\sigma_i = \sigma_n + \sigma_p = qn\,\mu_n + qp\,\mu_p = qn_i\,(\mu_n + \mu_p). \tag{8.7}$$

В примесном полупроводнике при комнатной температуре примесь практически полностью ионизирована и, следовательно, проводимость будет определяться, свободными подвижными носителями заряда, электронами и дырками в n- и p-полупроводниках соответственно

$$\sigma_n = qn_n \mu_n; \tag{8.8}$$

$$\sigma_p = qp_p \mu_p, \tag{8.9}$$

где n_n и p_p — концентрация основных носителей заряда электронов и дырок соответственно.

Так как концентрация и подвижность свободных носителей заряда зависят от температуры, то и удельная проводимость также будет зависеть от температуры.

При этом для концентрации свободных носителей заряда характерна экспоненциальная зависимость, а для подвижности — степенная. Для собственного полупроводника, у которого $\Delta E \approx kT$, и с учетом того, что степенная зависимость слабее экспоненциальной, можно записать

$$\sigma_i = \sigma_0 e^{-\Delta E/(kT)}, \tag{8.10}$$

здесь ΔE — ширина запрещенной зоны; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; σ_0 — множитель, не зависящий от температуры; он должен выражать σ при $T \to \infty$, т. е. когда все валентные электроны перешли в зону проводимости. График зависимости (8.10) удобно построить прологарифмировав выражение (8.10):

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{\Delta E}{k} \frac{1}{T} \tag{8.11}$$

На рис. 8.3 эта зависимость представлена в полулогарифмическом масштабе. Тангенс угла наклона α дает величину $\Delta E/k$, откуда находится значение ΔE для полупроводника.

Для примесного полупроводника формула для электропроводности в общем виде будет иметь следующий вид:

$$\sigma = \sigma_1 e^{-\Delta E/(kT)} + \sigma_2 e^{-\Delta E_a/(kT)}, \tag{8.12}$$

где ΔE_a — энергия ионизации примесей.

На рис. 8.4 представлена температурная зависимость полупроводника с различной концентрацией примеси. Повышение удельной проводимости полупроводника с увеличением T в области низких температур обусловлено увеличением концентрации свободных носителей заряда за счет ионизации примеси (рис. 8.4, участки ab, de, kl).

Наклон примесного участка кривой зависит от концентрации примесей. С ростом концентрации атомов примеси в полупроводнике уменьшается наклон кривой к оси абсцисс и она выше располага-

ется. Это объясняется тем, что наклон прямой в области примесной проводимости определяется энергией ионизации примеси. С увеличением концентрации примеси энергия ионизации уменьшается и соответственно уменьшается наклон прямых.

При дальнейшем повышении температуры наступает истощение примеси — полная ее ионизация. Собственная же электропроводность заметно еще не проявляется. В этих условиях концентрация свободных носителей практически от температуры не зависит и температурная зависимость удельной проводимости полупроводника

Рис. 8.3. Зависимость электропроводности от температуры для собственного полупроводника

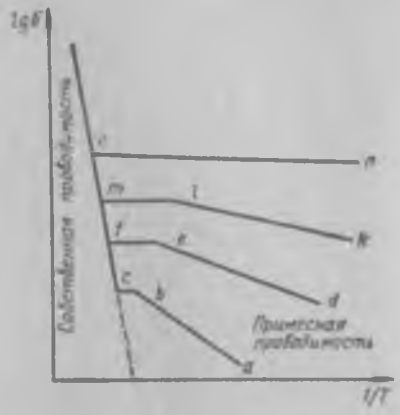


Рис. 8.4. Зависимость электропроводности полупроводника с различной концентрацией примесей

определяется зависимостью подвижности носителей заряда от температуры. Резкое увеличение удельной проводимости при дальнейшем росте температуры соответствует области собственной электропроводности.

С помощью кривых, изображенных на рис. 8.4, можно находить ширину запрещенной зоны полупроводника и энергию ионизации примесей.

У реальных полупроводников ход этих кривых может отличаться из-за того, что в материалах, применяемых на практике, имеется не один, а несколько видов примесей, у которых энергия ионизации (активации) различна.

В сильных электрических полях наблюдается нарушение линейности закона Ома $j = \sigma E$. Минимальную напряженность электрического поля, начиная с которой не выполняется линейная зависимость тока от напряжения, называют критической. Эта граница не является резкой и определенной и зависит от природы полупроводника, концентрации примесей, температуры окружающей среды.

Так как удельная проводимость определяется концентрацией свободных носителей заряда и их подвижностью, то линейность за-

кона Ома будет нарушена в том случае, когда по крайней мере одна из этих величин будет зависеть от напряженности электрического поля.

Если изменение абсолютного значения скорости свободного носителя заряда за счет внешнего поля на среднем пути между соударениями сравнимо с тепловой скоростью, то подвижность носителей заряда будет зависеть от электрического поля, причем она может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от температуры окружающей среды.

Воздействие сильного электрического поля приводит к значительному росту концентрации свободных носителей заряда. Разли-

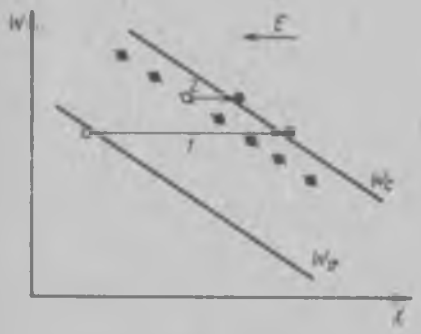


Рис 8.5. Электрические зоны полупроводника в сильном электрическом поле

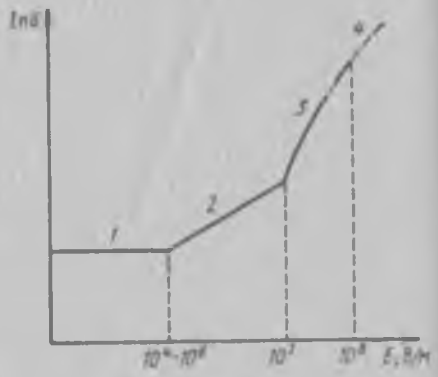


Рис. 8.6. Зависимость проводимости полупроводника от напряженности внешнего электрического поля

чают несколько механизмов повышения концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике под действием внешнего электрического поля — электростатическую, термоэлектронную и ударную ионизации.

Под воздействием внешнего электрического поля напряженностью E на полупроводник его энергетические зоны становятся наклонными. Это происходит из-за добавления к энергии электрона в полупроводнике в случае отсутствия внешнего поля дополнительной энергии, обусловленной внешним электрическим полем. Как видно из рис. 8.5 (горизонтальные переходы *1* и *2*), в сильном электрическом поле при наклоне зон возможен переход электрона из валентной зоны и примесных уровней в зону проводимости без изменения энергии — путем туннельного просачивания электронов через запрещенную зону. Этот механизм увеличения концентрации свободных носителей под действием сильного электрического поля называют электростатической ионизацией. Она возможна в электрических полях с напряженностью порядка 10^8 В/м. Если свободный электрон под действием внешнего электрического поля приобрета-

ет энергию, достаточную для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости, то возможна ударная ионизация. Ионизирующий электрон при этом остается в зоне проводимости. На рис. 8.6 приведена зависимость удельной проводимости от приложенного электрического поля, где участок *1* соответствует выполнению линейности закона Ома, *2* — термоэлектронной ионизации, *3* — электростатической и ударной, *4* — пробою.

