

Ю.Н. Маслов, Н.Н. Ситов, М.Н. Жукова

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
И КОНСТРУКЦИОННОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2019**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра материаловедения и технологии машиностроения

Ю.Н. Маслов, Н.Н. Ситов, М.Н. Жукова

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
И КОНСТРУКЦИОННОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2019**

УДК 620.22 (075)
ББК 30.3я7
Ж – 860

Маслов Ю.Н., Ситов Н.Н., Жукова М.Н. Электротехническое и конструкционное материаловедение: учебное пособие/ ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2019. – 109 с.

Рассмотрены строение и свойства металлов и сплавов. Приведены краткие сведения о железоуглеродистых сплавах, термической и химико-термической обработке. Более подробно рассмотрены электротехнические материалы: проводниковые, полупроводниковые, диэлектрические, магнитные.

Учебное пособие предназначено для студентов направления 13.03.02 "Электроэнергетика и электротехника".

Рецензенты: зам. директора Института безотрывных форм обучения ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент В.О. Варганов; канд. физ.-мат. наук кафедры строительной физики и химии СПбГАСУ, доцент Ю.А. Машков

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ в качестве учебного пособия.

© Высшая школа технологии
и энергетики СПбГУПТД, 2019
© Маслов Ю.Н., Ситов Н.Н.,
Жукова М.Н., 2019

Учебное издание

Ю.Н. Маслов, Н.Н. Ситов, М.Н. Жукова

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
И КОНСТРУКЦИОННОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие

Редактор и корректор В.А. Басова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Компьютерный набор и верстка А.А. Трубниковой

Темплан 2019, поз.50

Подп. к печати 17.12.19. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. Объем 7,0 печ. л.; 7,0 уч. – изд. л.

Тираж 100 экз. Изд. № 50. Цена "С". Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД.
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

Введение

Материаловедение - наука о взаимосвязи между составом, строением и свойствами материалов и о закономерностях их изменений при внешних физико-химических взаимодействиях.

Все материалы по химическим свойствам делятся на две основные группы- металлические и неметаллические. К первым относятся металлы и их сплавы. Металлы составляют более 2/3 всех известных химических элементов.

В свою очередь металлические материалы делятся на черные и цветные. К черным относятся железо и сплавы на его основе – стали и чугуны. Все остальные металлы относятся к цветным. Чистые металлы обладают низкими механическими свойствами по сравнению со сплавами, и поэтому их применение ограничивается теми случаями, когда необходимо использовать их специальные свойства (например, магнитные или электрические).

Практическое значение различных металлов не одинаково. Наибольшее применение в технике приобрели черные металлы. На основе железа изготавливают более 90 % всей металлопродукции. Однако цветные металлы обладают целым рядом ценных физико-химических свойств, которые делают их незаменимыми. Из цветных металлов наибольшее промышленное значение имеют алюминий, медь, магний, титан и др.

Кроме металлических, в промышленности значительное место занимают различные неметаллические материалы – пластмассы, керамика, резина и др., их производство и применение развивается в настоящее время опережающими темпами по сравнению с металлическими материалами. Но использование их в промышленности невелико (до 10 %).

Электротехническое материаловедение представляет собой раздел материаловедения, в котором рассматриваются состав, строение и свойства электротехнических материалов. По электрическим свойствам и характеру изменения свойств с изменением температуры эти материалы делятся на три группы: проводники, полупроводники и диэлектрики.

Проводниковые материалы имеют удельное сопротивление в пределах 10^{-8} - 10^{-5} Ом·м. Применяются для проводников тока, резисторов, контактов.

Полупроводники имеют удельное сопротивление 10^{-5} - 10^8 Ом· м. Применяются для выпрямления и усиления электрического тока, превращения других видов энергии в электрическую.

Диэлектрики обладают удельным сопротивлением в пределах 10^8 - 10^{16} Ом· м. Применяются в основном в качестве изоляторов.

Также к электротехническим материалам можно отнести магнитные материалы, которые делятся на магнитомягкие и магнитотвердые.

1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В технике под металлами понимают вещества, обладающие комплексом металлических свойств: характерным металлическим блеском, высокой электропроводностью, хорошей теплопроводностью, высокой пластичностью и др.

1.1. Строение металлов

Кристаллические решетки. Все вещества в твердом состоянии могут иметь кристаллическое или аморфное строение. В аморфном веществе атомы расположены хаотично, а в кристаллическом – в строго определенном порядке. Все металлы в твердом состоянии обычно имеют кристаллическое строение.

Для описания кристаллической структуры металлов пользуются понятием кристаллической решетки. Кристаллическая решетка – это воображаемая пространственная сетка, в узлах которой расположены атомы. Наименьшая часть кристаллической решетки, определяющая структуру металла, называется элементарной кристаллической ячейкой. На рис. 1.1 изображены элементарные ячейки для наиболее распространенных кристаллических решеток.

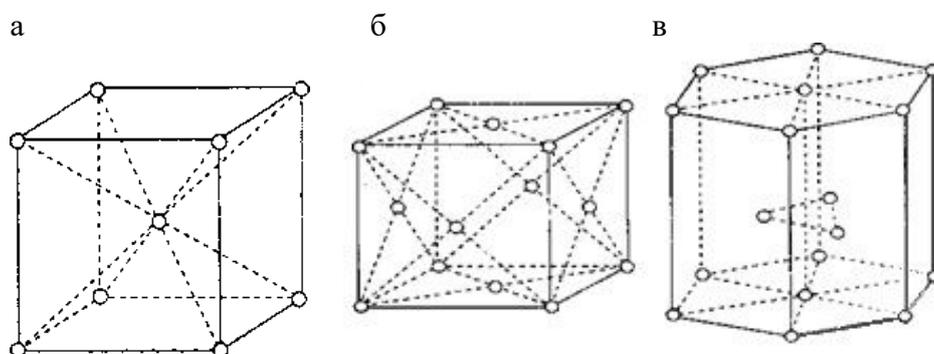


Рис. 1.1. Основные виды кристаллических решеток

В кубической объемноцентрированной решетке (рис. 1.1 а) атомы расположены в узлах ячейки и один атом - в центре куба. Такую решетку имеют хром, вольфрам, молибден и др. В кубической гранецентрированной решетке (рис. 1.1 б) атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани. Эту решетку имеют алюминий, медь, никель и другие металлы. В гексагональной плотноупакованной решетке (рис. 1.1 в) атомы расположены в вершинах и центрах

оснований шестигранной призмы и три атома - в середине призмы. Такой тип решетки имеют магний, цинк и некоторые другие металлы.

Кристаллизация металлов. Процесс образования в металлах кристаллической решетки называется кристаллизацией. Для изучения процесса кристаллизации строят кривые охлаждения металлов, которые показывают изменение температуры (t) во времени (τ). На рис. 1.2 приведены кривые охлаждения аморфного и кристаллического веществ. Затвердевание аморфного вещества (рис. 1.2 а) происходит постепенно, без резко выраженной границы между жидким и твердым состоянием. На кривой охлаждения кристаллического вещества (рис. 1.2 б) имеется горизонтальный участок с температурой $t_{кр}$, называемой температурой кристаллизации. Наличие этого участка говорит о том, что процесс сопровождается выделением скрытой теплоты кристаллизации. Длина горизонтального участка - это время кристаллизации.



Рис. 1.2. Кривые охлаждения аморфного и кристаллического тел

Кристаллизация металла происходит постепенно. Она объединяет два процесса, происходящих одновременно: возникновение центров кристаллизации и рост кристаллов. В процессе кристаллизации, когда растущий кристалл окружен жидкостью, он имеет правильную геометрическую форму. При столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается (рис. 1.3.). После окончания кристаллизации образуются кристаллы неправильной формы, которые называются зернами или кристаллитами. Внутри каждого зерна имеется определенная ориентация кристаллической решетки, отличающаяся от ориентации решеток соседних зерен.

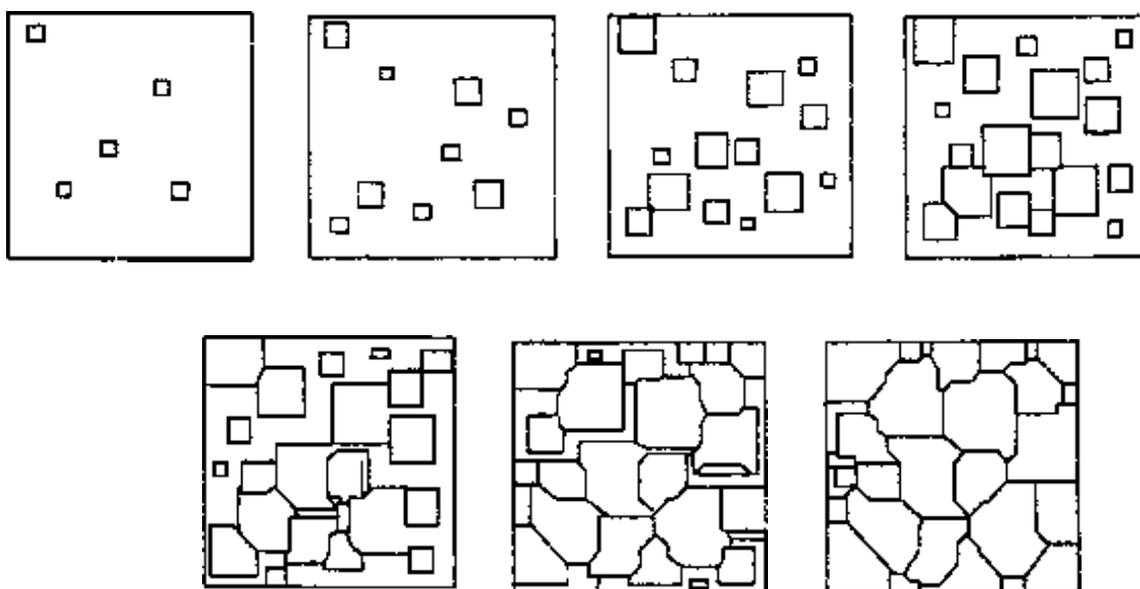


Рис. 1.3. Схема процесса кристаллизации металла

Полиморфизм. Некоторые металлы в зависимости от температуры могут существовать в различных кристаллических формах. Это явление называется полиморфизм или аллотропия, а различные кристаллические формы одного вещества называются полиморфными модификациями. Процесс перехода от одной кристаллической формы к другой называется полиморфным превращением. Полиморфные превращения протекают при определенной температуре.

Полиморфные модификации обозначают строчными греческими буквами $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ и т.д., причем α соответствует модификации, существующей при наиболее низкой температуре. Полиморфизм характерен для железа, олова, кобальта, марганца, титана и некоторых других металлов.

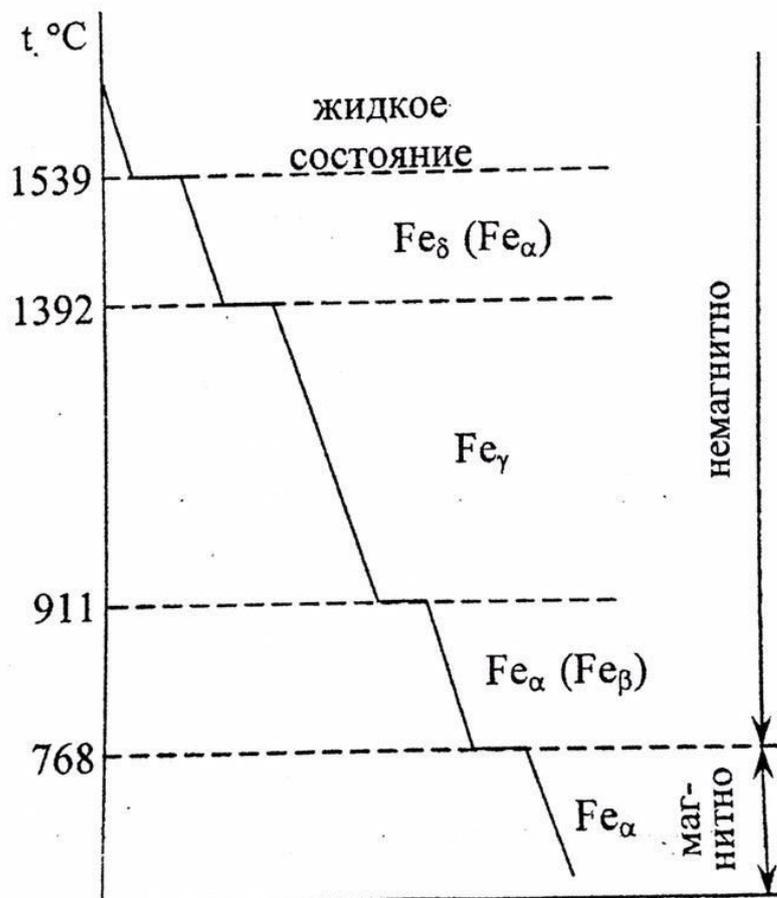


Рис. 1.4. Кривая охлаждения железа

Важное значение имеет полиморфизм железа. На рис. 1.4 изображена кривая охлаждения железа. Полиморфные превращения характеризуются горизонтальными участками на кривой охлаждения, так как при них происходит полная перекристаллизация металла. До 911°C устойчиво Fe_α , имеющее кубическую объемноцентрированную решетку. В интервале $911 - 1392^\circ\text{C}$ существует Fe_γ с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой. При $1392 - 1539^\circ\text{C}$ вновь устойчиво Fe_α . Часто высокотемпературную модификацию Fe_α обозначают Fe_δ . Остановка на кривой охлаждения при 768°C связана не с полиморфным превращением, а с изменением магнитных свойств. До 768°C железо магнитно, а выше - немагнитно.

Дефекты кристаллического строения. Реальный металлический кристалл всегда имеет дефекты кристаллического строения. Они подразделяются на точечные, линейные, поверхностные и объемные.

Точечные дефекты малы во всех трех измерениях. К точечным дефектам относятся вакансии, представляющие собой узлы кристаллической решетки, в которых отсутствуют атомы (рис. 1.5 а), а также замещенные атомы примеси (рис. 1.5 б) и внедренные атомы (рис. 1.5 в) которые могут быть как примесными, так и атомами основного металла. Точечные дефекты вызывают местные искажения кристаллической решетки, которые затухают достаточно быстро по мере удаления от дефекта.

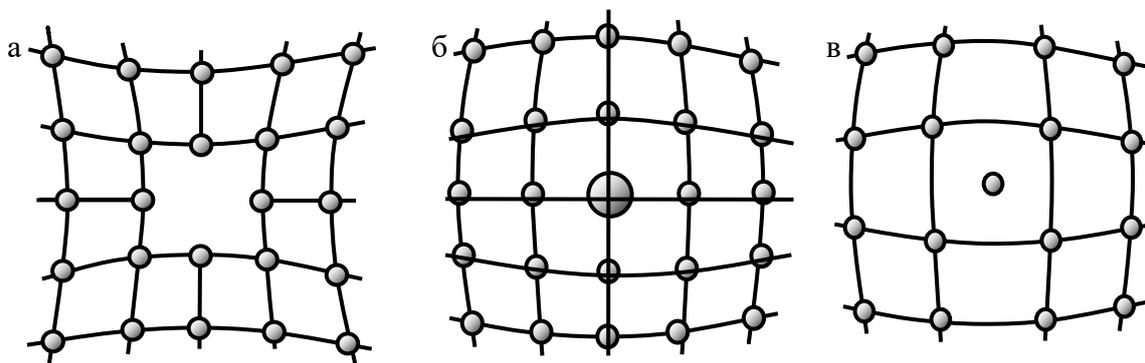


Рис. 1.5. Схемы точечных дефектов в кристаллах

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем. Эти дефекты называют дислокациями. Краевая дислокация (рис. 1.6) представляет собой искажение кристаллической решетки, вызванное наличием «лишней» атомной полуплоскости.

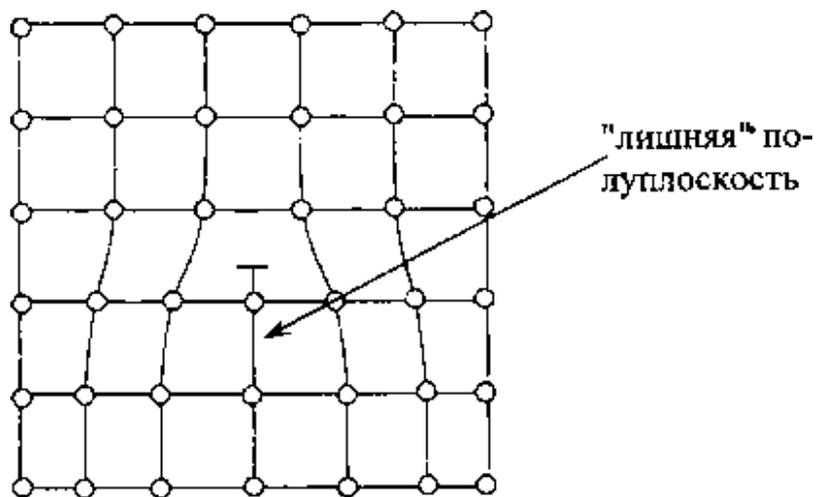


Рис. 1.6. Схема краевой дислокации

Поверхностные дефекты малы только в одном измерении. К ним относятся, например, границы между отдельными зёрнами или группами зёрен.

Наклеп и рекристаллизация. При пластической деформации изменяются не только форма и размеры металла, но также его внутреннее строение и механические свойства. Зёрна разворачиваются, деформируются и сплющиваются, вытягиваясь в направлении деформации. Образуется волокнистая структура. При этом прочность и твердость металла повышаются, а пластичность и вязкость снижаются. Явление упрочнения металла при пластической деформации называется наклепом.

Волокнистое строение и наклеп могут быть устранены при нагреве металла. Частичное снятие наклепа происходит уже при небольшом нагреве (до 300 - 400°C для железа). Но волокнистая структура при этом сохраняется. При нагреве до более высокой температуры в металле происходит образование новых равноосных зёрен. Этот процесс называется рекристаллизацией. Наклеп при этом снимается полностью. Температура, при которой начинается процесс рекристаллизации, называется температурой рекристаллизации. Абсолютная температура рекристаллизации T_p связана с абсолютной температурой плавления простой зависимостью: $T_p = a \cdot T_{пл}$, где a – коэффициент, зависящий от состава и структуры металла. Для особо чистых металлов $a=0,1 - 0,2$, для металлов технической чистоты $a=0,3 - 0,4$, для сплавов $a=0,5 - 0,6$.

Если деформирование металла происходит при температуре, которая выше температуры рекристаллизации, то наклеп после деформации не возникает. Такая деформация называется горячей. При горячей деформации идут одновременно процессы упрочнения и рекристаллизации. Деформация, которая происходит ниже температуры рекристаллизации, называется холодной.

1.2. Металлические сплавы

Металлическим сплавом называется материал, полученный сплавлением двух или более металлов, или металлов с неметаллами, обладающий металлическими свойствами. Вещества, которые образуют сплав, называются компонентами. Фазой называют однородную часть сплава, характеризующуюся определенными составом, строением и отделенную от других частей сплава поверхностью раздела, при переходе через которую состав или строение меняется скачкообразно. Под структурой понимают форму, размер и характер взаимного расположения фаз в металлах и сплавах. Структурными составляющими называют обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение, с присущими им характерными особенностями.

Виды сплавов по структуре. По характеру взаимодействия компонентов все сплавы подразделяются на три основных типа: механические смеси, химические соединения и твердые растворы.

Механическая смесь двух компонентов А и В образуется, если они не способны к взаимодействию или взаимному растворению. Каждый компонент при этом кристаллизуется в свою кристаллическую решетку. Структура механических смесей неоднородная, состоящая из отдельных зерен компонента А и компонента В. Свойства механических смесей зависят от количественного соотношения компонентов: чем больше в сплаве данного компонента, тем ближе к его свойствам свойства смеси.

Химическое соединение образуется, когда компоненты сплава А и В вступают в химическое взаимодействие. При этом соотношение чисел атомов в соединении соответствует его химической формуле A_mB_n . Химическое соединение имеет свою кристаллическую решетку, которая отличается от кристаллических решеток компонентов. Химические соединения имеют однородную структуру, состоящую из одинаковых по составу и свойствам зерен.

При образовании твердого раствора атомы одного компонента входят в кристаллическую решетку другого. Твердые растворы замещения образуются в результате частичного замещения атомов кристаллической решетки одного компонента атомами второго (рис. 1.5 б.). Твердые растворы внедрения образуются, когда атомы растворенного компонента внедряются в кристаллическую решетку компонента – растворителя (рис. 1.5 в.). Твердый раствор имеет однородную структуру, одну кристаллическую решетку. В отличие от химического соединения твердый раствор существует не при строго определенном соотношении компонентов, а в интервале значений концентраций. Обозначают твердые растворы строчными буквами греческого алфавита: $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ и т.д.

Диаграмма состояния. Диаграмма состояния показывает строение сплава в зависимости от соотношения компонентов и от температуры. Она строится экспериментально по кривым охлаждения сплавов (рис. 1.7). В отличие от чистых металлов сплавы кристаллизуются не при постоянной температуре, а в интервале температур. Поэтому на кривых охлаждения сплавов имеются две критические точки. В верхней критической точке, называемой точкой *ликвидус* (t_L), начинается кристаллизация. В нижней критической точке, которая называется точкой *солидус* (t_C), кристаллизация завершается. Кривая охлаждения механической смеси (рис. 1.7, а) отличается от кривой охлаждения твердого раствора (рис. 1.7, б) наличием горизонтального участка.

На этом участке происходит кристаллизация эвтектики. Эвтектикой называют механическую смесь двух фаз, одновременно кристаллизовавшихся из жидкого сплава. Эвтектика имеет определенный химический состав и образуется при постоянной

температуре. Диаграмму состояния строят в координатах: температура – концентрация. Линии диаграммы разграничивают области одинаковых фазовых состояний. Вид диаграммы зависит от того, как взаимодействуют между собой компоненты. Для построения диаграммы состояния используют большое количество кривых охлаждения для сплавов различных концентраций.

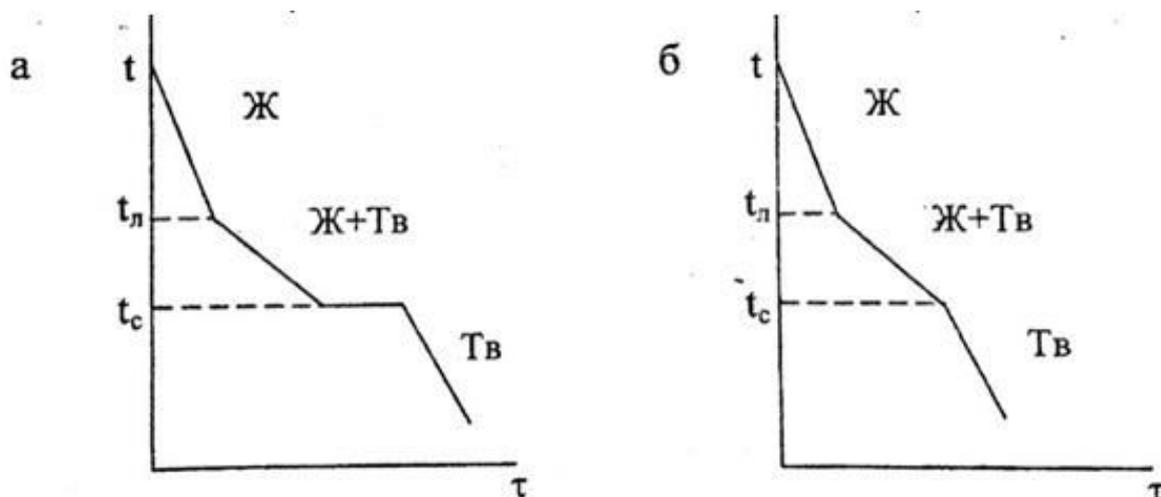


Рис. 1.7. Кривые охлаждения сплавов:
а - механической смеси; б - твердого раствора

При построении диаграммы критические точки переносятся с кривых охлаждения на диаграмму и соединяются линией (рис. 1.8). В получившихся на диаграмме областях записывают фазы или структурные составляющие. Линия диаграммы, на которой при охлаждении начинается кристаллизация сплава называется *линией ликвидус*, а линия, на которой кристаллизация заканчивается – *линией солидус*.

Виды диаграмм состояния. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси (рис. 1.8), характеризуется отсутствием растворения компонентов в твердом состоянии. Поэтому в этом сплаве возможно образование трех фаз: жидкого сплава Ж, кристаллов А и кристаллов В. Линия АСВ диаграммы является линией ликвидус: на участке АС при охлаждении начинается кристаллизация компонента А, а на участке СВ- компонента В. Линия DCE является линией солидус, на ней завершается кристаллизация А или В и при постоянной температуре происходит кристаллизация эвтектики Э. Сплавы, концентрация которых соответствует точке С диаграммы, называются эвтектическими, их структура представляет собой чистую

эвтектику. Сплавы, расположенные на диаграмме левее эвтектического, называются доэвтектическими, их структура состоит из зерен А и эвтектики. Те сплавы, которые на диаграмме расположены правее эвтектического, называются заэвтектическими, их структура представляет собой зерна В, окруженные эвтектикой.

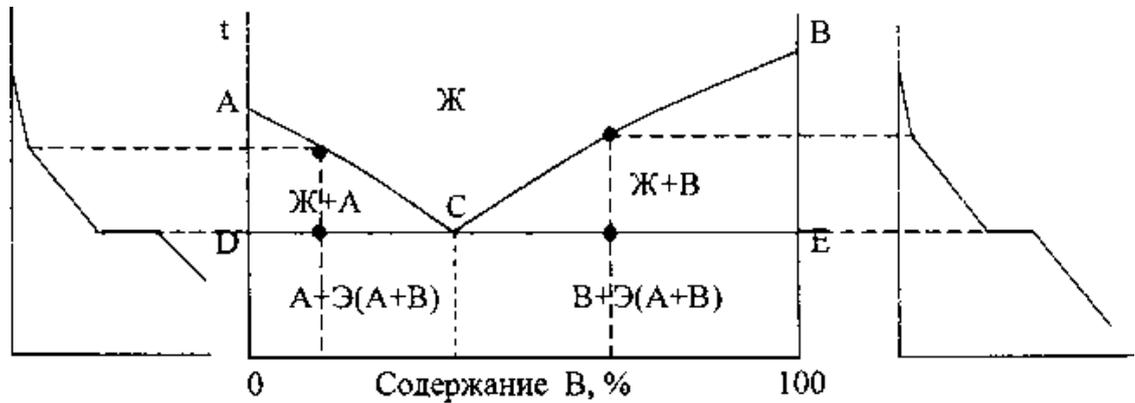


Рис. 1.8. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси, и ее построение по кривым охлаждения

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии изображена на рис. 1.9. Для этого сплава возможно образование двух фаз: жидкого сплава и твердого раствора α . На диаграмме имеется всего две линии, верхняя является линией ликвидус, а нижняя - линией солидус.

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии показана на рис. 1.10. В этом сплаве могут существовать три фазы – жидкий сплав, твердый раствор α компонента В в компоненте А и твердый раствор β компонента А в компоненте В. Данная диаграмма содержит в себе элементы двух предыдущих. Линия АСВ является линией ликвидус, линия АDСЕВ – линией солидус. Здесь также образуется эвтектика, имеются эвтектический, доэвтектический и заэвтектический сплавы. По линиям FD и EG происходит выделение вторичных кристаллов α_{II} и β_{II} (вследствие уменьшения растворимости с понижением температуры). Процесс выделения вторичных кристаллов из твердой фазы называется вторичной кристаллизацией.

Диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение (рис. 1.11), характеризуется наличием вертикальной линии, соответствующей соотношению компонентов в химическом соединении A_mB_n . Эта линия делит диаграмму на две части, которые можно рассматривать как самостоятельные диаграммы сплавов, образуемых

одним из компонентов с химическим соединением. На рис. 1.11 изображена диаграмма для случая, когда каждый из компонентов образует с химическим соединением механическую смесь.



Рис. 1.9. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью

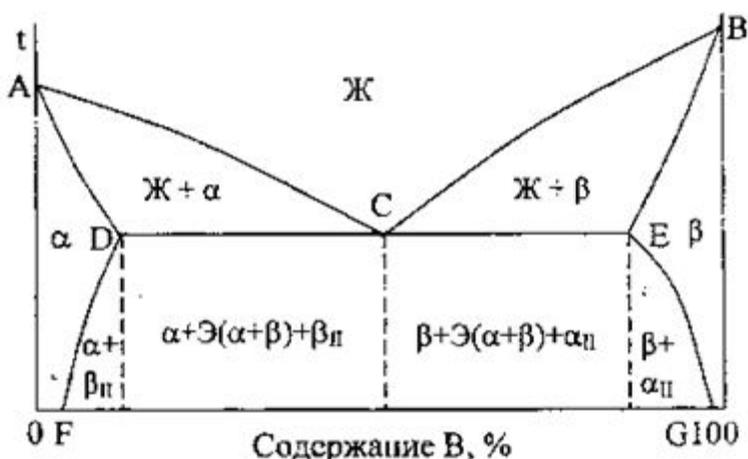


Рис. 1.10. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

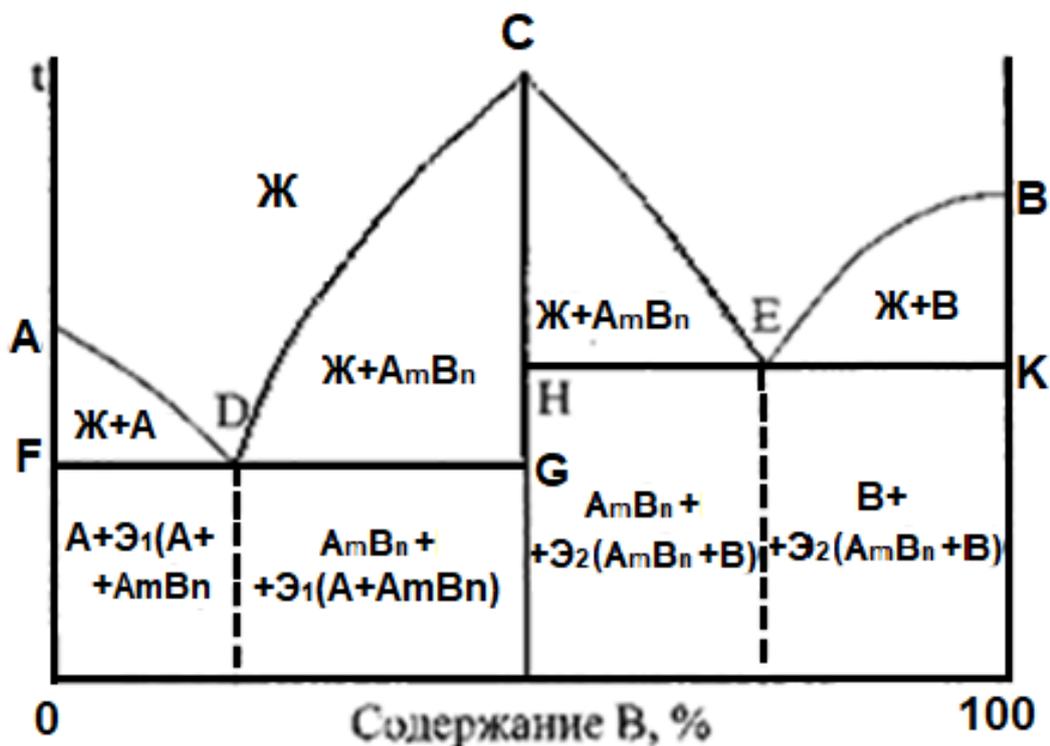


Рис. 1.11. Диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение

1.3. Механические свойства материалов

Механические свойства характеризуют способность материалов сопротивляться действию внешних сил. К основным механическим свойствам относятся прочность, твердость, ударная вязкость, упругость, пластичность, хрупкость и др.

Прочность – это способность материала сопротивляться разрушающему воздействию внешних сил.

Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела под действием нагрузки.

Вязкостью называется свойство материала сопротивляться разрушению под действием динамических нагрузок.

Упругость – это свойство материалов восстанавливать свои размеры и форму после прекращения действия нагрузки.

Пластичностью называется способность материалов изменять свои размеры и форму под действием внешних сил, не разрушаясь при этом.

Хрупкость – это свойство материалов разрушаться под действием внешних сил без остаточных деформаций.

При статических испытаниях на растяжение определяют величины, характеризующие прочность, пластичность и упругость материала. Испытания производятся на цилиндрических (или плоских) образцах с определенным соотношением между длиной l_0 и диаметром d_0 . Образец растягивается под действием приложенной силы P (рис.1.12, а) до разрушения.

Внешняя нагрузка вызывает в образце напряжение и деформацию. Напряжение σ — это отношение силы P к площади поперечного сечения F , МПа:

$$\sigma = \frac{P}{F} .$$

Деформация характеризует изменение размеров образца под действием нагрузки, %:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где l – длина растянутого образца. Деформация может быть упругой (исчезающей после снятия нагрузки) и пластической (остающейся после снятия нагрузки).

При испытаниях строится диаграмма растяжения, представляющая собой зависимость напряжения от деформации. На рис. 1.12, б приведена такая диаграмма для низкоуглеродистой стали. После проведения испытаний определяются следующие характеристики механических свойств:

Предел упругости σ_y — это максимальное напряжение, при котором в образце не возникают пластические деформации;

Предел текучести σ_T — это напряжение, соответствующее площадке текучести на диаграмме растяжения (рис. 1.12 б). Если на диаграмме нет площадки текучести, то определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ — напряжение, вызывающее пластическую деформацию, равную 0,2 %.

Предел прочности (или временное сопротивление) σ_B — это напряжение, отвечающее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец при испытании.

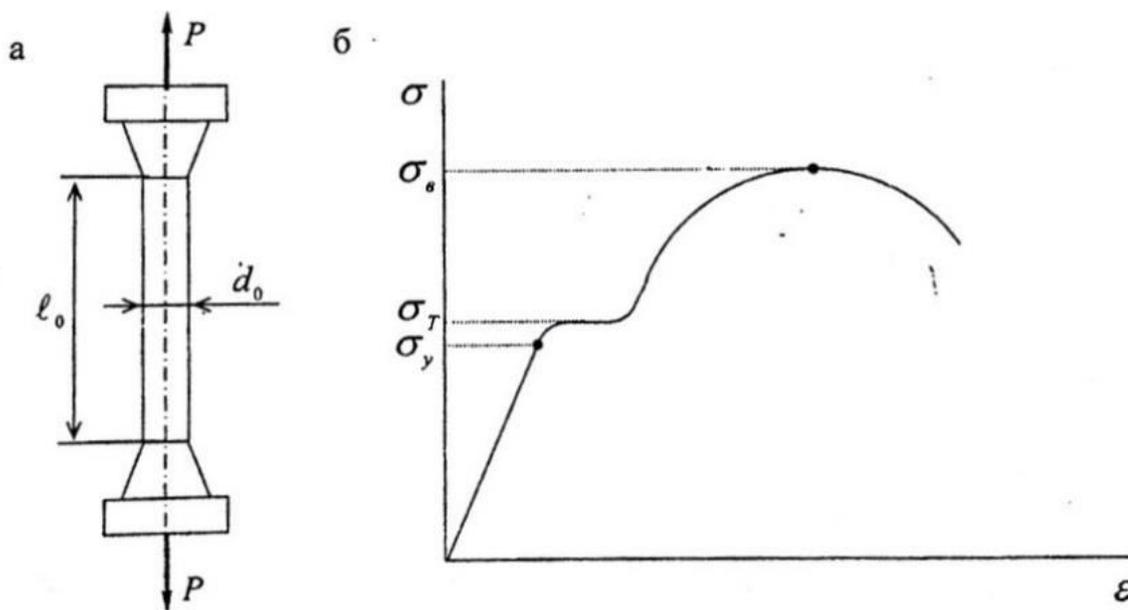


Рис. 1.12. Статические испытания на растяжение:
а- схема испытания; б- диаграмма растяжения

Относительное удлинение после разрыва δ - отношение приращения длины образца при растяжении к начальной длине l_0 , %:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100,$$

где l_k - длина образца после разрыва.

Относительным сужением после разрыва ψ называется уменьшение площади поперечного сечения образца, отнесенное к начальному сечению образца, %:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100,$$

где F_k - площадь поперечного сечения образца в месте разрыва. Относительное удлинение и относительное сужение характеризуют пластичность материала.

Твердость металлов измеряется путем вдавливания в испытуемый образец твердого наконечника различной формы.

Метод Бринелля основан на вдавливании в поверхность металла стального закаленного шарика под действием определенной нагрузки. После снятия нагрузки в образце остается отпечаток. Число твердости по Бринеллю НВ определяется отношением нагрузки, действующей на шарик, к площади поверхности полученного отпечатка.

Метод Роквелла основан на вдавливании в испытуемый образец закаленного стального шарика диаметром 1,588 мм (шкала В) или алмазного конуса с углом при вершине 120° (шкалы А и С). Вдавливание производится под действием двух нагрузок – предварительной, равной 100 Н, и окончательной, равной 600, 1000, 1500 Н для шкал А, В и С соответственно. Число твердости по Роквеллу НРА, НРВ и НРС определяется по разности показателей глубины вдавливания.

В методе Виккерса применяют вдавливание алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136° . Число твердости по Виккерсу НV определяется отношением приложенной нагрузки к площади поверхности отпечатка.

Ударная вязкость определяется работой A , затраченной на разрушение образца, отнесенной к площади его поперечного сечения F ; Дж/м²:

$$KC = \frac{A}{F}.$$

Испытания проводятся ударом специального маятникового копра. Для испытания применяется стандартный надрезанный образец, устанавливаемый на опорах копра. Маятник определенной массы наносит удар по стороне противоположной надрезу.

2. СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ

2.1. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов дает представление о строении основных конструкционных сплавов – сталей и чугунов.

Компоненты, фазы и структурные составляющие сплавов железа с углеродом. Железо – пластичный металл серебристо-белого цвета с невысокой твердостью (НВ 80). Температура плавления - 1539°C, плотность 7,83 г/см³. Имеет полиморфные модификации (см. раздел 1.1.). С углеродом железо образует химическое соединение и твердые растворы.

Цементит – это химическое соединение железа с углеродом (карбид железа) Fe_3C . В нем содержится 6,67 % углерода (по массе). Имеет сложную ромбическую кристаллическую решетку. Характеризуется очень высокой твердостью (НВ ~ 800), крайне низкой пластичностью и хрупкостью.