Влияние деформации на проводимость полупроводников. Проводимость твердого кристаллического тела изменяется от деформации из-за увеличения или уменьшения (растяжение, сжатие) междуатомных расстояний и приводит к изменению концентрации и подвижности носителей заряда.

Концентрация меняется вследствие изменения ширины энергетических зон полупроводника и смещения примесных уровней, что приводит, в свою очередь, к изменению энергии активации носителей заряда и, следовательно, к уменьшению либо увеличению концентрации.

Подвижность меняется из-за увеличения или уменьшения амплитуды колебания атомов при их сближении или удалении.

Величиной, численно характеризующей изменение удельной проводимости полупроводников при определенном виде деформации, является тензочувствительность

$$d_\rho = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}, \qquad (8.13)$$

которая представляет собой отношение относительного изменения удельного сопротивления к относительной деформации в данном направлении.

§ 8.3. Фотопроводимость полупроводников

До сих пор мы рассматривали возникновение свободных носителей заряда под влиянием тепловой энергии. Перевод электрона в свободное состояние или образование дырки может осуществляться также под воздействием света.

Энергия падающего на полупроводник света передается электронам. При этом энергия, передаваемая каждому электрону, зависит от частоты световых колебаний и не зависит от яркости света (силы света). С увеличением яркости света возрастает число поглощающих свет электронов, но не энергия, получаемая каждым из них. Следует заметить, что энергия фотона определяется выражением

$$E_ф = h\nu = 1{,}23/\lambda, \qquad (8.14)$$

где h — постоянная Планка; ν — частота световых колебаний; λ — длина волны падающего света, выражаемая в микрометрах.

Для каждого определенного полупроводника должна существовать пороговая длина волны, определяемая энергией кванта, доста-

точной для возбуждения электрона с самого верхнего уровня валентной зоны на самый нижний уровень зоны проводимости, т. е. равна ширине запрещенной зоны. Поэтому, имея экспериментальную зависимость фотопроводимости полупроводника от длины волны падающего света, можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника экстраполировав круто падающую кривую в длинноволновой области до пересечения с осью абсцисс.

Фотопроводимость полупроводника определяется как разность удельной электропроводности при освещении и в темноте:

$$\sigma_{ф} = \sigma_{св} - \sigma_{т}. \qquad (8.15)$$

Темновая электропроводность определяется уже известной формулой

$$\sigma_{т} = pn\,\mu_{n}. \qquad (8.16)$$

Электропроводность полупроводника при действии на него света

$$\sigma_{св} = q\,(n + \Delta n)\,\mu_{n}, \qquad (8.17)$$

где Δn — дополнительное число электронов, образовавшихся в полупроводнике вследствие облучения его светом.

Таким образом, фотопроводимость будет

$$\sigma_{ф} = q\,\Delta n\,\mu_{n}. \qquad (8.18)$$

Освобожденные светом электроны находятся в зоне проводимости очень короткое время 10^{-3} — 10^{-7} с. При отсутствии внешнего электрического поля они хаотически перемещаются в междуатомных промежутках. Когда к кристаллу приложена разность потенциалов, они участвуют в электропроводности.

После окончания освещения образца электроны переходят на более низкие энергетические уровни — примесные или в валентную зону. При непрерывном освещении полупроводника устанавливается динамическое равновесие между образующимися дополнительными (неравновесными) носителями и уходящими на нижние уровни, т. е. устанавливается динамическое равновесие между процессами генерации носителей заряда и рекомбинацией их.

С понижением температуры уменьшается темновая проводимость служащая фоном, на котором появляется фотопроводимость, а поэтому роль фотопроводимости возрастает. Кроме того, увеличивается и абсолютное значение фотопроводимости. Это можно объяснить тем, что с уменьшением концентрации тепловых носителей заряда уменьшается вероятность рекомбинации фотоносителей заряда.

§ 8.4. Термоэлектрические явления в полупроводниках

К важнейшим термоэлектрическим явлениям в полупроводниках относятся эффекты Зеебека, Пельтье и Томпсона. Сущность явления Зеебека состоит в том, что в электрической цепи, состоящей из по-

следовательно соединенных разнородных полупроводников или полупроводника и металла, возникает ЭДС, если между концами этих материалов существует разность температур. На рис. 8.7 представлена цепь из двух спаев. Один конец спая нагрет до температуры T_1, а другой — до T_2, пусть $T_2 > T_1$. При этом в цепи обнаруживается электродвижущая сила — термоЭДС, которая в этом случае равна

$$E = \alpha (T_2 - T_1) \tag{8.19}$$

где α — коэффициент термоЭДС, который определяется материалами двух ветвей.

Рассмотрим механизм образования термоЭДС на примере однородного полупроводника, у которого один из концов нагрет больше, чем второй. Свободные носители заряда у горячего конца будут иметь более высокие энергии и скорости, чем у холодного. Кроме того, у горячего конца полупроводника свободных носителей окажется больше, чем у холодного. В силу этих причин поток свободных носителей от горячего конца к холодному будет больше, чем от холодного к горячему. Если концентрация свободных электронов и дырок в полупроводнике или их подвижности не одинаковы, то концы полупроводников окажутся противоположно заряженными.

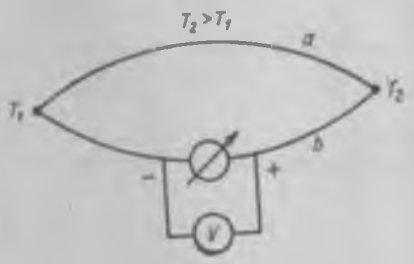


Рис. 8.7 Возникновение термоЭДС в цепи из двух спаев

В электронном полупроводнике основными носителями заряда, как известно, являются электроны, поток их от горячего конца к холодному будет больше, чем от холодного к горячему. В результате этого на холодном конце будет накапливаться отрицательный заряд, на горячем оставаться нескомпенсированный положительный. Возникшее электрическое поле будет вызывать поток электронов от холодного конца к горячему. Стационарное состояние установится при равенстве этих электронов. У дырочного полупроводника на холодном конце возникнет положительный заряд. Таким образом, по знаку термоЭДС можно судить о типе электропроводности полупроводника.

Эффект, обратный явлению Зеебека, называют эффектом Пельтье. Он состоит в том, что при прохождении тока через контакт двух разнородных полупроводников или полупроводника и металла происходит поглощение или выделение теплоты в зависимости от направления тока.

Количество теплоты, выделяемой или поглощаемой в контакте пропорционально значению протекаемого тока I,

$$Q_П = \Pi I t, \tag{8.20}$$

где $Q_п$ — теплота Пельтье; t — время прохождения тока; П коэффициент Пельтье, зависящий от природы контактирующих материалов, температуры и направления тока.