Ферритом называется твердый раствор углерода в α - железе. Содержание углерода в феррите очень невелико – максимальное – 0,02 % при температуре 727°C. Благодаря столь малому содержанию углерода свойства феррита совпадают со свойствами железа (низкая твердость и высокая пластичность). Твердый раствор углерода в высокотемпературной модификации Fe_α (т.е. в Fe_δ) часто называют δ - ферритом или высокотемпературным ферритом.

Аустенит – это твердый раствор углерода в γ - железе. Максимальное содержание углерода в аустените составляет 2,14 % (при температуре 1147°C). Имеет твердость НВ ~ 220.

Перлит – это механическая смесь феррита с цементитом. Содержит 0,8% углерода, образуется из аустенита при температуре 727°C. Имеет пластинчатое строение, т.е. его зерна состоят из чередующихся пластинок феррита и цементита. Перлит является эвтектоидом. **Эвтектоид** – это механическая смесь двух фаз, образующаяся из твердого раствора (а не из жидкого сплава, как эвтектика).

Ледебурит представляет собой эвтектическую смесь аустенита с цементитом. Содержит 4,3 % углерода, образуется из жидкого сплава при температуре 1147°C. Аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит, и ниже этой температуры ледебурит представляет собой механическую смесь перлита с цементитом. Чтобы различать ледебурит с различной структурой, целесообразно ледебурит, существующий при температуре выше 727°C, называть *ледебурит 1*, а ниже – *ледебурит 2*.

Фаза цементита имеет пять структурных форм: цементит первичный, образующийся из жидкого сплава; цементит вторичный, образующийся из аустенита; цементит третичный, образующийся из феррита; цементит ледебурита; цементит перлита.

Диаграмма $Fe - Fe_3C$. На рис. 2.1 приведена диаграмма состояния сплавов железа с цементитом. На горизонтальной оси концентраций отложено содержание углерода от 0 до 6,67 %. Левая вертикальная ось соответствует 100 % содержанию железа. На ней отложены температура плавления железа и температуры его полиморфных превращений. Правая вертикальная ось (6,67 % углерода) соответствует 100 % содержанию цементита. Буквенное обозначение точек диаграммы принято согласно международному стандарту и изменению не подлежит. Линия ABCD диаграммы является линией ликвидус. На ней начинается кристаллизация: на участке АВ – феррита, ВС - аустенита и CD – первичного цементита. Линия ANJESF является линией солидус диаграммы.

Железоуглеродистые сплавы в зависимости от содержания углерода делятся на техническое железо (до 0,02 % С), сталь (от 0,02 до 2,14 % С) и чугун (от 2,14 до 6,67 %С). Сталь, содержащая до 0,8% С, называется доэвтектоидной, 0,8 % С – эвтектоидной и свыше 0,8 % С – заэвтектоидной. Чугун, содержащий от 2,14 до 4,3 % С, называется доэвтектическим, ровно 4,3 % - эвтектическим и от 4,3 до 6,67 % С – заэвтектическим.

Структура технического железа представляет собой зерна феррита или феррит с небольшим количеством третичного цементита. Обязательной структурной составляющей стали является перлит. Структура доэвтектоидной стали состоит из равномерно распределенных зерен феррита и перлита. Эвтектоидная сталь состоит только из перлита. Структура заэвтектоидной стали представляет собой зерна перлита, окруженные сплошной или прерывистой сеткой вторичного цементита. Для чугуна характерно наличие ледебурита в структуре. Структура доэвтектического чугуна состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита, эвтектического – из ледебурита и заэвтектического – из ледебурита и первичного цементита.

Значение диаграммы железо – цементит состоит в том, что она позволяет объяснить зависимость структуры и, соответственно, свойств сталей и чугунов от содержания углерода и определить режимы термической обработки для изменения свойств сталей. Сталью называется сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится не более 2,14 %. Это теоретическое определение. На практике в сталях, как правило, не содержится углерода более 1,5 %.

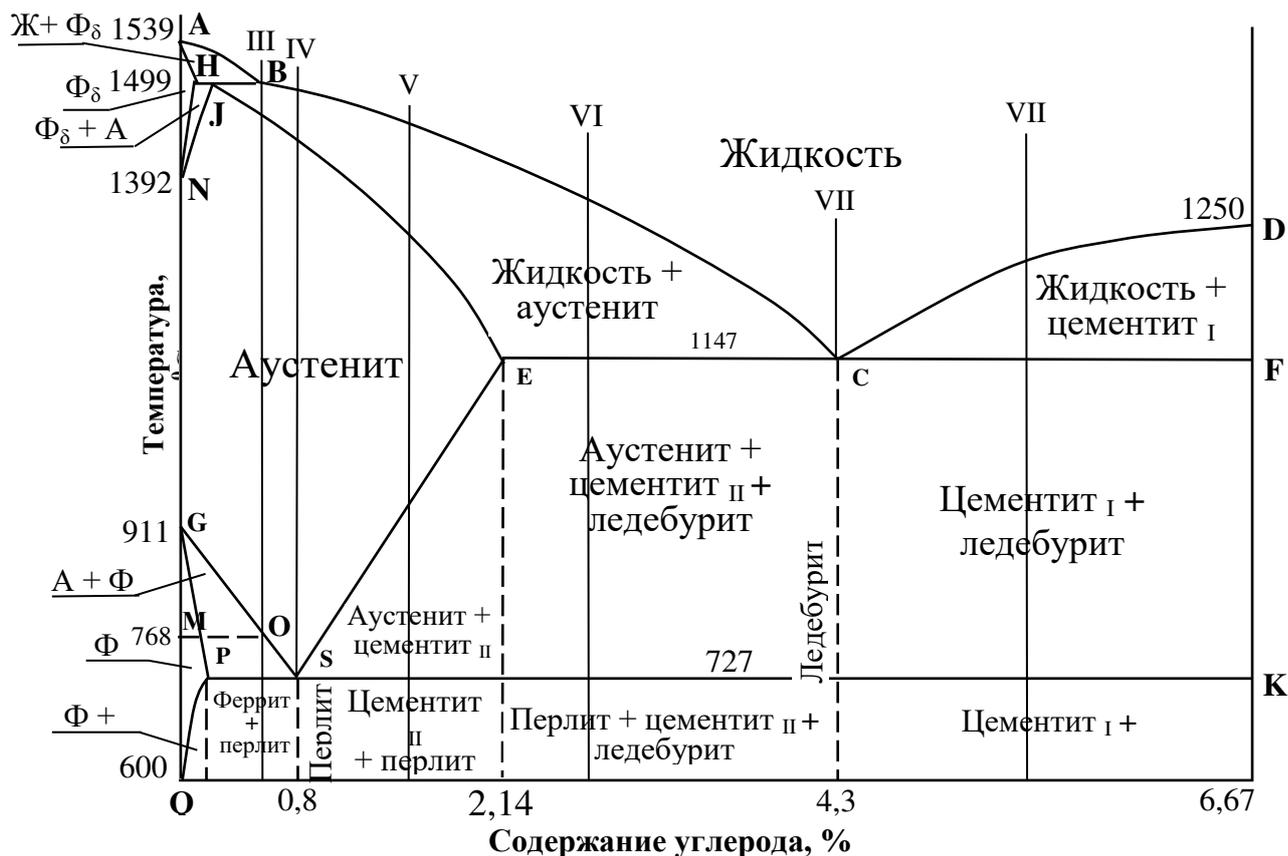


Рис. 2.1. Диаграмма состояния сплава железа с цементитом

2.2. Стали

Сталью называется сплав железа с углеродом, в котором углерода содержится не более 2,14 %. Это теоретическое определение. На практике в сталях, как правило, не содержится углерода более 1,5 %.

Влияние углерода и примесей на свойства стали. Углерод существенно влияет на свойства стали даже при незначительном изменении его содержания. В стали имеются две фазы – феррит и цементит (частично в виде перлита). Количество цементита возрастает прямо пропорционально содержанию углерода. Как уже говорилось,

феррит характеризуется высокой пластичностью и низкой твердостью, а цементит, напротив, очень низкой пластичностью и высокой твердостью. Поэтому с повышением содержания углерода до 1,2 % снижаются пластичность и вязкость стали, повышаются твердость и прочность.

Повышение содержания углерода влияет и на технологические свойства стали. Ковкость, свариваемость и обрабатываемость резанием ухудшаются, но литейные свойства улучшаются.

Кроме железа и углерода, в стали всегда присутствуют постоянные примеси. Наличие примесей объясняется технологическими особенностями производства стали (марганец, кремний) и невозможностью полного удаления примесей, попавших в сталь из железной руды (сера, фосфор, кислород, водород, азот). Возможны также случайные примеси (хром, никель, медь и др.).

Марганец и кремний вводят в любую сталь для раскисления, т.е. для удаления вредных примесей оксида железа FeO. Марганец также устраняет вредные сернистые соединения железа. При этом содержание марганца обычно не превышает 0,8 %, а кремния – 0,4 %. Марганец повышает прочность, а кремний упругость стали.

Фосфор растворяется в феррите, сильно искажает кристаллическую решетку, снижая при этом пластичность и вязкость, но повышая прочность. Вредное влияние фосфора заключается в том, что он сильно повышает температуру перехода стали в хрупкое состояние, т.е. вызывает ее хладноломкость. Вредность фосфора усугубляется тем, что он может распределяться в стали неравномерно. Поэтому содержание фосфора в стали ограничивается величиной 0,045 %.

Сера также является вредной примесью. Она не растворима в железе и образует с ним сульфид железа FeS, который образует с железом легкоплавкую эвтектику. Эвтектика располагается по границам зерен и делает сталь хрупкой при высоких температурах. Это явление называется красноломкостью. Количество серы в стали ограничивается 0,055 %.

Водород, азот и кислород содержатся в стали в небольших количествах. Они являются вредными примесями, ухудшающими свойства стали.

Классификация сталей. По химическому составу стали могут быть углеродистыми, содержащими железо, углерод и примеси, и легированными, содержащими дополнительно легирующие элементы, введенные в сталь с целью изменения ее свойств.

По содержанию углерода стали делятся на низкоуглеродистые (до 0,25 % C), среднеуглеродистые (0,25 – 0,7 % C) и высокоуглеродистые (более 0,7 % C).

По назначению различают стали конструкционные, идущие на изготовление деталей машин, конструкций и сооружений,

инструментальные, идущие на изготовление различного инструмента, а также стали специального назначения с особыми свойствами: нержавеющей, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, с особыми электрическими и магнитными свойствами и др.

Различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. Качество стали характеризуется совокупностью свойств, определяемых процессом производства, химическим составом, содержанием газов и вредных примесей (серы и фосфора). Стали обыкновенного качества должны содержать не более 0,045 % P и 0,055 % S, качественные – не более 0,035 % P и 0,04 % S и особо высококачественные – не более 0,025 % P и 0,015 % S. Углеродистые конструкционные стали могут быть только обыкновенного качества и качественными.

Углеродистые стали обыкновенного качества предназначены для изготовления неотчетственных строительных конструкций, крепежных деталей, листов, труб, заклепок, рельсов, валов, фланцев, кулачков и т.д. Конструкционную углеродистую сталь обыкновенного качества производят в соответствии с ГОСТ 380-94.

Углеродистые стали обыкновенного качества маркируются буквами Ст, что означает сталь, и цифрами, обозначающими порядковый номер марки. Выпускается семь марок этих сталей: Ст0, Ст1, Ст2, ... , Ст6. Чем выше номер марки, тем больше содержание углерода и, соответственно, выше прочность и ниже пластичность. Для обозначения способа раскисления в марки добавляют индексы: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная. Марки сталей с повышенным содержанием марганца содержат букву Г. Химический анализ стали должен соответствовать нормам, указанным в табл. 2.1. Во всех сталях, кроме Ст0, содержание серы не должно превышать 0,05 %, а фосфора – 0,04 %. В стали Ст0 серы должно быть не более 0,06 %, фосфора – 0,07 %.

Таблица 2.1

Химический состав углеродистой стали обыкновенного качества

Марка стали	Содержание углерода, %	Содержание марганца, %	Содержание кремния, %
1	2	3	4
Ст0	Не более 0,23	-	-
Ст1кп	0,06-0,12	0,25-0,50	не более 0,05
Ст1пс	0,06-0,12	0,25-0,50	0,05-0,15
Ст1сп	0,06-0,12	0,25-0,50	0,15-0,30
Ст2кп	0,09-0,15	0,25-0,50	не более 0,05
Ст2пс	0,09-0,15	0,25-0,50	0,05-0,15
Ст2сп	0,09-0,15	0,25-0,50	0,15-0,30

Ст3кп	0,14-0,22	0,30-0,60	не более 0,05
Ст3пс	0,14-0,22	0,40-0,65	0,05-0,15
Ст3сп	0,14-0,22	0,40-0,65	0,15-0,30
Ст3Гпс	0,14-0,22	0,80-1,10	не более 0,15
Ст3Гсп	0,14-0,22	0,80-1,10	0,15-0,30
Ст4кп	0,18-0,27	0,40-0,70	не более 0,05
Ст4пс	0,18-0,27	0,40-0,70	0,05-0,15

Окончание табл. 2.1

1	2	3	4
Ст4сп	0,18-0,27	0,40-0,70	0,15-0,30
Ст5пс	0,18-0,37	0,50-0,80	0,05-0,15
Ст5сп	0,18-0,37	0,50-0,80	0,15-0,30
Ст5Гпс	0,22-0,30	0,80-1,20	не более 0,15
Ст6пс	0,38-0,49	0,50-0,80	0,05-0,15
Ст6сп	0,38-0,49	0,50-0,80	0,15-0,30

Область применения конструкционной углеродистой стали обыкновенного качества: Ст6 – рельсы, бандажи, кулачки, Ст5- валы, оси, клинья, Ст4 – звездочки, зубчатые колеса, фланцы, Ст3 – листы, Ст2 – листы, проволока, Ст1 – болты, винты, заклепки.

Качественные конструкционные углеродистые стали маркируются цифрами 08, 10, 15, 20, 25, ..., 85, которые обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Эти стали отличаются от сталей обыкновенного качества большей прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Если для сталей обыкновенного качества максимальная прочность составляет 700 МПа, то для качественной она достигает 1100 МПа. Более подробно они будут рассмотрены совместно с конструкционными легированными сталями (см. раздел 4.1.).

2.3. Чугуны

Чугуном называют сплав железа с углеродом, содержащий от 2,14 до 6,67 % углерода. Но это теоретическое определение. На практике содержание углерода в чугунах находится в пределах 2,5 – 4,5 %. В качестве примесей чугуны содержат Si, Mn и P.

Классификация чугунов. В зависимости от того, в какой форме содержится углерод в чугунах, различают следующие их виды. В белом чугуне весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Структура белого чугуна соответствует диаграмме Fe – Fe₃C. В сером

чугуне большая часть углерода находится в виде графита, включения которого имеют пластинчатую форму. В высокопрочном чугуне графитные включения имеют шаровидную форму, а в ковком-хлопьевидную. Содержание углерода в виде цементита в сером, высокопрочном и ковком чугунах может составлять не более 0,8 %.

Белый чугун обладает высокой твердостью, хрупкостью и очень плохо обрабатывается. Поэтому для изготовления изделий он не используется и применяется в основном как передельный чугун, т.е. идет на производство стали. Для деталей с высокой износостойкостью используется чугун с отбеленной поверхностью, в котором основная масса металла имеет структуру серого чугуна, а поверхностный слой – белого чугуна. Машиностроительными чугунами, идущими на изготовление деталей, являются серый, высокопрочный и ковкий чугуны. Детали из них изготавливаются литьем, так как чугуны имеют очень хорошие литейные свойства. Благодаря графитным включениям эти чугуны хорошо обрабатываются, имеют высокую износостойкость, гасят колебания и вибрации. Но графитные включения уменьшают прочность.

Таким образом, структура машиностроительных чугунов состоит из металлической основы и графитных включений. По металлической основе они классифицируются на ферритный чугун (весь углерод содержится в виде графита), феррито-перлитный и перлитный (содержит 0,8 % углерода в виде цементита). Характер металлической основы влияет на механические свойства чугунов: прочность и твердость выше у перлитных, а пластичность – у ферритных.

Серый чугун имеет пластинчатые графитные включения. Структура серого чугуна схематически изображена на рис. 2.2, а. Получают серый чугун путем первичной кристаллизации из жидкого сплава. На графитизацию (процесс выделения графита) влияют скорость охлаждения и химический состав чугуна. При быстром охлаждении графитизации не происходит и получается белый чугун. По мере уменьшения скорости охлаждения получают, соответственно, перлитный, феррито-перлитный и ферритный серые чугуны. Способствуют графитизации углерод и кремний. Кремния содержится в чугуне от 0,5 до 5 %. Иногда его вводят специально. Марганец и сера препятствуют графитизации. Кроме того, сера ухудшает механические и литейные свойства. Фосфор не влияет на графитизацию, но улучшает литейные свойства.

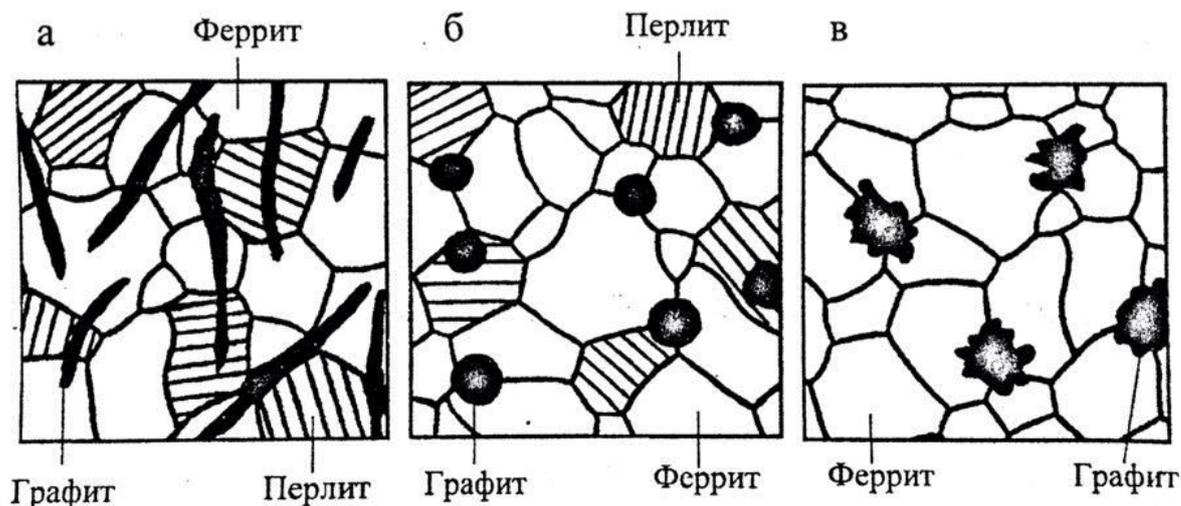


Рис. 2.2. Схематическое изображение структур чугунов:
а – серого; б – высокопрочного; в – ковкого

Механические свойства серого чугуна зависят от количества и размера графитных включений. По сравнению с металлической основой графит имеет низкую прочность. Поэтому графитные включения можно считать нарушениями сплошности, ослабляющими металлическую основу. Так как пластинчатые включения наиболее сильно ослабляют металлическую основу, серый чугун имеет более низкие характеристики как прочности, так и пластичности среди всех машиностроительных чугунов. Уменьшение размера графитных включений улучшает механические свойства чугуна. Измельчению графитных включений способствует кремний.

Маркируется серый чугун буквами СЧ и числом, показывающим предел прочности в десятых долях мегапаскаля. Так, чугун СЧ 35 имеет $\sigma_B = 350$ МПа. Существуют следующие марки серых чугунов СЧ 10, СЧ 15, СЧ 20, ... , СЧ 45.

Высокопрочный чугун имеет шаровидные графитные включения. Структура высокопрочного чугуна изображена на рис. 2.2, б. Получают высокопрочный чугун добавкой в жидкий чугун небольшого количества щелочных или щелочноземельных металлов, которые округляют графитные включения в чугуне, что объясняется увеличением поверхностного натяжения графита. Чаще всего для этой цели применяют магний в количестве 0,03 – 0,07 %. По содержанию других элементов высокопрочный чугун не отличается от серого.

Шаровидные графитные включения в наименьшей степени ослабляют металлическую основу. Именно поэтому высокопрочный чугун имеет более высокие механические свойства, чем серый. При этом он сохраняет хорошие литейные свойства, обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации и т.д.

Маркируется высокопрочный чугун буквами ВЧ и цифрами, показывающими предел прочности в десятых долях мегапаскаля. Например, чугун ВЧ 60 имеет $\sigma_b = 600$ МПа. Существуют следующие марки высокопрочных чугунов ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100. Применяются высокопрочные чугуны для изготовления ответственных деталей – зубчатых колес, валов и др.

Ковкий чугун имеет хлопьевидные графитные включения (рис. 2.2, в). Его получают из белого чугуна путем графитизирующего отжига, который заключается в длительной (до двух суток) выдержке при температуре 950 - 970°C. Если после этого чугун охладить, то получается ковкий перлитный чугун, металлическая основа которого состоит из перлита и небольшого количества (до 20 %) феррита. Такой чугун называют также светлосердечным. Если в области эвтектоидного превращения (720 - 760°C) проводить очень медленное охлаждение или даже дать выдержку, то получится ковкий ферритный чугун, металлическая основа которого состоит из феррита и очень небольшого количества перлита (до 10 %). Этот чугун называют черносердечным, так как он содержит сравнительно много графита.

Маркируется ковкий чугун буквами КЧ и двумя числами, показывающими предел прочности в десятых долях мегапаскаля и относительное удлинение в %. Так чугун КЧ 45-7 имеет $\sigma_b = 450$ МПа и $\delta = 7$ %. Ферритные ковкие чугуны (КЧ 33-8, КЧ 37-12) имеют более высокую пластичность, а перлитные (КЧ 50-4, КЧ 60-3) - более высокую прочность. Применяют ковкий чугун для деталей небольшого сечения, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

3. ТЕРМИЧЕСКАЯ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры. Различают следующие виды термической обработки: отжиг, закалка и отпуск.

3.1. Отжиг стали

Отжигом стали называется вид термической обработки, заключающийся в ее нагреве до определенной температуры, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении. Цели отжига – снижение твердости и улучшение обрабатываемости стали, изменение формы и величины зерна, выравнивание химического состава, снятие внутренних напряжений. Существуют различные виды отжига: полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный, низкий, отжиг на

зернистый перлит, нормализация. Температуры нагрева стали для ряда видов отжига связаны с положением линий диаграммы Fe – Fe₃C. Низкая скорость охлаждения обычно достигается при остывании стали вместе с печью.

Полный отжиг применяется для доэвтектоидных сталей. Нагрев стали для полного отжига осуществляется на 30-50°С выше линии GS диаграммы Fe – Fe₃C (рис. 3.1). При этом происходит полная перекристаллизация стали и уменьшение величины зерна. Исходная структура из крупных зерен феррита и перлита при нагреве превращается в аустенитную, а затем при медленном охлаждении - в структуру из мелких зерен феррита и перлита. Повышение температуры нагрева привело бы к росту зерна. При полном отжиге снижается твердость и прочность стали, а пластичность повышается.

При неполном отжиге нагрев производится на 30-50°С выше линии PSK диаграммы Fe – Fe₃C (рис. 3.1). Он производится, если исходная структура не очень крупнозерниста или не надо изменить расположение ферритной (в доэвтектоидных сталях) или цементитной (в заэвтектоидных сталях) составляющей. При этом происходит лишь частичная перекристаллизация – только перлитной составляющей стали.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) заключается в нагреве стали до 1000 - 1100°С, длительной выдержке (10 – 15 часов) при этой температуре и последующем медленном охлаждении. В результате диффузионного отжига происходит выравнивание неоднородности стали по химическому составу. Благодаря высокой температуре нагрева и продолжительной выдержке получается крупнозернистая структура, которая может быть устранена последующим полным отжигом.

Рекристаллизационный отжиг предназначен для снятия наклепа и внутренних напряжений после холодной деформации и подготовки структуры к дальнейшему деформированию. Нагрев необходимо осуществлять выше температуры рекристаллизации, которая для железа составляет 450°С (см. раздел 1.1.). Обычно для повышения скорости рекристаллизационных процессов применяют значительно более высокие температуры, которые, однако, должны быть ниже линии PSK диаграммы Fe – Fe₃C. Поэтому температура нагрева для рекристаллизационного отжига составляет 650 - 700°С. В результате рекристаллизационного отжига образуется однородная мелкозернистая структура с небольшой твердостью и значительной вязкостью.

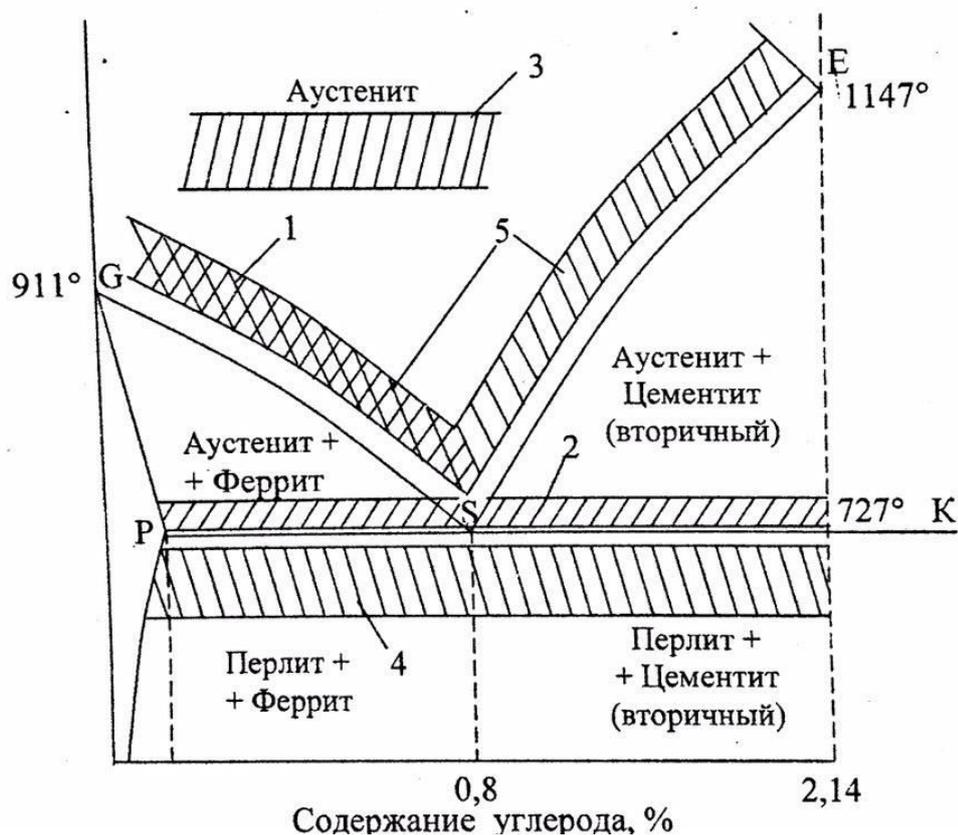


Рис. 3.1. Области температур нагрева для различных видов отжига: 1-полный отжиг; 2-неполный отжиг; 3-диффузионный отжиг; 4-рекристаллизационный отжиг; 5-нормализация

Низкий отжиг применяется в тех случаях, когда структура стали удовлетворительна и необходимо только снять внутренние напряжения, возникающие при кристаллизации или после механической обработки. В этом случае сталь нагревают значительно ниже линии PSK диаграммы Fe – Fe₃C (200-600°C).

Отжиг на зернистый перлит (сфероидизацию) применяют для сталей, близких к эвтектоидному составу или для заэвтектоидных. Такой отжиг осуществляется маятниковым способом (температуру несколько раз изменяют вблизи линии PSK, то повышая на 30-50°C, то снижая на 30-50°C) или путем длительной выдержки (5-6 часов) при температуре несколько ниже линии PSK и последующего медленного охлаждения. После такого отжига цементит, обычно присутствующий в структуре в виде пластин, приобретает зернистую форму. Сталь со структурой зернистого перлита обладает большей пластичностью, меньшей твердостью и прочностью по сравнению с пластинчатым перлитом. Отжиг на зернистый перлит применяется для подготовки сталей к закалке и для улучшения их обрабатываемости резанием.

Нормализация состоит из нагрева стали на 30-50°C выше линии GSE диаграммы Fe – Fe₃C (рис. 3.1), выдержки при этой температуре и последующего охлаждения на воздухе. Более быстрое охлаждение по

сравнению с обычным отжигом приводит к более мелкозернистой структуре. Нормализация - более дешевая термическая операция, чем отжиг, так как печи используют только для нагрева и выдержки. Для низкоуглеродистых сталей (до 0,3 % С) разница в свойствах между нормализованным и отожженным состоянием практически отсутствует, и эти стали лучше подвергать нормализации. При большем содержании углерода нормализованная сталь обладает большей твердостью и меньшей вязкостью, чем отожженная. Иногда нормализацию считают самостоятельной разновидностью термической обработки, а не видом отжига.

3.2. Закалка и отпуск стали

Превращения в стали при охлаждении. При медленном охлаждении стали образуются структуры, соответствующие диаграмме Fe – Fe₃C. Вначале происходит выделение феррита (в доэвтектоидных сталях) или вторичного цементита (в заэвтектоидных сталях), а затем происходит превращение аустенита в перлит. Это превращение заключается в распаде аустенита на феррит, почти не содержащий углерода и цементит, содержащий 6,67 % С. Поэтому превращение сопровождается диффузией, перераспределением углерода. Диффузионные процессы происходят в течение некоторого времени, причем скорость диффузии резко падает с понижением температуры. Обычно изучают изотермическое превращение аустенита (происходящее во время выдержки при постоянной температуре) для эвтектоидной стали.

Влияние температуры на скорость и характер превращения представляют в виде диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 3.2). Диаграмма строится в координатах температура – логарифм времени. Выше температуры 727°С на диаграмме находится область устойчивого аустенита. Ниже этой температуры аустенит является неустойчивым (переохлажденным) и превращается в другие структуры. Левая С - образная кривая на диаграмме соответствует началу превращения аустенита, а правая – его завершению. При небольшом переохлаждении – приблизительно до 550°С - происходит упомянутое выше диффузионное перлитное превращение. В зависимости от степени переохлаждения образуются структуры, называемые *перлит*, *сорбит* и *троостит*. Это структуры одного типа – механические смеси феррита и цементита, имеющие пластинчатое строение. Различаются они лишь степенью дисперсности, т.е. толщиной пластинок феррита и цементита. Наиболее крупнодисперсная структура – перлит, наиболее мелкодисперсная – троостит.

При переохлаждении аустенита приблизительно ниже 240°С скорость диффузии падает почти до нуля и происходит

бездиффузионное мартенситное превращение. Образуется *мартенсит* – пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. Мартенсит имеет ту же концентрацию углерода, что и исходный аустенит. Из-за высокой пересыщенности углеродом решетка мартенсита сильно искажается, благодаря чему мартенсит имеет высокую твердость (до HRC 65). Горизонтальная линия M_H диаграммы соответствует началу превращения аустенита в мартенсит, а линия M_K - завершению этого процесса.

В диапазоне температур от мартенситного до перлитного превращения происходит промежуточное превращение и образуется структура, называемая *бейнит*.

Диаграмма изотермического превращения аустенита может быть использована при рассмотрении превращений аустенита не только при изотермической выдержке, но и при непрерывном охлаждении. В зависимости от скорости охлаждения будут образовываться различные структуры. При очень медленном охлаждении со скоростью V_1 образуется перлит. По мере повышения скорости охлаждения будут получаться сорбит (V_2) и троостит (V_3). Бейнит при непрерывном охлаждении обычно не образуется. При скорости V_4 образуется смесь троостита и мартенсита. При очень быстром охлаждении со скоростью выше критической $V_{кр}$ образуется мартенсит. Критическая скорость – это минимальная скорость охлаждения, при которой образуется мартенсит.

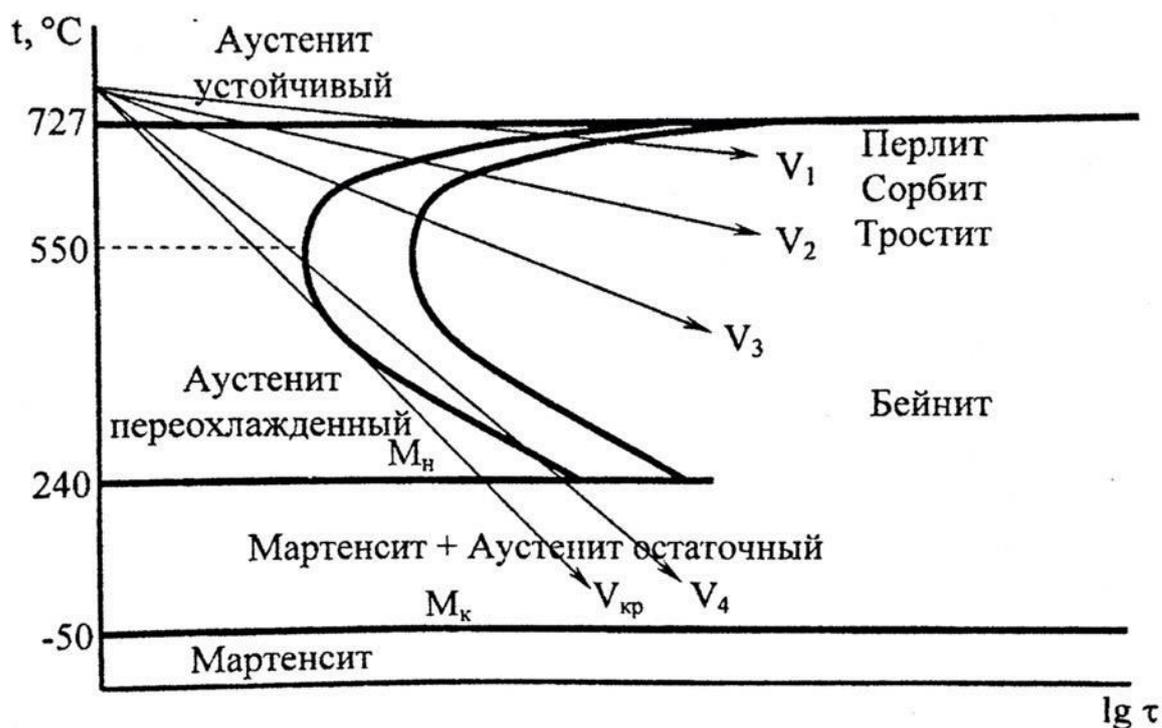


Рис 3.2. Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали (схема)

Закалка – это вид термической обработки, состоящей в нагреве стали до определенной температуры, выдержке и последующем быстром охлаждении. В результате закалки повышается твердость и прочность, но снижается вязкость и пластичность. Нагрев стали производится на 30-50°С выше линии GSK диаграммы Fe – Fe₃C. В доэвтектоидных сталях нагрев выше линии GS необходим для того, чтобы после закалки в структуре не было мягких ферритных включений. Для заэвтектоидных сталей применяется нагрев выше линии SK, так как присутствие цементита не снижает твердость стали.

Обычно в результате закалки образуется мартенситная структура. Поэтому охлаждать сталь следует со скоростью выше критической $V_{кр}$, чтобы кривая охлаждения не пересекла C – образные кривые диаграммы изотермического превращения аустенита (рис. 3.2). Для достижения высокой скорости охлаждения закаливаемые детали погружают в воду (для углеродистых сталей) или минеральные масла (для легированных сталей).

Способность стали закаливаться на мартенсит называется *закаливаемостью*. Она характеризуется значением твердости, приобретаемой сталью после закалки, и зависит от содержания углерода. Стали с низким содержанием углерода (до 0,3 %) практически не закаливаются и закалка для них не применяется.

Прокаливаемостью называется глубина проникновения закаленной зоны. Отсутствие сквозной прокаливаемости объясняется тем, что при охлаждении сердцевина остывает медленнее, чем поверхность. Прокаливаемость характеризуется критическим диаметром $D_{кр}$, т.е. максимальным диаметром детали цилиндрического сечения, которая прокаливается насквозь в данном охладителе.

По способу охлаждения различают следующие виды закалки: в одной среде, в двух средах (прерывистая), ступенчатую и изотермическую. Закалка в одной среде применяется чаще для изделий несложной формы. Недостаток закалки в одной среде – возникновение значительных внутренних напряжений. При прерывистой закалке изделие охлаждают, сначала в одной среде (например в воде до 300 - 400°С), а затем в масле или на воздухе. При этом внутренние напряжения меньше. Ступенчатую закалку производят путем быстрого охлаждения в соляной ванне, температура которой составляет 300-350°С, затем дают выдержку при данной температуре и окончательно охлаждают на воздухе. Короткая остановка при охлаждении способствует выравниванию температуры по всему сечению детали, что уменьшает напряжения, возникающие в процессе закалки. При изотермической закалке, как и при ступенчатой, детали переохлаждают

в среде, нагретой выше температуры начала мартенситного превращения, однако выдержка при этой температуре продолжительная – до полного распада аустенита. Получается структура не мартенсита, а близкого по твердости, но более пластичного бейнита.

Отпуск стали – это вид термической обработки, следующий за закалкой и заключающийся в нагреве стали до определенной температуры (ниже линии PSK), выдержке и охлаждении. Цель отпуска – получение более равновесной по сравнению с мартенситом структуры, снятие внутренних напряжений, повышение вязкости и пластичности. Различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск проводится при температуре 150-200°C. В результате снимаются внутренние напряжения, происходит некоторое увеличение пластичности и вязкости без заметного снижения твердости. Устраняется остаточный аустенит, и образуется структура мартенсит отпуска. Низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент, а также детали, которые должны обладать высокой твердостью и износостойкостью.

При среднем отпуске производится нагрев до 350-450°C. При этом происходит некоторое снижение твердости при значительном увеличении предела упругости и улучшении сопротивляемости действию ударных нагрузок. Структура стали представляет собой троостит отпуска, который имеет зернистое, а не пластинчатое строение. Применяется для пружин, рессор, ударного инструмента.

Высокий отпуск проводится при 550-650°C. В результате твердость и прочность снижаются значительно, но сильно возрастают вязкость и пластичность и получается оптимальное для конструкционных сталей сочетание механических свойств. Структура стали – сорбит отпуска с зернистым строением цементита. Применяется для деталей, подвергающихся действию высоких нагрузок. Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется *улучшением*. Она является основным видом обработки конструкционных сталей.