Эффект Томпсона заключается в выделении или поглощении теплоты при прохождении тока в однородном материале, в котором существует градиент температур. Наличие градиента температур в полупроводнике, как мы выяснили раньше, приводит к образованию термоЭДС. Если направление внешнего электрического поля будет совпадать с электрическим полем, обусловленным термоЭДС, то не вся энергия, поддерживающая ток, обеспечивается внешним источником, часть работы совершается за счет тепловой энергии самого полупроводника, в результате чего он охлаждается.

При смене направления внешнего электрического поля оно будет совершать дополнительную работу, что приведет к выделению теплоты дополнительно к теплоте Джоуля.

Теплота Томпсона $Q_т$ равна

$$Q_т = \tau (T_2 - T_1) t I, \qquad (8.21)$$

где τ — коэффициент Томпсона.

§ 8.5. Гальваномагнитные эффекты в полупроводниках

Гальваномагнитными эффектами в полупроводниках называются такие явления, которые возникают при одновременном действии на полупроводник электрического и магнитного полей.

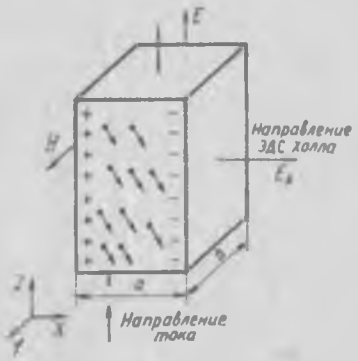


Рис. 8.8. К возникновению ЭДС Холла в полупроводнике

Все гальваномагнитные эффекты делятся на поперечные (действие электрического и магнитного полей обнаруживается на гранях полупроводника, параллельных электрическому и магнитному полям) и продольные (проявляются вдоль образца).

К поперечным относятся эффекты Холла и Эттингсгаузена, к параллельным — изменение сопротивления образца в магнитном поле и эффект Нернста (продольная разность температур).

Рассмотрим только эффект Холла. Если полупроводник, вдоль которого течет электрический ток, поместить в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока, то в полупроводнике возникнет поперечное электрическое поле, перпендикулярное току и магнитному полю. Это явление получило название эффекта Холла, а возникающая поперечная ЭДС — ЭДС Холла.

На рис. 8.8 изображена пластинка полупроводника n-типа. Электрическое поле **E** направлено параллельно оси Z, а магнитное

поле **H** — вдоль оси Y. На движущийся в магнитном поле электрон действует сила Лоренца, которая отклоняет его в направлении, перпендикулярном направлению магнитного поля. В результате электроны будут накапливаться у одного из торцов образца. На противоположной грани будет создаваться положительный нескомпенсированный заряд, обусловленный ионами донорной примеси. Такое накопление зарядов будет происходить до тех пор, пока действие возникшего в результате такого процесса электрического поля не уравновесит действующую на электрон силу Лоренца. Условие равновесия действующей на электрон силы в скалярной форме можно записать в виде

$$qv_n B = q E_x, \tag{8.22}$$

где v_n — средняя скорость направленного движения электрона; B — магнитная индукция в образце; E_x — напряженность возникшего поперечного электрического поля.

Считая поперечное электрическое поле однородным, получим

$$E_x a = U_x, \tag{8.23}$$

где a — ширина пластинки; U_x — ЭДС Холла.

Известно также, что $j = \sigma E$ или

$$j = qn\mu_n E = qnv_n, \tag{8.24}$$

где $j = I/(ab)$ — плотность тока, протекающего в образце, под действием внешнего электрического поля E.

Используя (8.24), из (8.22) получаем

$$E_x = jB/(qn) = R_x jB. \tag{8.25}$$

Величина R_x называется коэффициентом Холла и определяется как

$$R_x = 1/(qn). \tag{8.26}$$

ЭДС Холла в полупроводнике n-типа можно определить по формуле

$$U_x = -R_x \frac{TB}{h}. \tag{8.27}$$

Знак минус отражает тот факт, что носителями заряда в данном полупроводнике являются электроны. Для полупроводников p-типа получается аналогичное выражение, только лишь концентрация n будет заменена на p и направление поперечного электрического поля будет противоположным, т. е. ЭДС Холла будет положительная. Это обстоятельство используется для определения типа электропроводности полупроводников.

Если выразить ток в А, напряженность магнитного поля — в А/м, холловское напряжение — в В, толщину образца — в см, то коэффициент Холла равен (см³/К)

$$R_x = -\frac{bU_x}{IH} \tag{8.28}$$

Таким образом, измерив разность потенциалов Холла U_x, при известном токе I, напряженности магнитного поля H и толщине образца b рассчитываем R_x. Далее, если известны коэффициент Холла P_x и электропроводность, легко вычислить концентрацию носителей заряда и величину подвижности.

Эффект Холла интересен не только как метод определения характеристик полупроводниковых материалов, но и как принцип действия целого ряда полупроводниковых приборов, нашедших техническое применение.

§ 8.6. Электронно-дырочный переход (*p-n*-переход)

Основным элементом структуры большинства типов полупроводниковых приборов является электрический переход — переходный слой в полупроводниковом материале между двумя областями с различными типами электропроводности или разными значениями удельной электропроводности, причем одна из областей может быть металлом.

Электрический переход между двумя областями полупроводника, одна из которых имеет электропроводность *p*-типа, а другая — *n*-типа, называют электронно-дырочным переходом или *p-n*-переходом.

Создать *p-n*-переход механическим соединением двух полупроводников с различным типом электропроводности невозможно, электронно-дырочные переходы получают путем введения в полупроводник донорной и акцепторной примесей таким образом, чтобы одна часть полупроводника обладала электронной, а другая — дырочной электропроводностью.

Рассмотрим две отдельно взятые области электронного и дырочного полупроводников, показанные на рис. 8.9, *а*. Основные носители заряда в полупроводнике *n*-типа — электроны (на рис. 8.9,*а* обозначены знаком минус), а в полупроводнике *p*-типа — дырки (на рис. 8.9, *а* обозначены знаком плюс). Ионизированные атомы донорной и акцепторной примеси обозначены соответственно знаками плюс и минус в кружочках. Неосновные носители в электронном и дырочном полупроводниках не обозначены, так как их концентрация очень мала в сравнении с концентрацией основных носителей.