3.3. Химико-термическая обработка

Химико-термическая обработка – это процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхности стальных деталей за счет насыщения ее различными химическими элементами. При этом достигается значительное повышение твердости и износостойкости поверхности деталей при сохранении вязкой сердцевины. К видам химико-термической обработки относятся цементация, азотирование, цианирование и др.

Цементация – это процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом. Цементация производится путем нагрева

стальных деталей при 880-950°C в углеродосодержащей среде, называемой карбюризатором. Различают два основных вида цементации – газовую и твердую. Газовая цементация проводится в газе, содержащем углерод, например, метане CH_4 и оксиде углерода CO . Твердая цементация проводится в стальных ящиках, куда укладываются детали попеременно с карбюризатором. Карбюризатором служит порошок древесного угля с добавкой солей Na_2CO_3 или $BaCO_3$.

Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (0,1-0,3 %). В результате на поверхности концентрация углерода возрастает до 1,0-1,2 %. Толщина цементованного слоя составляет 1-2,5 мм.

Цементацией достигается только выгодное распределение углерода по сечению детали. Высокая твердость и износостойкость поверхности получается после закалки, которая обязательно проводится после цементации. Затем следует низкий отпуск. После этого твердость поверхности составляет приблизительно HRC 60.

Азотированием называется процесс насыщения поверхности стали азотом. При этом повышаются не только твердость и износостойкость, но и коррозионная стойкость. Проводится азотирование при температуре 500-600°C в среде аммиака NH_3 в течение длительного времени (до 60ч.). Аммиак при высокой температуре разлагается с образованием активного атомарного азота, который и взаимодействует с металлом. Твердость стали повышается за счет нитридов легирующих элементов. Поэтому азотированию подвергают только легированные стали. Наиболее сильно повышают твердость такие легирующие элементы, как хром, молибден, алюминий, ванадий. Глубина азотированного слоя составляет 0,3-0,6 мм, твердость поверхностного слоя по Виккерсу доходит до HV 1200 (при цементации HV 900).

К преимуществам азотирования перед цементацией следует отнести отсутствие необходимости в дополнительной термообработке, более высокую твердость и износостойкость, высокую коррозионную стойкость поверхности. Недостатками являются низкая скорость процесса и необходимость применения дорогих легированных сталей.

Цианирование (нитроцементация) – это процесс одновременного насыщения поверхности стали углеродом и азотом. Проводится цианирование в расплавах цианистых солей $NaCN$ или KCN или в газовой среде, содержащей смесь метана CH_4 и аммиака NH_3 . Различают низкотемпературное и высокотемпературное цианирование.

Низкотемпературное цианирование проводится при температуре 500-600°C. При этом преобладает насыщение азотом. Глубина цианированного слоя составляет 0,2 - 0,5 мм, твердость поверхности - HV 1000.

При высокотемпературном цианировании температура составляет 800-950°C. Преобладает насыщение углеродом. Глубина поверхностного

слоя составляет 0,6-2,0 мм. После высокотемпературного цианирования следует закалка с низким отпуском. Твердость после термообработки составляет HRC 60.

4. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Легированной называют сталь, содержащую специально введенные в нее с целью изменения строения и свойств легирующие элементы.

Легированные стали имеют целый ряд преимуществ перед углеродистыми. Они имеют более высокие механические свойства, прежде всего - прочность. Легированные стали обеспечивают большую прокаливаемость, а также возможность получения структуры мартенсита при закалке в масле, что уменьшает опасность появления трещин и коробления деталей. С помощью легирования можно придать стали различные специальные свойства (коррозионную стойкость, жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, магнитные и электрические свойства).

Классификация сталей по различным признакам была рассмотрена ранее (см. раздел 2.2). Отметим только, что стали обыкновенного качества могут быть только углеродистыми, т.е. легированные стали, как минимум, являются качественными.

Маркируются легированные стали с помощью цифр и букв, указывающих примерный химический состав стали. Первые цифры в марке показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Далее указывается содержание легирующих элементов. Каждый элемент обозначается своей буквой:

Н-никель, Г-марганец,	К-кобальт, Р -бор,
Ц- цирконий, Т-титан,	П- фосфор, Ф- ванадий,
Х-хром, Д-медь,	М-молибден, Б- ниобий,
С-кремний, А-азот,	В-вольфрам, Ю- алюминий.

Число, идущее после буквы, указывает примерное процентное содержание данного легирующего элемента. При содержании элемента менее 1 % число отсутствует. Например, сталь 12Х18Н10Т содержит приблизительно 0,12 % углерода, 18 % хрома, 10 % никеля, до 1,5 % титана.

Буква А в конце марки означает, что данная сталь является высококачественной. Для некоторых групп сталей применяют другую маркировку, которая будет указана при рассмотрении этих сталей.

4.1. Конструкционные стали

Конструкционные стали идут на изготовление деталей машин, конструкций и сооружений. Они должны обеспечивать длительную и

надежную работу деталей и конструкций в условиях эксплуатации. Поэтому основное требование к конструкционным сталям - комплекс высоких механических свойств.

Цементуемые стали содержат 0,1-0,3 % углерода. Они подвергаются цементации, закалке и низкому отпуску. После этой обработки твердость поверхности составляет HRC 60, а сердцевины - HRC 15-40. Упрочнение сердцевины в этих сталях тем сильнее, чем больше содержание легирующих элементов. В зависимости от степени упрочнения цементуемые стали можно разделить на три группы.

К сталям с неупрочняемой сердцевиной относятся углеродистые *цементуемые стали* 10, 15, 20. Их сердцевина имеет феррито-перлитную структуру. Эти стали имеют высокую износостойкость, но малую прочность ($\sigma_{\text{в}}=400-500$ МПа). Поэтому они применяются для малоответственных деталей небольших размеров.

К сталям со слабоупрочняемой сердцевиной относятся низколегированные стали 15X, 15XP, 20XH и др. Сердцевина имеет структуру бейнит. Эти стали имеют повышенную прочность ($\sigma_{\text{в}}=750-850$ МПа).

К сталям с сильноупрочняемой сердцевиной относятся стали 20XГР, 18XГТ, 30XГТ, 12XH3, 18X2H4B и др. Сердцевина имеет мартенситную структуру. Стали этой группы имеют высокую прочность ($\sigma_{\text{в}}=1200-1600$ МПа) и применяются для крупных деталей, испытывающих значительные нагрузки.

Улучшаемые стали содержат 0,3-0,5 % углерода и небольшое количество легирующих элементов (до 3-5 %). Эти стали подвергаются улучшению, состоящему из закалки в масле и высокого отпуска. После термообработки имеют структуру сорбита. Механические свойства разных марок улучшаемой стали в случае сквозной прокаливаемости близки ($\sigma_{\text{в}}=900-1200$ МПа). Поэтому прокаливаемость определяет выбор стали. Чем больше легирующих элементов, тем выше прокаливаемость. Следовательно, чем больше сечение детали, тем более легированную сталь следует использовать. По прокаливаемости улучшаемые стали могут быть условно разбиты на пять групп.

В первую группу входят *углеродистые стали* 35, 40, 45, имеющие критический диаметр $D_{\text{кр}} = 10$ мм (см. раздел 3.2.). Эти стали подвергаются нормализации вместо улучшения.

Ко второй группе относятся стали, *легированные хромом* 30X, 40X. Для них критический диаметр составляет $D_{\text{кр}} = 15 - 20$ мм.

Третью группу составляют *хромистые стали*, дополнительно легированные еще одним-двумя элементами (кроме никеля) 30XM, 40XГ, 30XГС и др. Для этих сталей $D_{\text{кр}} = 20 - 30$ мм.

Четвертая группа представлена *хромоникелевыми сталями*, содержащими около 1 % никеля: 40ХН, 40ХНМ и др. Их критический диаметр $D_{кр} = 40$ мм.

В пятую группу входят стали, *легированные рядом элементов*, причем содержание никеля доходит до 3-4 %: 38ХНЗ, 38ХНЗМФ ($D_{кр} = 100$ мм). Это лучшие марки улучшаемых сталей, хотя они сравнительно дороги.

Пружинные стали. В пружинах и рессорах используются только упругие свойства стали. Возникновение пластической деформации в них недопустимо, поэтому высоких требований к пластичности и вязкости не предъявляется. Основное требование к пружинной стали – высокий предел упругости σ_y (см. раздел 1.3). Хорошие упругие свойства стали достигаются при повышенном содержании углерода (0,5-0,7 %) и применении термообработки, состоящей из заковки и среднего отпуска при температуре 350-450°C. После такой термообработки сталь имеет трооститную структуру.

Углеродистые пружинные стали (65, 70, 75) вследствие низкой прокаливаемости используются для пружин небольшого сечения. Они могут работать при температуре до 100°C. Стали, легированные кремнием и марганцем (60С2, 60СГ и др.), предназначены для больших по размеру упругих элементов и обеспечивают их длительную и надежную работу. Для ответственных пружин применяют высококачественные стали, легированные хромом и ванадием (50ХФА, 50ХГФА). Эти стали могут работать при температуре до 300°C. Их них изготавливают, например, рессоры легковых автомобилей.

4.2. Стали со специальными свойствами

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали. Коррозией называется разрушение металла под действием внешней агрессивной среды в результате ее химического или электрохимического воздействия. Различают химическую коррозию, обусловленную воздействием на металл сухих газов и неэлектролитов (например нефтепродуктов) и электрохимическую, возникающую под действием жидких электролитов или влажного воздуха. По характеру коррозионного разрушения различают сплошную и местную коррозию. Сплошная коррозия захватывает всю поверхность металла. Ее делят на равномерную и неравномерную в зависимости от того, одинакова ли глубина коррозионного разрушения на разных участках. При местной коррозии поражения локальны. В зависимости от степени локализации различают пятнистую, язвенную, точечную, межкристаллитную и др. виды местной коррозии.

Самый надежный способ защиты от коррозии - применение коррозионностойких сталей. Коррозионная стойкость достигается при

введении в сталь элементов, образующих на ее поверхности тонкие и прочные оксидные пленки. Наилучший из этих элементов-хром. При введении в сталь 12-14 % хрома она становится устойчивой против коррозии в атмосфере, воде, ряде кислот, щелочей и солей. Стали, содержащие меньшее количество хрома, подвержены коррозии точно так же, как и углеродистые стали. В технике применяют хромистые и хромоникелевые коррозионностойкие стали.

Хромистые коррозионностойкие стали могут содержать 13, 17 или 25-27 % хрома. Сталь 08X13 подвергается отжигу при 700-800°C, стали 12X13, 20X13- закалке от 1000°C и отпуску при 600-700°C. Их применяют для изготовления деталей с повышенной пластичностью, работающих в слабоагрессивных средах. Стали 30X13, 40X13 подвергаются закалке и отпуску при 200-300°C. Из них изготавливают режущий, мерительный и хирургический инструмент.

Стали 12X17, 15X28 имеют более высокую коррозионную стойкость. Подвергаются отжигу при температуре 700-780°C. Используются для оборудования заводов легкой и пищевой промышленности, труб, работающих в агрессивных средах, для изготовления кухонной посуды.

Хромоникелевые стали обычно содержат 18 % хрома и 9-12 % никеля (04X18N10, 12X18N10T, 12X18N12T и др.). Они имеют более высокую коррозионную стойкость по сравнению с хромистыми сталями, лучшие механические свойства, хорошо свариваются. Эти стали имеют аустенитную структуру. Их термообработка состоит из закалки от температуры 1100-1150°C в воде без отпуска.

Хромоникелевые стали склонны к межкристаллитной коррозии. Она быстро распространяется по границам зерен без заметных внешних признаков. Это происходит вследствие образования карбидов хрома по границам зерен, что приводит к уменьшению содержания хрома в поверхностном слое зерна. Чтобы карбиды хрома не образовывались, надо либо использовать стали с пониженным содержанием углерода (до 0,04 %), либо дополнительно легировать сталь титаном, связывающим углерод в карбид титана.

Используются хромоникелевые стали в пищевой и химической промышленности, холодильной технике. Поскольку никель - дорогостоящий элемент, иногда его частично заменяют марганцем и используют сталь 10X14Г14Н4Т.

Жаростойкие и жаропрочные стали. Жаростойкие стали обладают стойкостью против химического разрушения поверхности при высокой температуре (свыше 550°C). При нагреве стали происходит окисление поверхности и образуется оксидная пленка (окалина). Дальнейшее окисление определяется скоростью проникновения атомов кислорода через эту пленку. Через пленку оксидов железа они проникают очень легко. Для повышения жаростойкости сталь легируют элементами,

образующими плотную пленку, через которую атомы кислорода не проникают. Эти элементы - хром, алюминий, кремний. Так как алюминий и кремний повышают хрупкость стали, чаще всего применяют хром. Чем больше его содержание, тем более жаростойкой является сталь. Сталь 15X5 выдерживает до 600°C, 40X9C2 – до 800°C, рассмотренные ранее 12X17 - 900°C и 15X28 – до 1050°C.

Жаропрочные материалы способны противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. Жаропрочные стали классифицируются по структуре.

Перлитные стали содержат малое количество углерода, легируются хромом, молибденом, ванадием (12XM, 12X1MФ). Используются для изготовления труб, паропроводов и др. деталей, длительно работающих при температуре 500-550°C.

Мартенситные стали в большом количестве легированы хромом (15X11MФ, 15X12BHMФ). Они используются для деталей энергетического оборудования, длительно работающего при температуре 600-620°C. Особую группу мартенситных сталей составляют сильхромы, применяемые для клапанов двигателей внутреннего сгорания. Они дополнительно легированы кремнием (40X9C2, 40X10C2M).

Аустенитные стали легированы большим количеством хрома и никеля, а также другими элементами (09X14H16Б, 09X14H19B2БР). Из этих сталей изготавливают детали газовых турбин, работающих при температуре 600-700°C.

Для работы при более высоких температурах (700-900°C) служат сплавы на основе никеля, называемые нимониками. Примером нимоника является сплав ХН77ТЮР, содержащий кроме никеля приблизительно 20 % Cr, 2,6 % Ti, 0,8 % Al, 0,01 % В.

Для работы при температурах свыше 1000°C используют тугоплавкие металлы и их сплавы. Это – хром, ниобий, молибден, тантал, вольфрам. Они используются в атомной энергетике и в космической технике.

Температуры 1500-1700°C выдерживают жаропрочные керамические материалы на основе карбида и нитрида кремния.

Износостойкие стали способны сопротивляться процессу изнашивания. Изнашивание - это процесс постепенного разрушения поверхностных слоев трущихся деталей, который приводит к уменьшению их размеров (износу). Износостойкие стали можно разделить на три группы.

В первую группу входят стали, износостойкость которых достигается высокой твердостью поверхности. Они подвергаются закалке и низкому отпуску или химико-термической обработке. Имеют структуру мартенсита или мартенсита с карбидными включениями. К этой группе относятся подшипниковые стали, из которых

изготавливаются шарики и ролики подшипников качения. Они маркируются буквами ШХ и цифрой, показывающей содержание хрома в десятых долях процента, содержат также марганец и кремний (ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ). Содержание углерода в них - около 1 %.

Ко второй группе относятся стали, износостойкость которых достигается смазывающим действием графита. Эти стали имеют в структуре графитные включения, которые в процессе изнашивания выходят на поверхность и выполняют роль сухой смазки. Эти стали имеют высокое содержание углерода (~ 1,5 %) и кремния (~ 1 %), что повышает способность к графитизации. Эти стали подвергаются графитизирующему отжигу, который аналогичен отжигу ковкого чугуна (см. раздел 2.3.).

Третью группу составляют стали, износостойкость которых достигается повышенной склонностью к наклепу. Это прежде всего сталь 110Г13. Она имеет невысокую твердость, которая при действии давления и ударов резко повышается, за счет чего и достигается износостойкость. Эта сталь подвергается закалке от 1100°С в воде, после чего получает аустенитную структуру. Плохо обрабатывается резанием, поэтому применяется в литом состоянии.

4.3. Инструментальные стали и сплавы

По назначению инструментальные стали делятся на три вида: для режущего, измерительного и штампового инструмента. Кроме сталей, для изготовления режущего инструмента применяются металлокерамические твердые сплавы и минералокерамические материалы. Режущий инструмент работает в сложных условиях, подвержен интенсивному износу, при работе часто разогревается. Поэтому материал для изготовления режущего инструмента должен обладать высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью. Теплостойкость – это способность сохранять высокую твердость и режущие свойства при длительном нагреве.

Углеродистые инструментальные стали содержат 0,7-1,3 % углерода. Они маркируются буквой У и цифрой, показывающих содержание углерода в десятых долях процента (У7, У8, У9, ... У13). Буква А в конце марки показывает, что сталь высококачественная (У7А, У8А, ... У13А). Предварительная термообработка этих сталей – отжиг на зернистый перлит, окончательная – закалка в воде или растворе соли и низкий отпуск. После этого структура стали представляет собой мартенсит с включениями зернистого цементита. Твердость лежит в интервале HRC 56 – 64.

Для углеродистых инструментальных сталей характерны низкая теплостойкость (до 200°С) и низкая прокаливаемость (до 10-12 мм). Однако вязкая незакаленная сердцевина повышает устойчивость

инструмента против поломок при вибрациях и ударах. Кроме того, эти стали достаточно дешевы и в незакаленном состоянии сами хорошо обрабатываются.

Стали У7-У9 применяются для изготовления инструмента, испытывающего ударные нагрузки (зубила, молотки, топоры). Стали У10-У13 идут на изготовление инструмента, обладающего высокой твердостью (напильники, шаберы). Стали У8-У12 применяются также для измерительного инструмента.

Низколегированные инструментальные стали содержат в сумме около 1-3 % легирующих элементов. Они обладают повышенной по сравнению с углеродистыми сталями прокаливаемостью, но теплостойкость их невелика – до 400°C. Основные легирующие элементы – хром, кремний, вольфрам, ванадий. Маркируются эти стали так же, как конструкционные, но содержание углерода дается в десятых долях процента. Если первая цифра в марке отсутствует, то содержание углерода превышает 1 %. Например, 9ХС, ХВГ, ХВ5.

Термообработка низколегированных инструментальных сталей - закалка в масле и отпуск при температуре 150-200°C. При этом обычно достигается сквозная прокаливаемость. Твердость после термообработки составляет HRC 62-64.

Благодаря большой прокаливаемости и закалке в масле низколегированные стали используются для изготовления инструмента большой длины и крупного сечения (например, сверл диаметром до 60 мм). Применяются для ручного инструмента по металлу и измерительного инструмента.

Быстрорежущие стали предназначены для работы при высоких скоростях резания. Главное их достоинство - высокая теплостойкость (до 650°C). Это достигается за счет большого количества легирующих элементов - вольфрама, хрома, молибдена, ванадия, кобальта. Маркируются быстрорежущие стали буквой Р, число после которой показывает содержание вольфрама в %. Далее идут обозначения и содержание других легирующих элементов. Содержание углерода во всех быстрорежущих сталях приблизительно 1 %, а хрома 4 %. Поэтому эти элементы в марке не указываются. Например, Р18, Р9, Р6М5, Р6М5Ф2К8.

Термообработка быстрорежущих сталей заключается в закалке от высоких температур (1200-1300°C) и трехкратном отпуске при 550-570°C. Трехкратный отпуск применяется для того, чтобы избавиться от остаточного аустенита, который присутствует после закалки в количестве приблизительно 30 % и снижает режущие свойства. После термообработки сталь имеет мартенситную структуру с карбидными включениями. Твердость после термообработки составляет HRC 64-65.

Быстрорежущие стали применяются для изготовления инструмента, используемого для обработки металла на металлорежущих

станках (резцы, фрезы, сверла). Для экономии дорогих быстрорежущих сталей режущий инструмент часто изготавливается сборным или сварным. Рабочую часть из быстрорежущей стали приваривают к основной части инструмента из конструкционной стали.

Металлокерамические твердые сплавы представляют собой спеченные порошковые материалы, основой которых служат карбиды тугоплавких металлов, а связующим – кобальт. Их теплостойкость доходит до 900-1000°C, а твердость - HRA 82-92.

Твердые сплавы делятся на три группы. Вольфрамовые изготавливаются на основе карбида вольфрама и кобальта. Маркируются буквами ВК и цифрой, показывающей содержание кобальта в % (ВК2, ВК6, ВК10). Титановольфрамовые твердые сплавы содержат дополнительно карбид титана. Они маркируются буквами Т, К и цифрами. После буквы Т указывается содержание карбида титана в %, а после буквы К-кобальта (Т15К10, Т15К6). Титанотанталовольфрамовые содержат дополнительно карбид тантала. Маркируются буквами ТТ, после которых указывается суммарное содержание карбидов титана и тантала в %, и буквой К, после которой указывается содержание кобальта (ТТ7К12, ТТ10К8).

Твердые сплавы изготавливаются в виде пластин, которые припаиваются к державке из углеродистой стали. Применяют твердые сплавы для резцов, сверл, фрез и другого инструмента. Главный недостаток твердых сплавов - высокая хрупкость.

Минералокерамические и сверхтвердые материалы. Минералокерамика является дешевым инструментальным материалом, не содержащим дефицитных и дорогостоящих элементов. В настоящее время используются следующие основные группы инструментальных минералокерамических материалов:

1. Оксидная (белая) керамика, состоящая из оксида алюминия Al_2O_3 с небольшими добавками оксида магния (0,6-1 %). Основным представителем этой группы-микролит ЦМ-332.

2. Оксидно-карбидная (черная) керамика состоящая из оксида алюминия (60-80 %), карбидов и оксидов тугоплавких металлов (TiC , ZrO_2 и др.).

3. Оксинитридная керамика, состоящая из нитрида кремния Si_3N_4 с добавкой тугоплавких оксидов.

По твердости (90-95 HRA), теплостойкости (до 1200°C) и износостойкости минералокерамические материалы превосходят твердые сплавы. Технология их изготовления следующая: подготовленный порошок формуют, прессуют, а затем спекают при температуре 1750-1900°C. К державкам инструментов минералокерамические пластинки припаивают или прикрепляют механически.

В последнее время разработаны и применяются новые сверхтвердые инструментальные материалы для оснащения рабочей части металлорежущего инструмента - эльборы (поликристаллы кубического нитрида бора) и алмазы. Эльбор по своей теплостойкости (1400°C) превосходит все имеющиеся инструментальные материалы, используемые для оснастки режущего инструмента. Режущие инструменты, оснащенные поликристаллическими алмазами, применяют при обработке титановых сплавов, минералокерамики, твердых сплавов и т.д. Стойкость таких резцов в 6-10 раз выше стойкости твердосплавных резцов. Синтетические поликристаллические алмазы получают из графита при температуре порядка 2500°C и весьма высоких показателях давления.

5. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В зависимости от величины удельного электрического сопротивления и применения проводниковые материалы подразделяются на следующие группы: 1) металлы и сплавы высокой проводимости; 2) сплавы с высоким электрическим сопротивлением; 3) сверхпроводники; 4) припои; 5) контактные материалы.

5.1. Материалы высокой проводимости

К материалам высокой проводимости относятся материалы с удельным сопротивлением до $0,1 \cdot 10^{-6}$ Ом·м (ГОСТ 22265-76). Кроме низкого электросопротивления, эти материалы должны обладать высокими механическими и технологическими свойствами: стойкостью против окисления в различных средах, способностью свариваться, подвергаться пайке. Свойства ряда металлов высокой проводимости приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Физические свойства металлов высокой проводимости

Материал	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$T_{\text{кр}} \cdot 10^4, \text{°C}^{-1}$	$T_{\text{пл}}, \text{°C}$	$\gamma \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$
Серебро, Ag	0,016	40	961	10,50
Медь, Cu	0,017	43	1083	8,94
Золото, Au	0,024	38	1063	19,30
Алюминий, Al	0,028	42	658	2,70

Бериллий, Be	0,040	60	1284	1,85
Магний, Mg	0,045	42	651	1,74
Иридий, Ir	0,054	41	2410	22,50
Вольфрам, W	0,054	46	3380	19,30
Молибден, Mo	0,057	46	2620	10,20
Цинк, Zn	0,059	-	420	7,14
Кобальт, Co	0,062	60	1492	8,71
Никель, Ni	0,073	65	1455	8,90
Кадмий, Cd	0,076	42	321	8,65
Индий, In	0,090	47	156	7,28
Железо, Fe	0,098	60	1535	7,87
Платина, Pt	0,105	39	1773	21,40
Олово, Sn	0,120	41	232	7,31

Примечание. $T_{кр}$ - температурный коэффициент электрического сопротивления

Практическое применение в качестве материалов высокой проводимости имеют Cu, Al, Fe и их сплавы.

Медь по многим свойствам является лучшим материалом для проводников. Занимая второе место по проводимости после серебра, медь обладает высокой пластичностью, достаточной прочностью, стойкостью против окисления в атмосфере, технологичностью.

Наибольшую электрическую проводимость имеет чистая медь. Добавка в медь 0,5 % Zn, Cd, Ag повышает коэффициент электросопротивления на 5 %; 0,5 % Ni, Sn, Al – на 25 %; 0,5 % Be, As, Fe – на 55 %.

Наиболее вредной примесью в меди является кислород, кроме ухудшения проводимости, он вызывает растрескивание и потерю прочности при отжиге в среде водорода. Для электротехнических целей применяют наиболее чистую, техническую катодную медь марок M0к (99,95 % Cu), M1к (99,9 % Cu), безкислородную медь марок M00б (99,99 % Cu), M1б (99,9 % Cu), переплавленную медь M1 (99,9 % Cu) (ГОСТ 859-78). Из медных слитков прокаткой получают катанку диаметром 6-12 мм, из которой волочением получают проволоку диаметром 0,020-9,42 мм. При холодной протяжке получают твердую медь (МТ), которая в результате наклепа получает высокий предел прочности, повышенную твердость, упругость и малую пластичность (табл. 5.2). Если же проволока после волочения подвергается отжигу при высокой температуре, то получается мягкая медь (ММ), которая более пластична, имеет меньшую твердость и прочность. Отжиг проводится в

специальных печах без доступа воздуха. МТ применяется для контактных проводов, шин рубильников, коллекторов электромашин. ММ применяется для обмоточных проводов, токоведущих жил кабелей.

Таблица 5.2
Физические и механические свойства меди (ГОСТ 859-78)

Марка меди	$\gamma \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	σ_B , МПа	$T_{пл}$, °С	δ ,%	НВ, МПа	$\rho \cdot 10^6$, Ом· м
ММ (мягкая отожженная)	8,90	250-300	1083	18-50	550	0,0172
МТ (твердая отожженная)	8,94	350-480	1080	0,5-4,0	1250	0,0177- 0,0180

Механические свойства меди зависят от диаметра провода. С уменьшением диаметра провода повышается прочность, снижается пластичность для отожженного и нагартованного состояний.

Для изготовления фольгированных диэлектриков электролитическим осаждением применяется неоксидированная медная фольга (ФМЭ) или оксидированная (ФМЭО) нормальной шероховатости, или оксидированная повышенной шероховатости (ФМЭОШ). По химическому составу фольга соответствует марке М1.

Для изготовления деталей методом порошковой металлургии применяются порошки: в стабилизированном состоянии – марки ПМС и в нестабилизированном состоянии – марки ПМА.

Сплавы меди. Помимо чистой меди в качестве проводниковых материалов применяются ее сплавы: бронзы (сплав с оловом, алюминием, кремнием, кадмием, бериллием и др.) и латуни (сплав с цинком). Бронзы и латуни обладают по сравнению с чистой медью более высокими механическими свойствами. Наиболее высокими свойствами обладают бериллиевые бронзы: БрБ2, БрБНТ1,9; БрБНТ1,7, которые после закалки с температуры 750-790°С и старением при 300-325°С имеют временное сопротивление при растяжении $\sigma_B=1370$ МПа и твердость НВ=3330-3900 МПа. Бериллиевые бронзы применяются для изготовления токоведущих пружин, щеткодержателей, скользящих контактов, электродов и т.д. Кадмиевая бронза с 1 % Cd незначительно отличается от меди по электросопротивлению и применяется для изготовления контактов, контактных проводов, коллекторных пластин. Она обладает высокой износостойкостью до температуры 250°С. Латуни обладают более высокой пластичностью и прочностью при растяжении по сравнению с медью. Но электропроводность латуней Л70, Л68 и др. составляет около 25 %. Они применяются для изготовления различных токопроводящих деталей.

Алюминий. Алюминий является вторым по значению (после меди) проводниковым материалом. Алюминий примерно в 3,5 раза легче меди. Электрическое сопротивление алюминия в 1,63 раза выше, чем сопротивление меди. Для равной проводимости диаметр алюминиевого провода должен быть в 1,3 раза больше, но вес при этом оказывается в два раза ниже. Поэтому алюминий и его сплавы являются основными материалами для воздушных линий электропередач. Кроме того, алюминий применяется для кабелей, обмоток электромашин, трансформаторов, электромагнитов и т.д. Алюминий менее дефицитен, более дешев, обладает стойкостью в атмосфере за счет образования плотной пленки оксида Al_2O_3 . Недостатком алюминия является более низкая прочность, большая трудность пайки и сварки. Для пайки применяются специальные пасты-припои или ультразвуковые паяльники.

В зависимости от химического состава первичный алюминий подразделяют на : алюминий особой чистоты (А999), высокой чистоты (А995, А99, А97, А95) и технической чистоты (А85, А8,А7, А7Е, А6, А5Е, А5, А0) (ГОСТ 11069-74). Из алюминия А995, А99, А97, А7Е, А5Е производятся слитки, из которых изготавливается проволока для кабелей и проводов.

Для неизолированных проводов линий электропередач изготавливают проволоку АМ (мягкая), АПТ (полутвердая), АТ (твердая), АТ_п (твердая повышенной прочности) (ГОСТ 6132-70).

Таблица 5.3

Механические свойства проволоки диаметром 0,6-10,0 мм
из алюминиевой катанки

Свойства	АТ	АПТ	АМ	АТ _п *
σ_B , МПа	147-167	88-137	73,5-98	167-191
δ , %	1,0-2,0	2,0-3,0	15-25	1,5-2,0
$\rho \cdot 10^6$ Ом · м	0,0283	0,0283	0,0280	0,0283

*Для проволоки диаметром 1,5-4,5

Все примеси снижают удельную проводимость алюминия, но менее существенно, чем проводимость меди. Добавка Ni, Si, Zn, Fe в количестве 0,5 % снижает электропроводность отожженного алюминия на 2-3 %, добавка 0,5 % Cu, Ag, Mg - на 5-10 %. Наиболее сильное снижение проводимости оказывают Ti и Mn. Поэтому для электротехнических целей используется алюминий, содержащий не более 0,5 % примесей. Более чистые сорта алюминия типа А97 применяются для изготовления фольги, электродов, корпусов оксидных конденсаторов. Алюминий с содержанием примесей до 0,01 % иногда

используется в защитных кабельных оболочках вместо свинца. Такой алюминий более пластичен и более стоек по отношению к коррозии.

Сплавы алюминия. Для деталей повышенной прочности используются сплавы алюминия типа Al-Mg-Si-Fe и Al-Mg-Si-Fe-Zn. Например сплав альдрей, содержащий 0,3-0,5 % Mg, 0,4-0,7 % Si, 0,2-0,3 % Fe (остальное Al). После соответствующей обработки этот сплав в виде проволоки приобретает высокую прочность $\sigma_B=350$ МПа, $\delta=6$ %, сохраняя легкость алюминия и незначительно повышая электросопротивление $\rho = 0,0317 \cdot 10^{-6}$ Ом · м. В линиях электропередач широкое применение имеет сталеалюминевый провод. Такой провод представляет собой сердечник из одной или нескольких стальных жил, обвитых алюминиевой проволокой. Прочность такого провода определяет стальной сердечник, а электрическую проводимость - алюминиевая проволока.

Железо (сталь). В качестве проводникового материала для передачи электроэнергии применяется сталь, содержащая 0,10-0,15 % С. Она обладает более высокой механической прочностью, но и значительно более высоким, чем у меди и алюминия электросопротивлением ($\rho_{Al} = 0,028$; $\rho_{Fe}=0,098$) · 10^{-6} Ом · м. Кроме проводов, из стали изготавливают шины, рельсы трамваев, электрических железных дорог. Для проводов применяют качественную сталь (ГОСТ 1050-74 и ГОСТ 4543-71). Проволока диаметром 0,5-6,0 мм может быть без покрытия (тип КС) или с покрытием от коррозии (тип КО) (ГОСТ 792-67).

Временное сопротивление разрыву для оцинкованной проволоки - не менее 362 МПа, для проволоки без покрытия - 392 МПа. Удельное электрическое сопротивление проволоки - не более $0,15 \cdot 10^{-6}$ Ом · м.

Различные металлы. Вольфрам из всех металлов имеет наиболее высокую температуру плавления, обладает высокой плотностью. До получения изделий подвергается сложной термической обработке в атмосфере водорода, ковке, волочению, что позволяет получить проволоку диаметром до 0,01 мм. В результате такой обработки вольфрам приобретает волокнистую структуру. С уменьшением диаметра проволоки существенно повышаются механические свойства с 500-600 МПа при диаметре 5 мм до 3000-4000 МПа для тонких нитей и удлинение $\approx 4\%$. Вольфрам может работать при температуре $\sim 2000^\circ\text{C}$, но только в глубоком вакууме или инертном газе, например в качестве нити накаливания. Вольфрам является прекрасным материалом для контактов, так как он устойчив в работе, износостоек, слабо подвергается электрической эрозии. Недостатком является трудность обработки.

Молибден. Детали из молибдена могут работать при более низкой температуре, чем вольфрам в вакууме, инертной среде или в восстановительной атмосфере. Механические свойства зависят от

механической обработки, вида изделия, диаметра проволоки, термообработки. Предел прочности молибдена от 350 до 2500 МПа, относительное удлинение от 2,0 до 55 %. В электровакуумной технике чаще применяются: МЧ (молибден чистый) и МК (молибден с кремнием). Последний имеет более высокие механические свойства при повышенных температурах. Молибден применяется для электрических контактов.

Золото – пластичный материал; $\sigma_B=150$ МПа; $\delta=40$ %. В электротехнике используется как контактный материал для коррозионно-стойких покрытий, электродов полупроводниковых приборов и т.д.

Серебро обладает самым низким удельным сопротивлением. Механические свойства серебряной проволоки $\sigma \leq 200$ МПа; $\delta=50$ %. Проволока применяется при изготовлении контактов для небольших токов. Серебряные контакты наносятся на диэлектрики в производстве керамических и слюдяных конденсаторов.

Платина – весьма стойкий к окислению и химическим реагентам металл. После отжига платина имеет $\sigma_B=150$ МПа; $\delta=30-35$ %. Высокая пластичность платины позволяет получать нити диаметром до 1 мкм. Платина применяется для термопар и служит основой для контактных сплавов, но из-за высокой стоимости применяется редко.

Палладий. По многим свойствам близок к платине: $\sigma_B=200$ МПа; $\delta=40$ %. Сплавы палладия с медью и серебром применяются в качестве контактных материалов.

Никель. Достаточно прочный, химически стойкий металл. Механические свойства зависят от чистоты. Может подвергаться обработке давлением даже в холодном состоянии. Никель является одним из компонентов многих магнитных и проводниковых сплавов, а также служит в качестве защитных и декоративных покрытий.

Кобальт. Обладает малой химической активностью. В отожженном состоянии $\sigma_B=500$ МПа; $\delta=50$ %. Является одним из компонентов магнитных и жаростойких сплавов, а также сплавов с низким коэффициентом линейного расширения.

Свинец. Мягкий пластичный малопрочный материал ($\sigma_B=15$ МПа, $\delta=55$ %), химически стоек в воде, серной, соляных кислотах и в ряде других сред. Свинец нестойк в азотной, уксусной, органических кислотах. Он интенсивно поглощает рентгеновские лучи. Применяется в плавких предохранителях, в защитных оболочках кабелей. Свинец и его сплавы ядовиты.

Олово – мягкий пластичный металл ($\sigma_B=16-38$ МПа). Из сплава олова с добавками 15 % свинца и 1 % Sb получается фольга 6-8 мкм, применяемая в конденсаторах. Кроме того, олово применяется в качестве покрытий металлов (лужение) и входит в состав бронз и припоев.

Цинк. Металл, свойства которого сильно зависят от температуры. При комнатной температуре он хрупок, при температуре около 100°C пластичен, при > 200°C снова хрупок. Цинк применяется в качестве защитных покрытий, входит в состав латуней, из него изготавливаются электроды гальванических элементов.

Кадмий. Выпускается нескольких марок (наиболее чистая 99,997 % Cd). Кадмий входит в состав бронз, припоев, используется в гальванических элементах.

Индий. Галий. Применяются в качестве легирующих добавок в полупроводниках.

Ртуть. Единственный металл, находящийся в жидком состоянии при комнатной температуре. Ртуть применяется в качестве жидких катодов в ртутных выпрямителях, в ртутных лампах, газоразрядных приборах, в лампах дневного света и для ртутных контактов в реле. Ртуть, её соединения и особенно пары весьма ядовиты.

5.2. Материалы высокого электросопротивления

Материалом высокого электрического сопротивления обычно считается проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением при нормальных условиях не менее $0,3 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. По применению эти материалы делятся на три группы: материалы для резисторов, материалы для термопар и материалы для нагревательных элементов. В зависимости от области применения к каждой группе материалов предъявляются дополнительные требования.

Материалы для резисторов. Основные требования к материалам для резисторов: низкий температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, низкая термоэлектродвижущая сила в паре с медью, высокая стабильность электрического сопротивления во времени. Применяются две группы материалов: сплавы для проволочных, ленточных резисторов и материалы для непроволочных (пленочные и углеродистые).

Материалы для резисторов подразделяются на материалы для технических резисторов (регулирующие и пусковые реостаты) и для прецизионных (образцовые сопротивления, элементы электроизмерительных приборов, катушки сопротивления, шунты, обмотки потенциометров).

Сплавы для проволочных резисторов. Основными сплавами для технических резисторов являются медно-никелевые сплавы (мельхиор марки МН19, нейзильбер марки МНЦ15-20); для прецизионных резисторов - сплавы на медной основе (манганин марки МНМц 3-12, константан марки МНМц 40-1,5, МНМцАЖ3-12-0,3-0,3) и сплавы на никелевой основе (марки Х20Н80-ВИ, 80ХЮД-ВИ, Х15Н60, ЭП277-

ВИ). Для изготовления высокоточных прецизионных сопротивлений используются сплавы на основе благородных металлов Au, Ag, Pt, Pd.

Легирование меди никелем повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, термоэлектрические характеристики.