Условно будем считать, что *n*- и *p*-полупроводники приведены в идеальное соприкосновение (рис. 8.9, *б*). Так как в *n*-полупроводнике много электронов, а в *p*-полупроводнике много дырок, между полупроводниками начнется интенсивный обмен носителями заряда. За счет разности концентраций электроны из полупроводника *n*-типа диффундируют в полупроводник *p*-типа, оставляя в приконтактной области полупроводника *n*-типа нескомпенсированный положительный заряд ионов донорной примеси. Дырки, в свою оче-

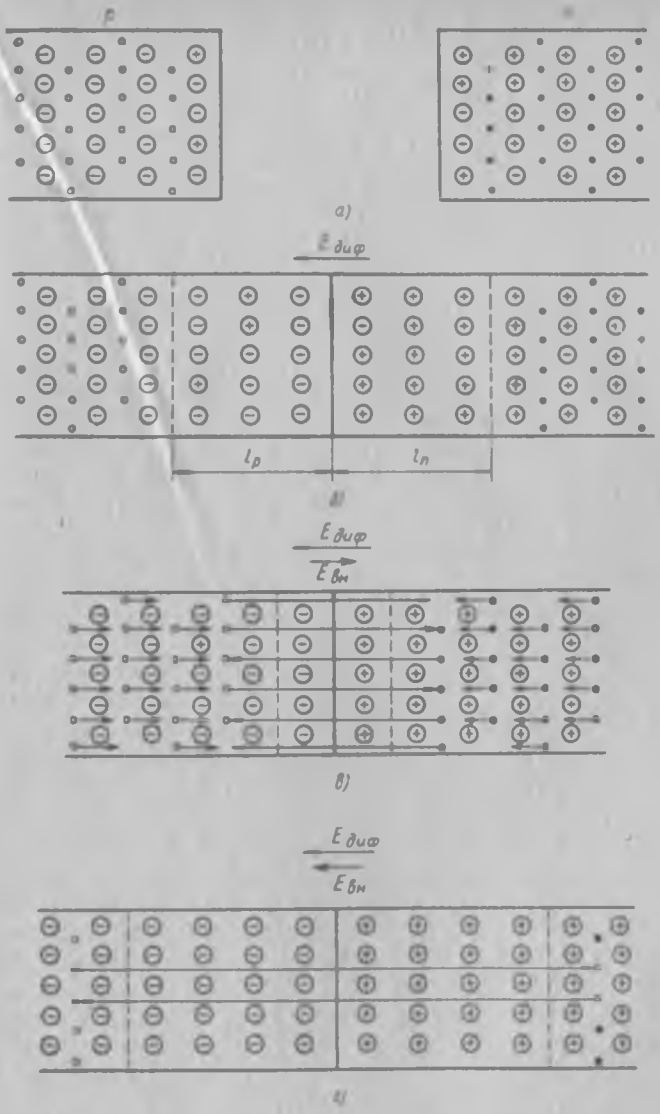


Рис 8.9 Распределение носителей заряда в областях полупроводника с *p*- и *n*-типами проводимости:

а — отдельные области; *б* — области в одном кристалле при отсутствии внешнего электрического поля, *в* — внешнее поле направлено навстречу диффузионному; *г* — внешнее поле совпадает по направлению с диффузионным

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

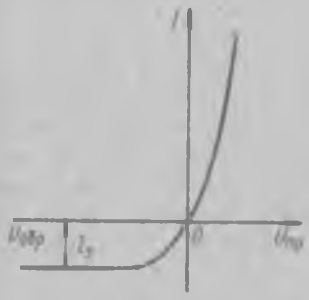


Рис 8.10. Вольт-амперная характеристика электронно-дырочного перехода

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

На рис. 8.10 показана зависимость между током, текущим через p-n-переход, и внешним напряжением, которая называется вольт-амперной характеристикой. Описывается вольт-амперная характеристика p-n-перехода следующим выражением:

$$I = I_s (e^{qU/(kT)} - 1), \qquad (8.29)$$

где I_s — ток насыщения (при обратном включении p-n-перехода этот ток равен обратному току); U — приложенное напряжение; $q/(kT) \approx 40$ В$^{-1}$ при комнатной температуре.

§ 8.7. Простые полупроводники

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

Существование и основные свойства германия предсказал Д. И. Менделеев в 1870 г. назвав его экасилицием. В 1886 г. немецкий химик К. Винклер обнаружил в минеральном сырье новый элемент, который он назвал германием. Германий оказался эквивалентен экасилицию. Содержание германия в земной коре невелико, но встречается он в естественных условиях во многих частях света. Выделяют германий из германийсодержащей руды чаще всего в результате химической переработки сырья с помощью концентрированной HCl в виде тетрахлорида германия $GeCl_4$. Тетрахлорид германия — летучая жидкость, которую подвергают глубокой очистке, используя методы экстракции и ректификации. После очистки $GeCl_4$ его гидролизуют водой, в результате чего получается диоксид германия GeO_2 — порошок белого цвета. После просушки GeO_2 восстанавливается в токе очищенного водорода при температуре 650 °С до элементарного германия, представляющего собой серый порошок. Восстановленный таким образом германий подвергается травлению в смеси кислот и его сплавляют в слитки. Слитки используют в качестве исходного материала для получения особо чистого германия методом зонной плавки или же непосредственного получения монокристаллов методом вытягивания из расплава.

Сущность метода зонной плавки заключается в том, что узкая расплавленная зона перемещается вдоль горизонтально расположенного образца, находящегося в графитовой или кварцевой лодочке. Примеси, имеющиеся в образце, оттесняются к концу слитка. Для высококачественной очистки весь процесс повторяют много раз или используют установки более совершенной конструкции, позволяющие создавать вдоль слитка одновременно четыре или пять расплавленных зон.

Для получения монокристалла по методу вытягивания из расплава тщательно очищенный от примесей германий расплавляют в установке, схема которой показана на рис. 8.11. Рабочим объемом служит герметическая водоохлаждаемая камера, внутри которой создается вакуум порядка 10^{-4} Па, или защитная газовая среда (из водорода или аргона высокой чистоты). Материал (М) помещается в тигель (А), насаженный на конец водоохлаждаемого штока (Б-1). Шток Б-1 при помощи электропривода приводится во вращение со строго постоянной скоростью. Кроме того, его можно опу-

скать или поднимать для подбора оптимального положения тигля с расплавом по отношению к нагревательному элементу В. В качестве нагревательного элемента используют обычно печь сопротивления или источник индукционного высокочастотного нагрева. Через верхний фланец камеры соосно с нижним штоком Б-1 вводится верхний шток Б-2, на нижнем конце которого крепится монокристаллическая затравка кристаллизуемого материала. Затравка вводится в расплав и выдерживается в нем, пока не произойдет оплавление поверхности. Когда это произойдет, затравку, вращая, начинают медленно поднимать. За затравкой тянется жидкий столбик расплава, удерживаемый поверхностным натяжением. Попадая в область низких температур над поверхностью тигля, расплав затвердевает, образуя одно целое с затравкой. Этим способом в настоящее время получают монокристаллы германия диаметром до 100 мм, а иногда и более.