Мельхиоры имеют высокую коррозионную стойкость в атмосфере, в пресной и соленой воде, органических кислотах, растворах солей. Мельхиоры - твердые растворы, обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях.

Сплавы меди, в которых основными легирующими элементами являются никель и цинк, называются нейзильберами. Нейзильберы также являются твердыми растворами, обрабатываемыми давлением в горячем и холодном состояниях. Добавка цинка повышает механические и коррозионные свойства. Свойства медно- никелевых сплавов приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Свойства проволоки из медно-никелевых сплавов

Сплав	Состояние материала	Диаметр проволок и, мм	$\delta, \%$	$\sigma_B, \text{МПа}$ не менее	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
1	2	3	4	5	6
Нейзильбер МНЦ 15-20 ГОСТ 5220-78	мягкое	0,1-0,2	15	343	
		1,10-5,0	30		
	твердое	0,1-0,5		686-1078	
		2,2-5,0		539	
Мельхио МН19	мягкое		35-40	294-392	0,287
	твердое		3-5	490-784	
Константан МНМц 40-1,5 ГОСТ 5307-77	мягкое	0,1-0,45	15	450-650	0,465±0,00 15
		0,5-5,0	20		
	твердое	0,02-5,0		650	0,49±0,03
Манганин МНМц 3-12 ГОСТ 10155-75	мягкое	0,05-0,09	не менее 10		0,48±0,05

Окончание табл. 5.4

1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---

Манганин МНМц 3- 12 ГОСТ 10155-75	твердое	0,02-0,04 0,05-6,0	не более 9		0,48±0,05
МНМцЖ -3-12-0,3- 0,3 ГОСТ 10155-75	мягкое	0,10-6,0	не менее 15		0,47±0,08

Для обеспечения малого значения температурного коэффициента α_p и стабильности коэффициента ρ во времени проволока подвергается отжигу в вакууме при температуре 550-600°C, а иногда после намотки на катушки ее дополнительно отжигают при 200°C. Допускаемая рабочая температура 200°C.

Константан по механическим свойствам близок к манганину. Обладает более высокой нагревостойкостью, может длительно работать при температуре 450°C. Из-за высокого значения термо-ЭДС в паре с медью применение константана при мостовых и потенциометрических методах измерения может привести к ошибкам, поэтому константан успешно применяется для термопар.

Мельхиор и нейзильбер также подвергаются отжигу при температуре 600-880°C, и иногда проводится низкотемпературный отжиг. Проволока из сплавов на медной основе выпускается в твердом (без отжига после волочения) и мягком (отожженном) исполнении. Для малогабаритных резисторных элементов в приборах используется промышленная стандартная проволока (наитончайшая диаметром 0,009-0,09 мм и тончайшая диаметром 0,09-0,4 мм) из прецизионных никельхромовых сплавов Х20Н80-ВИ, Н80Х10D-ВИ, Х29Н80. ЭП277-ВИ. Проволока поставляется в отожженном состоянии. Свойства сплавов приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Свойства сплавов на никелевой основе для резисторов
и тензорезисторов (ГОСТ 8803-77)

Сплав	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м	$\alpha \cdot 10^6$, °С ⁻¹	σ_B , МПа	δ , %	Интервал рабочих температур, °С
ЭП277-ВИ	1,29- 1,40	14	> 900	12-20	-60- +150
Н80ХЮД- ВИ	1,28- 1,35	14	900-1000	8-18	-60- +150
Х15Н60	1,09- 1,12	--	--	12-20	--
Х20Н80	0,98- 1,10	--	--	12-20	--
Х20Н73ЮМ- ВИ	1,4-1,5	14	900-1000	10-18	-196- +430

Непроволочные резистивные материалы делятся на пленочные металлические, пленочные на основе оксидов, силицидов, карбидов и неметаллические углеродистые. Пленочные материалы используются в микросхемах, микроэлектронике, интегральных схемах и других устройствах. Непроволочные резисторы применяются в автоматике, вычислительной технике и в электрике.

Пленочные материалы имеют высокое удельное поверхностное сопротивление. Например, металлические пленки на основе хрома $\rho=200-500$ Ом · м; на основе оксида Рb $\rho = 400 - 1000$ Ом · м; на основе силицида марок РС3001-800-3000 Ом · м; МЛТ-3М – 100-20000 Ом · м. Свойства графита приведены в табл. 5.6.

Материалы для электронагревательных элементов. К сплавам для нагревательных элементов предъявляются следующие основные требования: высокая жаростойкость, высокое электросопротивление, малая величина температурного коэффициента сопротивления, высокая пластичность для возможности получения проволоки, ленты и др. В состав сплавов вводятся никель, хром, алюминий, имеющие высокий коэффициент оксидации, что позволяет получить в воздушной среде плотную пленку оксидов. Сплавы системы Fe-Cr-W называются нихромами и ферронихромами, сплавы системы Fe-Cr-Al называются фехралями и хромалями.

Таблица 5.6

Свойства графита и пиролитического углерода

Материал	$\rho \cdot 10^6, \text{Ом} \cdot \text{м}$
Поликристаллический графит	8
Монокристалл графита:	
вдоль базисных плоскостей	0,4
поперек базисных плоскостей	100
Пиролитический углерод	10-50

Обозначения сплавов часто производятся путем условных обозначений из букв и цифр. Буквы обычно обозначают наиболее характерные элементы (например, Б- обозначает ниобий, Н-никель, Х-хром, Т-титан, Ю-алюминий и т.п.), а числа - содержание данного компонента в сплаве (в процентах). Так в сплаве Х15Н60 содержится ~15 % *Cr*, ~60% *Ni*, а остальное – *Fe*.

Большое влияние на срок жизни нагревательного элемента, работающего на воздухе, оказывают свойства образующегося оксида. Если оксид летуч, то он удаляется с поверхности и не может защитить оставшийся металл от дальнейшего окисления. Например, оксиды вольфрама и молибдена улетучиваются легко, и потому эти металлы не могут работать при высоких температурах при доступе кислорода.

Хромоникелевые сплавы обладают высокой стойкостью при высоких температурах в воздушной среде в результате близких значений температурных коэффициентов линейного расширения этих сплавов и оксидных пленок. При резких сменах температур происходит растрескивание оксидных пленок и в образовавшиеся трещины проникает кислород при последующих нагревах. Поэтому при многократных включениях и выключениях электронагревательные элементы перегорают значительно быстрее, чем при непрерывной работе. Срок службы нагревательных элементов из нихрома и подобных материалов может быть существенно увеличен, если поместить спираль в трубки из стойкого к окислению материала, заполненную диэлектриком, и этим исключить проникновение кислорода к спирали. Нихромы более технологичны, из них легче тянуть более тонкую проволоку, ленту. Но они более дороги из-за высокого содержания никеля.

Хромо-алюминиевые сплавы (хромали, фехрали) дешевле, но они менее технологичны, так как имеют более высокую твердость и хрупкость, поэтому из них получается проволока и лента более крупного сечения. Фехрали и хромали в основном используются для электронагревательных устройств большой мощности и промышленных электропечей. Механические свойства прецизионных сплавов для электронагревателей приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Механические свойства сплавов для электронагревателей
в зависимости от температуры (ГОСТ 12766.1-77)

Сплав	Термическая обработка	Температура, °С	σ_b , МПа	δ , %
Х23Ю5 Х23Ю5Т	760°С, 30 мин., вода	20	645	23
		800	117	58
		1200	8,8	--
Х27Ю5Т		20	663	15,9
		800	87,1	75,9
		1200	8,8	117,7
Х15Н60 Х15Н60Н	950°С, 30 мин., вода	20	645	31,9
		800	166	33,3
		1200	28,4	17,0
Х20Н80Н	1200°С, 20 мин., воздух	20	656	45,4
		800	215	70,1
		1200	22,5	101,8
Х70Ю	1000°С, 20 мин., вода	20	813	37,8
		800	392	14,0
		1200	32,4	143,0

Из прецизионных сплавов изготавливают: холоднотянутую проволоку диаметром 0,2-7,0 мм, ленту толщиной 0,1-0,3 мм, холоднотянутые круглые профили диаметром 8-10 мм, горячекатаный прокат диаметром 6-30 мм. Проволоку и ленту поставляют в мягком термически обработанном состоянии. Максимальная рекомендуемая рабочая температура нагревательных элементов зависит от диаметра проволоки. Например, для нихромовой проволоки Х20Н80-Н при диаметре 0,2 мм - 900°С, 0,4 мм - 1000°С, 1,0 мм - 1100°С, 6 мм - 1200°С. Живучесть сплавов определяется на проволочных образцах, диаметром 0,8 мм в условиях частых переменных нагревов до заданной температуры и охлаждения. Критерием является время до перегорания. Например, для сплава Х20Н80-Н при нагреве до температуры 1175°С номинальная живучесть составляет 100 часов, повышенная - 200 часов.

Керамические материалы для печей сопротивления из карбида кремния SiC и дисилицида молибдена $MoSi_2$ позволяют получать рабочие температуры 1500 и 1700°С соответственно. Преимущественное применение получили нагреватели из карбида кремния как более дешевые. Предельные рабочие температуры для керамических нагревателей в различных средах указаны в табл. 5.8.

Таблица 5.8

Пределные рабочие температуры керамических нагревателей

Газовая среда	Предел температур		Газовая среда	Предел температур	
	SiC	MoSi ₂		SiC	MoSi ₂
Инертные газы (He, Ar, Ne и др.)	1500	1650	Сернистый ангидрид	--	1600
Азот	1470	1500	Окись углерода	1300	1500
Кислород	1400	1700	Сухой водород	1250	1350
Углекислый газ	1450	1700	Влажный водород,	1300	1400
			точка росы, °С:	--	1500
			10	--	1600
			20		
		35			
Оксид азота	--	1700	Вакуум, 13,3·10 ⁻² Па	1200	--
Диоксид азота	--	1700	Вакуум, 6,65·10 ⁻² Па	2100	--

Для повышения долговечности нагреватели из SiC и Mo Si₂ рекомендуется эксплуатировать непрерывно.

Сплавы для термопар. Основные требования к материалу для термопар:

- достаточно большая термоэлектродвижущая сила (термо ЭДС);
- коррозионная стойкость в рабочих средах;
- достаточная прочность и пластичность для изготовления проводов.

Для большинства термопар рекомендуемой атмосферой является окислительная. Для термопар, содержащих в своем составе вольфрам и молибден рекомендуемая атмосфера восстановительная, инертная и вакуум. Химический состав никелевых и медноникелевых сплавов соответствует ГОСТ 422-73. Проволока для термопар из сплавов хромель марки НХ9,5; алюмель марки НМцАК 2-2-1; копель марки МНМц 43-0,5 изготавливается диаметром 0,2-0,5 мм. Проволока для платинородиевых термопар марок ПР-6, ПР-10, ПР-30 – диаметром 0,1-1,0 мм.

Различают термопары следующих исполнений: по отношению к внешней среде (обыкновенные, водозащищенные, взрывобезопасные, защищенные от агрессивной среды), по отношению к механическим воздействием (виброустойчивые) и т.д. Состав и диапазон рабочих температур представлены в табл. 5.9.

Таблица 5.9

Диапазон рабочих температур проволочных термопар

Тип термопары	Марка сплавов термоэлектродов	Диапазон измеряемых температур, °С	Кратковременная допустимая температура °С
ТМК	Медь-копель М1-МНМц 43-0,5	-200÷ +100	100
ТХК (ГОСТ 1790-77)	Хромель-копель НХ9,5-МНМц 43-0,5	-200÷ +600	800
ТХА (ГОСТ 1790-77)	Хромель-аллюмель НХ9,5-НМцАК 2-2-1	-200÷ +1000	1300
ТПП (ГОСТ 10821-75)	Платонородий-платина ПР10-ПРО (ПР 10/0)	0-1300	1600
ТПР (ГОСТ 10821-75)	Платинородий-платинородий ПР30-ПР6 (ПР 30/6)	300-1600	1800
ТВР	Вольфрам-рений ВР5-ВР20 (ВР 5/20)	0-2000	2500

Высокотемпературные неметаллические термопары из тугоплавких соединений, например С/ТiС (рабочая температура до 2500°С), С/ZrВ2 (2000°С) широкого применения не нашли из-за необходимости градуировки каждой термопары.

5.3. Контактные материалы

Материалы для электрических контактов должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокие значения дугостойкости, твердости, удельной электрической проводимости, теплопроводности, химической стойкости. Основным требованием является малое переходное сопротивление.

Электрические контакты подразделяют на разрывные, скользящие и неподвижные.

Разрывные контакты. Эти контакты работают в наиболее тяжелых условиях, так как применяются для периодического замыкания и размыкания цепи. В процессе работы этих контактов возникает искра или электрическая дуга, что вызывает окисление, коррозию и электроэрозионный износ. Это повышает переходное электрическое сопротивление, вызывает разогрев и сваривание контактов.

Электроэрозионное изнашивание приводит к появлению кратера на одном контакте и иглообразного выступа на другом. Это объясняется тем, что при размыкании металл контакта плавится, испаряется, распыляется и переносится с одного контакта на другой.

Сопротивление электроэрозионному изнашиванию повышается с повышением температуры плавления, твердости и прочности материала контактов.

В зависимости от мощности разрывные контакты подразделяют на слабонагруженные и высоконагруженные.

Слабонагруженные контакты изготавливаются из благородных металлов: золота, серебра, платины, палладия и их сплавов, которые обладают низким переходным сопротивлением и высокой стойкостью против окисления. Эти металлы и сплавы не обладают высокой стойкостью против электроэрозионного изнашивания, поэтому могут использоваться для слабонагруженных контактов. Чаще всего для таких контактов применяется серебро и его сплавы. Преимуществом серебра является высокая электрическая проводимость. Недостатком серебра является его окисляемость и электроэрозионный износ. Однако окисление незначительно повышает электросопротивление, и, кроме того, оксид при нагреве восстанавливается.

Чистое серебро применяют в слабонагруженных контактах при небольшой частоте переключений. Широко применяются сплавы серебра с медью. Эти сплавы сохраняют высокую электропроводность, имеют более высокие твердость и износостойкость, но медь снижает стойкость против окисления, поэтому также используются только в слабонагруженных контактах.

Высоконагруженные контакты изготавливают из вольфрама, молибдена, их сплавов и порошковых композиций. Например, СВ70 (30

% Ag, 66,5 % W, 3,5 % Ni), CM60 (60 %Mo, 40 % Ag), MB70 (30 % Cu, 67 % W, 3 % Ni).

Вольфрам из-за своей высокой тугоплавкости хорошо сопротивляется электроэрозионному изнашиванию. Он имеет достаточно высокую электропроводность, невысокое и устойчивое переходное электросопротивление, его контакты при работе не свариваются. Вольфрам применяют при большей частоте переключений.

Такое же применение имеют и сплавы вольфрама с 45-50 % молибдена. Эти сплавы имеют высокие электросопротивление и переходное сопротивление, но обладают высокой стойкостью к электроэрозионному изнашиванию. Кроме того, сплавы обладают пониженным сопротивлением газовой коррозии, так как вольфрам и молибден образуют легко испаряющиеся оксидные пленки. Сплавы вольфрама с молибденом могут использоваться для мощных контактов, но в среде инертных газов или в вакууме. Сплав вольфрама с 45 % молибдена используется для нитей накаливания электрических ламп и катодов. В наиболее мощных контактах используются спеченные композиции вольфрама, серебра и меди, иногда - спеченный пористый вольфрам пропитывается в вакууме медью или серебром. Для повышения свойств серебряно-медные контакты (например СОМ-10 – 10 % Cu) подвергают окислению на воздухе в течение 50 часов при температуре 700°C. При длительной выдержке кислород проникает в металл и окисляет менее стойкую медь. В результате получается композиционный материал, состоящий из серебряной матрицы и равномерно распределенных оксидов меди. Оксиды меди повышают сопротивление и стойкость электроэрозионному изнашиванию. Такие сплавы применяются в тяжело нагруженных контактах. Они же могут использоваться в скользящих контактах.

Скользящие контакты. Основным требованием к материалам для скользящих контактов, кроме обычных, перечисленных выше, является высокое сопротивление свариванию.

Кроме окисленного серебряно-медного сплава, для скользящих контактов применяют композиции из порошков меди или серебра с небольшой добавкой графита, препятствующего свариванию (МГЗ, МГ5, СГЗ, СГ5). Цифра показывает содержание графита. В качестве скользящих контактов электрических машин применяют щетки угольнографитные (УГ), графитные (Г), меднографитные (МГ). Последние обладают особенно малым электросопротивлением.

Неподвижные контакты. Эти контакты должны иметь низкое значение переходного электрического сопротивления, и оно должно быть стабильным при небольших контактных усилиях.

Для зажимных контактов применяют коррозионно-стойкие материалы, не образующие оксидных пленок высокого электрического сопротивления на контактных поверхностях: медь, латунь, цинк.

5.4. Сверхпроводниковые материалы

Как известно, с понижением температуры сопротивление проводника снижается. При температуре абсолютного нуля сопротивление всех проводников теоретически должно быть равно нулю.

Сверхпроводимость – это явление, заключающееся в том, что электрическое сопротивление некоторых материалов исчезает при достижении некоторого значения температуры.

Сверхпроводником (ГОСТ 19880-74) называется вещество, способное при определенных условиях переходить в состояние сверхпроводимости. Температура, при которой происходит переход вещества из нормального состояния в сверхпроводящее, называется критической температурой (T_c).

Состояние сверхпроводимости может быть разрушено повышением температуры выше T_c , помещением проводника во внешнее магнитное поле выше критического (B_c), повышением плотности тока через образец выше критического (I_c). Желательно, чтобы проводник имел максимально высокие параметры.

Явление сверхпроводимости связано с тем, что электрический ток, наведенный в контуре сверхпроводника, будет циркулировать годами по этому контуру без заметного уменьшения своей силы.

Сверхпроводимость является сверхтекучестью «электронной жидкости», образованной валентными электронами. Благодаря взаимодействию электронов проводимости с колебаниями кристаллической решетки, между электронами возникает притяжение, превосходящее силы кулоновского отталкивания. Два электрона, имеющие равные, но противоположные по направлению импульсы и спины, образуют связанное состояние (куперовскую пару).

При температуре абсолютного нуля все электроны проводимости сверхпроводника связаны в куперовские пары. При повышении температуры число куперовских пар уменьшается до нуля при $T=T_c$. При наложении внешнего электрического поля связанные куперовские пары начинают двигаться как единое целое.

Сверхпроводники подразделяются на две группы.

Сверхпроводники I-го рода – все чистые сверхпроводящие металлы, кроме технеция, ванадия и ниобия, и проводники II-го рода – сверхпроводящие сплавы и соединения, а также технеций, ванадий и ниобий. Немецкие ученые В.Майснер и Р.Оксенфельд обнаружили, что при переходе сверхпроводников I-го рода из нормального в сверхпроводящее состояние они становятся диамагнетиками, т.е. их относительная магнитная проницаемость μ_p скачком падает от конечных значений, близких к единице, до значений $\mu_p=0$. Поэтому внешнее магнитное поле не может проникать в сверхпроводник; если же переход

в сверхпроводящее состояние произошел в магнитном поле, то поле «выталкивается» из сверхпроводника.