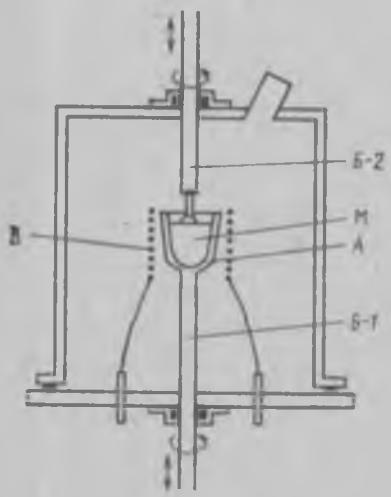


Рис. 8.11. Схема установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского

Чистый ге́рманий обладает металлическнм блеском, характеризуется относительно высокой твердостью и хрупкостью. Он кристаллизуется в структуре алмаза, плавится при температуре 937° С, плотность при 25 °С равна 5,33 г/см^3. В твердом состоянии германий типичный ковалентный кристалл. Кристаллический германий химически устойчив на воздухе при комнатной температуре. Размельченный в порошок германий при нагревании на воздухе до температуры $\approx$ 700 °С легко образует диоксид германия GeO_2. Германий слабо растворим в воде и практически нерастворим в соляной и разбавленной серной кислоте. Активными растворителями германия в нормальных условиях является смесь азотной и плавиковой кислот и раствор перекиси водорода. При нагреванин германий интенсивно взаимодействует с галогенами, серой и сернокислыми соединениями.

Основные физические свойства германия, кремния и селена приведены в табл. 8.1.

Температурные зависимости удельного сопротивления германия при различном содержании донорной примеси представлены на рис. 8.12. Германий, применяемый в полупроводниковых приборах, обладает удельным сопротнвлением от миллионных долей Ом·м до значений, близких к удельному сопротивлению собственного герма-

Таблица 8.1

Свойства	Германий	Кремний	Селен
Атомный номер	32	14	34
Плотность при 20 °С, Мг/м³	5,3	2,3	4,8
Температурный коэффициент линейного расширения (0—100 °С)	$6\cdot10^{-3}$	$4,2\cdot10^{-6}$	$2,5\cdot10^{-5}$
Удельная теплопроводность, Вт/(м·°С)	55	80	3
Температура плавления, °С	937	1412	218
Собственное удельное сопротивление при 20 °С, Ом·м	0,47	$2\cdot10^{3}$	—
Собственная концентрация носителей, м⁻³	$2,5\cdot10^{19}$	$2\cdot10^{16}$	—
Ширина запрещенной зоны, эВ:			
при 0 К	0,74	1,165	2,5
при 300 К	0,65	1,12	2,0
Подвижность электронов, м²/(В·с)	0,39	0,14	—
Подвижность дырок, м²/(В·с)	0,19	0,05	$0,2\cdot10^{-4}$

ния. На электрические свойства германия оказывает сильное влияние термообработка. Так, если образец *n*-типа нагреть до температуры выше 550 °С, а затем резко охладить (закалить), то изменится тип электропроводности. Аналогичная термообработка германия *p*-типа приводит к снижению удельного сопротивления, без изменения типа электропроводности. Отжиг закаленных образцов при температуре 500—550° С восстанавливает не только тип электропроводности, но и первоначальное удельное сопротивление. Если германий расплавить, то его удельное сопротивление становится близким к удельному сопротивлению жидких металлов, например ртути ($\rho_ж = 6,5\cdot10^{-7}$ Ом·м). Пример маркировки германия — ГДГ 075/05, где первая буква обозначает название материала (Г — германий), вторая — тип электропроводности (Э — электронный, Д — дырочный), третья — название легирующей примеси (в данном случае галлия). Числитель дроби указывает значение удельного сопротивления (0,75 Ом·см), знаменатель — диффузионную длину неосновных носителей заряда (0,5 мм).

Германий применяется для изготовления диодов различных типов, транзисторов, датчиков ЭДС Холла, тензодатчиков. Оптические свойства германия позволяют его использовать для изготовления фотодиодов и фототранзисторов, модуляторов света, оптических фильтров, а также счетчиков ядерных частиц. Рабочий диапазон температур германиевых приборов от —60 до +70 °С.

Кремний. В противоположность германию кремний является одним из самых распространенных элементов в земной коре; его содержание в ней около 29 %. Однако в свободном состоянии в природе он не встречается, а имеется только в соединениях в виде окис-

ла и в солях кремниевых кислот. Чистота природной окиси кремния в виде монокристаллов кварца иногда достигает 99,9 %; в ряде месторождений чистота песка достигает 99,8—99,9 %.

Технический кремний, получаемый восстановлением природного диоксида SiO_2 (кремнезем) в электрической дуге между графитовыми электродами, широко применяется в черной металлургии как легирующий элемент (например, трансформаторная сталь) и как раскислитель при производстве стали. Технический кремний представляет собой мелкокристаллический спек, содержащий около 1 % примесей, и как полупроводник использован быть не может. Он является исходным сырьем для производства кремния полупроводниковой чистоты, содержание примесей в котором должно быть менее 10^{-6} %.

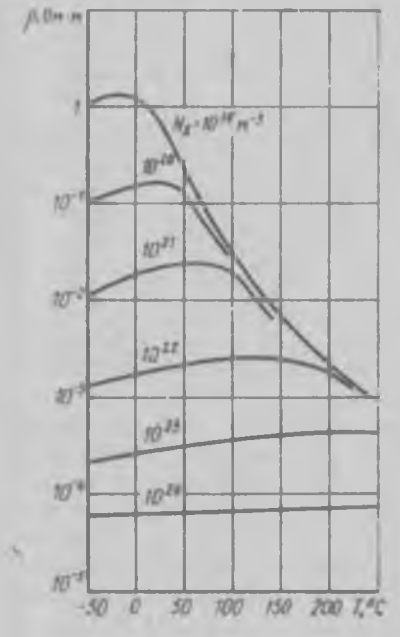


Рис. 8.12. Температурные зависимости удельного сопротивления германия при различном содержании донорной примеси

Технология получения кремния полупроводниковой чистоты включает в себя следующие операции: 1) превращение технического кремния в легколетучее соединение, которое после очистки может быть легко восстановлено; 2) очистка соединения физическими и химическими методами; 3) восстановление соединения с выделением чистого кремния; 4) конечная очистка кремния методом бестигельной зонной плавки; 5) выращивание монокристаллов.

В полупроводниковом производстве наибольшее распространение получил метод водородного восстановления трихлорсилана $SiHCl_3$. Его получают обработкой измельченного технического кремния сухим хлористым водородом при температуре 300 — 400 °С:

$$Si + 3HCl \rightleftarrows SiHCl_3 + H_2.$$

Трихлорсилан представляет собой жидкость с температурой кипения 32 °С. Поэтому он легко очищается методами экстракции, адсорбции и ректификации.

В отличие от германия основная очистка кремния от примесей осуществляется химическими методами. Кристаллизационные методы имеют цель — превратить полукристаллический кремний, полученный химическим путем, в монокристаллы с определенными

электрофизическими свойствами. Объемные кристаллы кремния выращивают методами выращивания из расплава и бестигельной вертикальной зонной плавки. Первый метод применяется, как правило, для получения крупных монокристаллов с относительно небольшим удельным сопротивлением ($< 2{,}5$ Ом·м). Второй метод используется для получения высокоомных монокристаллов кремния с малым содержанием остаточных примесей. Следует заметить, что в технологическом отношении кремний — более сложный материал, чем германий, так как он имеет высокую температуру плавления 1412 °С и в расплавленном состоянии химически весьма активен (вступает в реакцию практически со всеми тигельными материалами).

Метод вытягивания из расплава был ранее описан. Существенным недостатком этого метода при использовании его для выращивания монокристаллов кремния является загрязнение кристаллов кислородом. Источником кислорода служит кварцевый тигель, который взаимодействует с расплавом в соответствии с реакцией

$$SiO_{2\,(тв)} + Si_{(ж)} \rightarrow 2SiO.$$

Растворение кварца в кремний не только приводит к насыщению кислородом, но при этом вводятся и другие примеси, загрязняющие кремний.

Вертикальная бестигельная зонная плавка обеспечивает очистку кристаллов кремния от примесей и возможность выращивания монокристаллов кремния с малым содержанием кислорода. В этом методе узкая расплавленная зона удерживается между твердыми частями слитка за счет сил поверхностного натяжения. Расплавление слитков осуществляется с помощью высокочастотного индуктора (рис. 8.13), работающего на частоте 5 МГц. Высокочастотный нагрев позволяет проводить процесс бестигельной зонной плавки в вакууме и в атмосфере защитной среды

Методом вертикальной бестигельной плавки в настоящее время получают кристаллы кремния диаметром до 100 мм. Кристаллы кремния *n*- и *p*-типов получают путем введения при выращивании соответствующих примесей, среди которых наиболее часто используются фосфор и бор. Такие кристаллы электронного и дырочного кремния маркируются соответственно КЭФ и КДБ.

Основные физические свойства кремния представлены в табл. 8.1. Проводимость кремния, как и германия, очень сильно изменяется от присутствия примесей. На рис. 8.14 приведены зависимости удельного сопротивления кремния и германия от концентрации примесей. Благодаря более широкой запрещенной зоне собственное удельное сопротивление кремния на три с лишним порядка превосходит собственное сопротивление германия.

Кристаллический кремний при комнатных температурах обладает невысокой реакционной способностью: он весьма устойчив на воздухе, покрываясь тонкой пленкой диоксида кремния. Кремний

нерастворим в воде, не реагирует со многими кислотами. Хорошо растворяется лишь в смеси азотной и плавиковой кислот и в кипящей щелочи.

Плавление кремния сопровождается некоторым увеличением его плотности (примерно на 8 %) и скачкообразным уменьшением удельного сопротивления (примерно в 30 раз). В расплавленном состоянии кремний имеет удельное сопротивление порядка 10^{-4} Ом·м и ведет себя подобно жидким металлам.

В настоящее время кремний является базовым материалом полупроводниковой электроники. Он используется как для создания

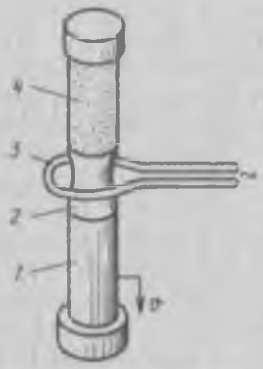


Рис 8.13. Схема бестигельной зонной плавки:

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

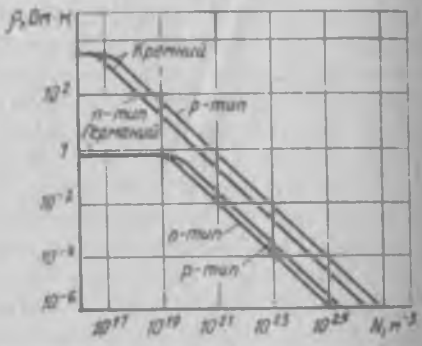


Рис. 8.14 Зависимость удельного сопротивления простых полупроводников от концентрации примесей при 20 °С

интегральных микросхем, так и для изготовления дискретных полупроводниковых приборов. Полупроводниковые интегральные микросхемы, отличающиеся малыми размерами и сложной конфигурацией активных областей, нашли особенно широкое применение в вычислительной технике и радиоэлектронике.

Из кремния изготавляются различные типы полупроводниковых диодов: низкочастотные (высокочастотные), маломощные (мощные), полевые транзисторы; стабилитроны; тиристоры. Широкое применение в технике нашли кремниевые фотопреобразовательные приборы: фотодиоды, фототранзисторы, фотоэлементы солнечных батарей. Подобно германию, кремний используется для изготовления датчиков Холла, тензодатчиков, детекторов ядерных излучений.

Благодаря тому что ширина запрещенной зоны кремния больше, чем ширина запрещенной зоны германия, кремниевые приборы могут работать при более высоких температурах, чем германиевые.

Верхний температурный предел работы кремниевых приборов достигает 180—200 °С.

Селен. Это элемент VI группы таблицы Менделеева и обладает рядом полезных электрических свойств. Он существует в нескольких аллотропных модификациях — стеклообразной, аморфной, моноклинной, гексагональной. Плавится селен при 220 °С, хотя температура плавления несколько неопределенна; кипит при 685 °С; все модификации селена превращаются в гексагональную кристаллическую при нагревании в интервале температур 180—220 °С.

Селен широко распространен в земной коре, но обычно в малых концентрациях. Для получения селена используют либо отходы производства серной кислоты, накапливающиеся в пыльных камерах, либо анодный шлам, получаемый при электролитической очистке меди. Для получения селена шлам нагревают, селен испаряется и адсорбируется в газоуловителе, орошаемом потоком серной кислоты. К раствору добавляют соляную кислоту; при пропускании через раствор диоксида серы селен осаждается. Осадок отфильтровывают, промывают, плавят и получают слитки селена необходимой формы. Для очистки селена используют методы вакуумной ректификации и очистку с помощью ионообменных смол. В результате содержание примесей уменьшается до 10^{-4} %.

Для изготовления полупроводниковых приборов (выпрямителей переменного тока и фотоэлементов) используется серый кристаллический гексагональный селен. Ширина его запрещенной зоны 1,79 эВ. Такой селен обладает дырочным типом электропроводности. Его удельное сопротивление порядка 10^3 Ом·м (при комнатной температуре). Снижение удельного сопротивления обычно достигается путем введения примесей — хлора, брома, иода.

Селен в отличие от других полупроводников обладает аномальной температурной зависимостью концентрации свободных носителей заряда: она уменьшается с ростом температуры, подвижность носителей заряда при этом возрастает. Электрические свойства селена измерялись многими исследователями, однако данные весьма противоречивы.

Кроме использования в электронике селен находит многочисленные применения в технологии красок, пластмасс, резины, керамики, как легирующая добавка при производстве стали, в электрофотографии.

Теллур. Это элемент VI группы таблицы Менделеева. Он является полупроводником с шириной запрещенной зоны 0,35 эВ, плавится при температуре 451 °С, легко испаряется. Температура кипения теллура при атмосферном давлении 1390 °С, очищают его многократной перегонкой.

Поликристаллический слиток теллура получают путем медленного охлаждения расплавленного в открытом тигле теллура. Затем из слитка вырезают несколько монокристаллов.

Удельное сопротивление чистого теллура при комнатной температуре составляет $29 \cdot 10^{-4}$ Ом·м. Он может быть и электронного, и дырочного типа проводимости.

Техническое применение теллур нашел в виде сплавов с висмутом, сурьмой и свинцом, которые используют для изготовления термоэлектрических генераторов.

Карбид кремния. Он является единственным бинарным соединением, образованным полупроводниковыми элементами IV группы таблицы Менделеева. Это полупроводниковый материал с большой шириной запрещенной зоны 2,8—3,1 эВ (в зависимости от модификаций). Карбид кремния применяют для изготовления полупроводниковых приборов, работающих при высоких температурах вплоть до 700 °С.

Технический карбид кремния изготовляют в электрических печах при восстановлении диоксида кремния (кварцевого песка) углеродом:

$$SiO_2 + 3C \rightarrow SiC + 2CO.$$

В печи образуются сросшиеся пакеты кристаллов SiC, называемые друзами. Большинство кристаллов в друзах имеет незначительные размеры, однако встречаются кристаллы, имеющие площадь до 1,5—2 см². Из друз путем дробления получают порошок карбида кремния. Кристаллы карбида кремния полупроводниковой чистоты получают методом возгонки в печах с графитовыми нагревателями и экранами. Процесс кристаллизации проводят в атмосфере аргона при температуре 2400—2600 °С. Получаемые кристаллы обычно имеют пластинчатую форму с размером в поперечнике порядка 1 см. Карбид кремния является одним из наиболее твердых веществ, он устойчив против окисления до температур свыше 1400° С. При комнатной температуре карбид кремния не взаимодействует ни с какими кислотами. При нагревании он растворяется в расплавах щелочей, а также взаимодействует с ортофосфорной кислотой и смесью (HNO_3 + HF).

Электропроводность кристаллов SiC при нормальной температуре примесная. Тип электропроводности и окраска кристаллов карбида кремния зависят от инородных примесей или определяются избытком атомов Si или C над стехиометрическим составом. Чистый карбид кремния стехиометрического состава бесцветен. Примеси элементов V группы (N, P, As, Sb, Bi) и железа в карбиде дают зеленую окраску и электропроводность *n*-типа, элементы II (Ca, Mg) и III групп (B, Al, Ga, In) — голубую и фиолетовую окраску и электропроводность *p*-типа. Избыток Si приводит к электронной электропроводности SiC, а избыток C — к дырочной.

Карбид кремния применяется для серийного выпуска варисторов (нелинейных резисторов), светодиодов, а также высокотемпературных диодов, транзисторов, тензорезисторов, счетчиков частиц

высокой энергии, способных работать в химически агрессивных средах.

Бинарные соединения. Среди бинарных соединений практическое применение находят соединения $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{IV}$.

Полупроводниковые соединения $A^{III}B^{V}$ являются ближайшими аналогами кремния и германия. Они образуются в результате взаимодействия элементов III-б подгруппы периодической таблицы (бора, алюминия, галлия, индия) с элементами V-б подгруппы (азотом, фосфором, мышьяком, сурьмой). Соединения $A^{III}B^{V}$ принято классифицировать по металлоидному элементу. Соответственно различают нитриды, фосфиды, арсениды и антимониды. Получают эти соединения или из расплава, который содержит элементы в равных атомных концентрациях, или из раствора соединения, имеющего в избытке элементы III группы, а также из газовой фазы. Кристаллы антимонидов, арсенидов галлия и индия обычно выращивают из расплава вытягиванием на затравку из-под инертного флюса. Слой жидкого прозрачного флюса, находящегося под давлением инертного газа, обеспечивает полную герметизацию тигля и подавляет испарение летучего компонента из расплава. Монокристаллы, полученные из расплава, обладают недостаточно высокой химической чистотой. Для очистки используются те же методы, что и для очистки германия и кремния.

Некоторые параметры рассматриваемых соединений приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Соединение	$T_{пл.}$, °С	ΔE, эВ, при 20 °С	μ_n, м²/(В·с) при 20 °С	μ_p, м²/(В·с), при 20 °С	r
GaP	1450—1500	2,25	0,011	0,0075	10
InP	1062	1,25	0,46	0,15	14
GaAs	1237	1,43	0,85	0,043	12,5
InAs	942	0,36	3,3	0,046	14
InSb	525	0,17	7,7	0,08	17
GaSb	712	0,67	0,4	0,14	15

Арсенид галлия среди соединений $A^{III}B^{V}$ занимает особое положение. Большая ширина запрещенной зоны (1,4 эВ), высокая подвижность электронов [0,85 м²/(В·с)] позволяют создавать на его основе приборы, работающие при высоких температурах и высоких частотах. Первым полупроводником являлся GaAs, на котором в 1962 г. был создан инжекционный лазер. Он используется для изготовления светодиодов, туннельных диодов, диодов Ганна, транзисторов, солнечных батарей и других приборов. Для изготовления детекторов в инфракрасной области спектра, датчиков Холла, термоэлектрических генераторов, тензометров применяется антимонид индия, имеющий очень малую ширину запрещенной зоны

(0,17 эВ) и очень высокую подвижность электронов — 7,7 м²/(В·с). Широкое применение в серийной производстве светодиодов нашел фосфид галлия, имеющий большую ширину запрещенной зоны (2,25 эВ). В отличие от других соединений группы $A^{III}B^{V}$ чрезвычайно высокой чувствительностью к механическим напряжениям обладает антимонид галлия. Удельное сопротивление GaSb увеличивается в два раза при воздействии давления $4 \cdot 10^8$ Па. При таком же давлении, приложенном к кристаллам GaAs и InP, их удельное сопротивление меняется лишь на 3 %. Благодаря высокой чувствительности к деформациям антимонид галлия используют при изготовлении тензометров.

К полупроводниковым соединениям $A^{II}B^{VI}$ относят халькогениды цинка, кадмия и ртути. Среди них можно выделить сульфиды, селениды и теллуриды.

Основные физические свойства данных соединений указаны в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Соединения	$T_{пл}$, °C	ΔE, эВ, при 20 °C	μ_n, м²/(В·с), при 20 °C	μ_p, м²/(В·с), при 20 °C
ZnS	1780	3,74	0,014	0,0005
CdS	1750	2 53	0,034 $\perp c$	0,011 $\perp c$
NgS	1480	1,78	0,07	—
ZnSe	1520	2,73	0,026	0,0015
CdSe	1264	1,85	0,072 $\parallel c$	0,0075
HgSe	790	0,12	2,0	—
ZnTe	1239	2,23	0,053	0,003
CdTe	1041	1,51	0,12	
HgTe	670	0,08	2,5	0,02

Технология выращивания монокристаллов соединений $A^{II}B^{VI}$ разработана гораздо менее полно, чем технология полупроводников типа $A^{III}B^{V}$. Широкозонные полупроводники $A^{II}B^{VI}$ представляют собой в технологическом отношении трудные объекты, так как обладают высокими температурами плавления и высокими давлениями диссоциации в точке плавления. Выращивание таких материалов в большинстве случаев осуществляется перекристаллизацией предварительно синтезированного соединения через паровую фазу в запаянных кварцевых ампулах. Применяют соединения $A^{II}B^{VI}$ в большинстве случаев для создания промышленных люминофоров, фоторезисторов, высокочувствительных датчиков Холла и приемников далекого инфракрасного излучения.

Среди полупроводниковых соединений типа $A^{IV}B^{VI}$ наиболее изученными являются халькогениды свинца: PbS, PbSe, PbTe. Сульфид, селенид и теллурид свинца в естественном состоянии встречаются в виде минералов галенита, клаусталита и алтаита. Первый

минерал является одной из самых распространенных руд свинца, два других в природе обнаруживаются довольно редко. Монокристаллы PbS, PbSe, PbTe получают в основном путем осаждения из газовой фазы, методом выращивания из расплава или методом медленного охлаждения расплава с использованием естественного градиента температуры печи. Основные физические свойства халькогенидов свинца приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Соединение	$T_{пл}$, °C	ΔE, эВ, при 20 °C	μ_n, м²/(В·с), при 20 °C	μ_p, м²/(В·с), при 20 °C
PbS	1114	0,39	0,06	0,07
PbSe	1076	0,27	0,12	0,10
PbTe	917	0,32	0,18	0,09

Из табл. 8.4 видно, что эти соединения являются узкозонными полупроводниками. Халькогениды свинца используют для изготовления фоторезисторов в инфракрасной технике, инфракрасных лазеров, тензометров и термогенераторов, работающих в интервале температур от комнатной до 600 °C.

Контрольные вопросы

1. Что такое полупроводники? Какими характерными свойствами они обладают?
2. Какие энергетические зоны имеются в полупроводниках и как они образуются?
3. Что такое собственный, примесный и компенсированный полупроводник?
4. Чем определяется электропроводость полупроводников?
5. Как влияют на электропроводность полупроводников температура, деформация, освещение, электрическое поле?
6. Какие термоэлектрические явления в полупроводниках имеют место?
7. Что такое эффект Холла?
8. Как можно определить тип проводимости полупроводника?
9. В чем заключается эффект выпрямления на *p-n*-переходе?
10. Что служит сырьем для получения простых полупроводников? Какие основные технологические операции имеют место при получении кремния полупроводниковой чистоты?
11. Почему рабочий температурный диапазон кремния больше чем германия?
12. Почему для очистки кремния используется бестигельная зонная плавка?
13. Какие материалы используются для изготовления инжекционных лазеров и светодиодов?
14. Какие сложные полупроводниковые соединения нашли наиболее широкое применение?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гуляев А. П.* Металловедение.— М.: Машиностроение, 1986, 542 с.

2. *Стеклов О. Л.* Основы сварочного производства.— М. Высшая школа 1986. 222 с.

3. *Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М.* Электротехнические материалы.— Л.: Энергоатомиздат, 1985. 303 с.

4. *Пасынков В. В., Сорокин В. С.* Материалы электронной техники.— М.: Высшая школа, 1986. 367 с.

5. *Калинин Н. Н., Скибинский Г. Л., Новиков П. П.* Электрорадиоматериалы.— М.: Высшая школа, 1981. 294 с.

6. Справочник по электротехническим материалам/Под ред. *Ю. В. Корицкого В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева.* — М.: Энергоатомиздат, Т. 1—1986 Т.2—1987.

7. Производство кабелей и проводов / Под ред. *Н. И. Белоруссова, И. Б. Пешкова.*—М.: Энергоатомиздат, 1981. 500 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 4

ЧАСТЬ I. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ 5

Глава 1. Основы металловедения 6

§ 1.1. Строение и свойства металлов и сплавов 6
§ 1.2. Сплавы железа с углеродом 22
§ 1.3. Основы термической и химико-термической обработки стали 33
Контрольные вопросы 44

Глава 2. Способы обработки металлов 45

§ 2.1. Общие сведения о литейном производстве 45
§ 2.2. Сварка металлов 50
§ 2.3. Обработка металлов давлением 60
§ 2.4. Обработка металлов резанием 66
Контрольные вопросы 81

ЧАСТЬ II. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ 82

Глава 3. Магнитные материалы 85

§ 3.1. Общие сведения 85
§ 3.2. Процессы технического намагничивания и перемагничивания магнитных материалов 87
§ 3.3. Магнитомягкие материалы 92
§ 3.4. Магнитотвердые материалы 105
Контрольные вопросы 111

Глава 4. Проводниковые материалы 111

§ 4.1. Общие сведения о проводниках 111
§ 4.2. Проводниковые материалы 118
Контрольные вопросы 132

Глава 5. Физика диэлектрических материалов 132

§ 5.1. Общие сведения 132
§ 5.2. Электропроводность диэлектриков 133
§ 5.3. Поляризация диэлектриков 149
§ 5.4. Диэлектрические потери 159
§ 5.5. Электрическая прочность диэлектриков 166
§ 5.6. Механические, термические и физико-химические свойства диэлектриков 184
Контрольные вопросы 192

Глава 6. Диэлектрические материалы 193

§ 6.1. Газообразные диэлектрики 193
§ 6.2. Жидкие диэлектрики 194

§ 6.3. Полимеры 201
§ 6.4. Пластмассы и пленочные материалы 215
§ 6.5. Резины 220
§ 6.6. Лаки, эмали, компаунды 224
§ 6.7. Волокнистые материалы 228
§ 6.8. Слюда и слюдяные материалы 231
§ 6.9. Стекло и керамика 236
§ 6.10. Активные диэлектрики 242
Контрольные вопросы 247

Глава 7. **Провода, шины и кабели** 248

§ 7.1. Провода и шины 248
§ 7.2. Кабели 257
Контрольные вопросы 266

Глава 8. **Полупроводниковые материалы** 267

§ 8.1. Общие сведения и классификация полупроводников . . . 267
§ 8.2. Электропроводность полупроводников и ее зависимость от различных факторов 270
§ 8.3. Фотопроводимость полупроводников 275
§ 8.4. Термоэлектрические явления в полупроводниках 276
§ 8.5. Гальваномагнитные эффекты в полупроводниках . . . 278
§ 8.6. Электронно-дырочный переход (*p-n*-переход) . . . 280
§ 8.7. Простые полупроводники 283
Контрольные вопросы 293

Список литературы 294

Учебное издание

Бородулин Владимир Николаевич,
Воробьев Алексей Степанович,
Попов Сергей Яковлевич,
Спирихин Иван Павлович,
Филиков Виталий Андреевич,
Чепарин Владимир Петрович

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Зав. редакцией *В. И. Трефилов*
Редактор *И. А. Исаева*
Младший редактор *И. С. Скирдова*
Художник *В. В. Гарбузов*
Художественный редактор *Т. М. Скворцова*
Технический редактор *Г. А. Виноградова*
Корректор *Г. Н. Кострикова*

ИБ 8559

Изд. № ЭР-512. Сдано в набор 18.05.90. Подп. в печать 04.09.90.
Формат 60×88 1/16. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная.
Объем 18,13 усл. печ. л. 18,13 усл. кр.-отт. 19,23 уч.-изд. л.
Тираж 50 000 экз. Зак. № 318 Цена 90 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 4 Госкомпечати СССР
129041, Москва, Б. Переяславская ул., 46.