У сверхпроводников II-го рода переход в сверхпроводящее состояние происходит не скачком, как у сверхпроводников I-го рода, а постепенно. У них существует промежуточное состояние между нижним и верхним значениями критической магнитной индукции. В промежуточном состоянии сверхпроводимость при постоянном напряжении сохраняется, т.е. $\rho=0$, но относительная магнитная проницаемость $\mu_r > 0$. Свойства сверхпроводника II-го рода в большей степени зависят от технологии изготовления и т.п.

Наибольшая возможная температура перехода $T_{c,0}$ (критическая температура) данного сверхпроводника достигается при очень малой магнитной индукции, т.е. для сверхпроводникового электромагнита - при малой силе тока, идущего через обмотку. Наибольшее возможное значение $B_{c,0}$ магнитной индукции перехода (критическая магнитная индукция) соответствует температуре сверхпроводника очень близкой к нулю Кельвина. В настоящее время известно 35 сверхпроводящих металлов и более тысячи сплавов и химических соединений.

Некоторые вещества переходят в сверхпроводящее состояние в результате высокого гидростатического давления. Среди них металлы, сплавы металлов и полупроводники (InSb).

Ряд металлов переходит в сверхпроводящее состояние при температуре выше 0 Кельвина. То есть в жидком гелии ($T=4,2$ К) они являются сверхпроводниками.

Более высокие температуры перехода в сверхпроводящее состояние были получены при исследовании соединений $BaLaCuO_3$ - 35°K и $IBa_2Cu_3O_7$ - 97°K . Эти вещества могли бы работать в сжиженном водороде ($T=20,3^\circ\text{K}$), но при утечке водород опасен из-за возможности образования взрывчатой смеси с кислородом. Было бы еще выгоднее использование сжиженного азота ($T=77,7^\circ\text{K}$), но из-за отсутствия устойчивых до этой температуры сверхпроводников это невозможно.

Первые ставшие известными сверхпроводники – чистые металлы имели весьма малые значения $B_{c,0}$ (см. табл. 5.10), поэтому попытки практического использования явления сверхпроводимости были нереальны. Только после открытия сверхпроводников II-го рода, представляющих собой сплавы и химические соединения, интерес к ним значительно повысился. Оказалось, что они кроме высоких значений T_c обладают и высокими значениями магнитной индукции - B_c .

В настоящее время для изготовления обмоток сверхпроводящих электромагнитов и других технических целей применяют две основные группы материалов:

- 1) относительно легко деформируемые сплавы в системах Nb-Zr, Nb-Ti и чистый ниобий, из которых возможно изготовление проволоки и лент;
- 2) трудно деформируемые из-за хрупкости интерметаллические соединения типа Nb_3Sn и подобные ему. Провода из станида ниобия изготавливаются пропусканием тонких лент ниобия через расплавленное олово и последующей термообработкой, при которой осевший на ленте слой олова вступает в химическую реакцию с ниобием. Часто сверхпроводниковые провода покрывают «стабилизирующей» оболочкой из меди или другого материала, обладающего высокой удельной проводимостью и теплопроводностью, - это является гарантией от большого перегрева и повреждения сверхпроводника в отдельных участках провода.

Таблица 5.10

Параметры некоторых сверхпроводящих материалов

Сверхпроводники	$T_{c.o.}, K$	$B_{c.o.}, Tл$
металлы		
иридий Ir	0,14	0,002
алюминий Al	1,20	0,010
индий In	3,40	0,030
олово Sn	3,70	0,031
ртуть Hg	4,20	0,046
тантал Ta	4,50	0,083
ванадий V	5,30	0,130
свинец Pb	7,20	0,080
ниобий Nb	9,40	0,195
сплавы		
50% Nb+50% Ti	8,70	12,000
50% Nb+50% Zr	9,50	11,000
соединения		
галлид ванадия V_3Ga	14,00	50,000
станид ниобия Nb_3Sn	18,00	22,000

Примеры сверхпроводящих многожильных проводов приведены в табл. 5.11 и 5.12.

Более высокую плотность тока допускают многоволоконные провода, состоящие из большого числа тонких нитевидных сверхпроводниковых проволочек, заключенных в массивную медную или бронзовую матрицу.

Кроме сверхпроводящих проводов, из сплава НТ-50 выпускаются сверхпроводящие модули, фольга и шины.

Широкое применение сверхпроводимости объясняется уменьшением массы и габаритов магнитных систем, уменьшением затрат на получение магнитных полей высокой напряженности. Термоядерный синтез, МГД-генераторы, индуктивные накопители энергии, генераторы и двигатели переменного и постоянного тока, трансформаторы, ЛЭП, высокоскоростные поезда - примерный перечень использования сверхпроводящих материалов.

Теория сверхпроводимости исключительно сложна. В ее создание основной вклад внесли российские ученые – Л.Д. Ландау, Л.П. Гарьков, Н.Н. Боголюбов, В.Л. Гинзбург, А.А. Абрикосов, и др., а также зарубежные ученые – Д. Бардин, А. Купер, Д. Шриффер и др.

Изучение сверхпроводимости продолжается.

Таблица 5.11

Сверхпроводящий многожильный провод из ниоби-титанового сплава НТ-50

Тип провода	Диаметр провода, мм	Число жил	Диаметр жилы, мкм	Коэффициент заполнения, %	Критический ток в поле 5Тл при -269°С, А
ПНТ-0,5-37	0,5; 0,7; 1,2; 1,5	35;55; 61	40÷200	30÷50	60÷1300
ПНТ-0,45-121	0,45	121	30	50	90÷130
ПНТ-0,45-199	0,45	199	25	50	100÷130
ПНТ-1,0-1045	1,0	1045	20	40	360÷550
ПНТ-0,33-1	0,33	1	240÷250	70	80÷100

Таблица 5.12

**Многожильные сверхпроводящие провода на основе
интерметаллических соединений**

Тип провода	Сос- тав	Диа- метр, мм	Диа- метр жилы, мкм	Чис- ло жил	Критический ток, А в поле, Тл		Критичес- кая плотность тока $\times 10^{-9}$, А /м ² в поле, Тл	
					7,0	15	7,0	15
ПНО-1- 7225	Nb_3Sn	1,00	5	7225	550	94	0,7	0,12
ПНО-1-575	Nb_3Sn	1,00	-	575	1340	90	1,7	0,115
ПВГ-0,24- 361	V_3Ga	0,24	5	361	28*	-	0,6 2*	-

*В поле 8,5 Тл

6. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

6.1. Классификация и общая характеристика полупроводников

Электротехнические материалы условно подразделяют на проводники, полупроводники и диэлектрики.

К полупроводникам относится большая группа веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков. Удельное электрическое сопротивление проводников $10^{-8} \div 10^{-5}$ Ом · м, полупроводников - $10^{-5} \div 10^{+8}$ Ом · м, диэлектриков - $10^8 \div 10^{16}$ Ом · м.

Проводниками являются материалы, у которых заполненная электронами зона вплотную примыкает к зоне свободных энергетических уровней (зоне проводимости). Вследствие этого электроны в проводнике свободны, т.е. могут переходить с уровней заполненной зоны на незанятые уровни свободной зоны, под влиянием слабого напряжения, приложенного к проводнику (рис.6.1, а).

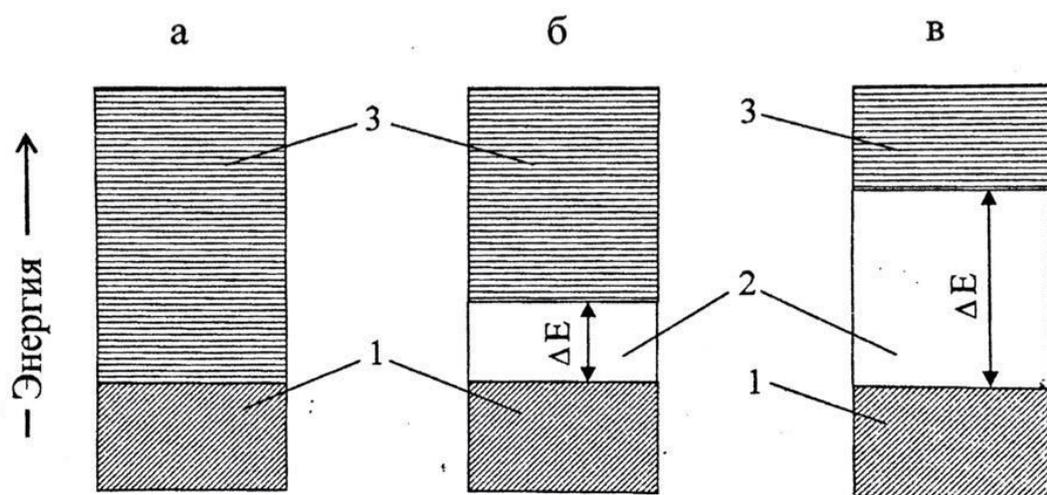


Рис. 6.1. Энергетические диаграммы проводников (а), полупроводников (б) и диэлектриков (в): 1 – заполненная электронами зона; 2 – запрещенная зона; 3 – зона проводимости

В полупроводниках при нуле Кельвина основная зона целиком заполнена валентными электронами, запрещенная зона и зона проводимости свободны (рис. 6.1, б). Чтобы в полупроводнике возник ток, нужно часть электронов перевести в зону проводимости (в зону возбужденных уровней), для чего каждому электрону необходимо сообщить некоторое количество энергии ΔE .

Диэлектриками являются вещества с большой величиной запрещенной зоны (рис. 6.1, в), что не позволяет осуществлять обычную электронную электропроводимость.

Необходимую энергию для перехода электрона в свободное состояние или для образования дырки дает не только тепловое движение, но также свет, поток электронов, ядерных частиц, электрические и магнитные поля и др.

Полупроводники бывают простые и сложные. Основной состав простого полупроводника образован атомами данного химического элемента (табл. 6.1.). В состав сложного полупроводника входят атомы двух или более химических элементов.

Таблица 6.1

Ширина запрещенной зоны простых полупроводников

Элемент	Группа	Ширина запрещенной зоны, эВ	Элемент	Группа	Ширина запрещенной зоны, эВ
бор	III	1,10	мышьяк	V	1,20
углерод-алмаз	IV	5,30	сурьма	V	0,12
кремний	IV	1,12	сера	VI	2,50
германий	IV	0,72	селен	VI	1,70
олово	IV	0,80	йод	VI	1,25
фосфор	V	1,50	теллур	VI	0,36

Носителями зарядов в полупроводниках, обуславливающих электрическую проводимость, являются электроны и дырки проводимости. Проводник, электропроводимость которого определяется примесями, называется примесным. Полупроводник, электрическая проводимость которого в основном определяется перемещением дырок проводимости, называется дырочным. У электронного полупроводника проводимость обусловлена в основном электронами проводимости.

В полупроводнике при нуле Кельвина свободных электронов нет и приложенная разность потенциалов тока не вызывает. При нагреве увеличивается концентрация носителей электрического тока, а электрическое сопротивление уменьшается. Чем больше ширина запрещенной зоны, тем выше температура нагрева для разрушения ковалентных связей и образования носителей тока. В современной технике особое значение приобрели германий и кремний. У кремния ширина запрещенной зоны выше, чем у германия, поэтому кремний при нагреве сохраняет высокие значения электрического сопротивления до больших температур. Это позволяет использовать кремниевые приборы для работы при более высоких температурах, чем германиевые. В полупроводниках с ковалентной связью проводимость электрического тока осуществляется как путем перемещения электронов (электронная – n-проводимость), так и путем перемещения дырок (дырочная – p-проводимость). Проводимость полупроводника определяется концентрацией заряженных частиц и их подвижностью – средней скоростью, приобретаемой под действием электрического поля. В «идеальных» кристаллах химически чистого полупроводника из германия и кремния из-за большей подвижности электронов преобладает электронная проводимость.

В реальных кристаллах химически чистых германия и кремния из-за наличия дефектов (вакансий, дислокаций, границ зерен и т.д.) может

превалировать дырочная проводимость. Проводимость в химически чистом полупроводнике называется собственной проводимостью.

Известно, что получить химически чистые элементы весьма сложно, поэтому полупроводники всегда содержат примеси, меняющие величину и характер проводимости. Для практического применения необходимо уметь создавать требуемую концентрацию примесей.

Электронная проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике, называется примесной.

6.2. Примесные полупроводники

Для большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники с широкой запрещенной зоной, у которых заметная концентрация собственных носителей заряда проявляется при высокой температуре. В этом случае в рабочем интервале температур поставщиками свободных носителей зарядов оказываются примеси.

Примесями в простых полупроводниках являются посторонние атомы, а также дефекты решетки: вакансии, дислокации, внедренные атомы и т.д.

Примеси резко изменяют собственную проводимость полупроводника. Потенциал ионизации у примесей меньше, чем у полупроводников, и поэтому они оказываются ионизированными раньше. Примеси могут поставлять электроны в зону проводимости полупроводника либо принимать их с уровней валентной зоны. Если в какой-либо узел кристаллической решетки полупроводника попадает атом другой валентности, система валентных связей окажется нарушенной.

При введении в узел решетки германия элемента пятой группы – мышьяка, имеющего на внешней орбите пять валентных электронов, четыре из них окажутся связанными и один слабо связанным – свободным (рис. 6.2,а). Этот электрон будет направленно перемещаться под воздействием электрического поля (электропроводимость типа n). Атом примеси – As, потерявший электрон, представляет собой положительно заряженную частицу, неподвижно закрепленную в данном месте решетки полупроводника. Примесь элементов пятой группы будет донорной. Для германия такими примесями являются мышьяк и сурьма, для кремния – фосфор и мышьяк.

Трехвалентный индий в решетке германия, имеющий три валентных электрона, создает в решетке дырку. Атом примеси может заимствовать электрон у соседнего атома германия и будет отрицательно заряженной частицей, неподвижно закрепленной в кристаллической решетке. При приложении электрического поля (рис. 6.2, б) электрон будет взят от левого атома германия, который получит заряд, в свою очередь захватит электрон у следующего, т.е. дырка будет

перемещаться справа налево, создавая электропроводимость типа p. На самом деле движутся только электроны, но их последовательное перескакивание с атома на атом, можно представить как движение дырки, перемещающейся в направлении поля. Такая примесь будет называться акцепторной.

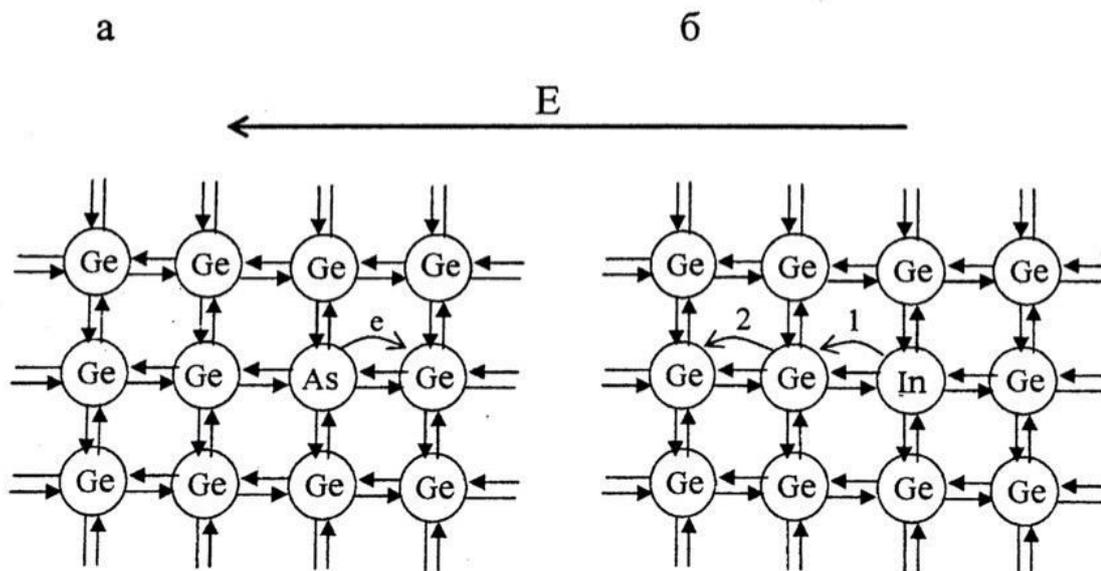


Рис. 6.2. Схематическое изображение кристаллической решетки германия:

а – с донорной примесью мышьяка;

б- с акцепторной примесью индия.

Некоторые физические свойства германия и кремния приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Физические свойства германия и кремния

Свойства	Si	Ge
Удельное электрическое сопротивление при 20°C, Ом·м	$2,3 \cdot 10^3$	0,68
Концентрация собственных носителей заряда при 20°C, м ⁻³	$3 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{19}$
Ширина запрещенной зоны при 20°C, эВ	1,12	0,75
Подвижность при 27°C, м ² /(В·с): электронов	0,14	0,39
Дырок	0,05	0,19

Для кремния при 27 °С подвижность электронов и дырок равна соответственно 0,135 и 0,048 м²/(В·с). Примеси, дефекты кристаллической решетки, тепловые колебания атомов вызывают рассеяние носителей, снижают их подвижность и приводят к неконтролируемым изменениям проводимости полупроводника. Частично это устраняется использованием монокристаллов, в которых плотность дефектов ниже.

Другой важной характеристикой полупроводников является время жизни примесных носителей электрического тока. В полупроводнике одновременно протекают два процесса: возникновение электронов и дырок и рекомбинация – возвращение электронов из зоны проводимости в валентную зону и ликвидация дырок. При определенной температуре между этими процессами устанавливается равновесие. Время, в течение которого от возникновения до рекомбинации живет носитель, называется временем жизни. Примеси и дефекты уменьшают время жизни носителей электрического тока и ухудшают работу приборов. Считается, что для хорошей работы полупроводниковых приборов время жизни должно быть не менее 10⁻⁵ с.

Для изготовления высококачественных приборов необходимы монокристаллы германия и кремния высокой химической чистоты с совершенной кристаллической структурой. Для получения нужного типа проводимости кристаллы легируют строго определенными дозами легирующих примесей.

Кроме химически чистых элементов, в полупроводниковой технике используются большая группа соединений разных групп периодической таблицы, это соединения элементов четвертой группы $A^{IV}B^{IV}$, третьей и пятой $A^{III}B^V$, второй и шестой $A^{II}B^{VI}$. Физические свойства некоторых из них представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Некоторые физические свойства полупроводниковых структур типа $A^{III}B^V$

Параметр	GaP	GaAs	GaSb	InP	InAs	InSb
1	2	3	4	5	6	7
Ширина запрещенной зоны при 27°С, эВ	2,26	1,43	0,70	1,35	0,36	0,18
Подвижность носителей заряда при 27°С, м ² /(В·с):						

1	2	3	4	5	6	7
Электронов	0,019	0,95	0,40	0,46	3,30	7,80
Дырок	0,012	0,045	0,14	0,015	0,046	0,075
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	0,01	0,004	0,0009	0,005	0,0003	0,00024

В полупроводниковых соединениях группы $A^{III}B^V$ (InSb, GaSb, InAs) примесные атомы замещения II группы (Mg, Zn), обладающие меньшей валентностью, являются акцепторами, а примесные атомы V группы (Se, Te), имеющие большую валентность, – донорами. Примесные атомы IV группы, в зависимости от того, какой атом соединения они заменяют могут быть и донорами и акцепторами.

В оксидах и сульфидах обладающих электропроводимостью n – и p – типов (PbS) избыток серы или примесь кислорода вызывает у них дырочную электропроводимость, а избыток металла – электронную.

В настоящее время известно около 1000 веществ, обладающих проводниковыми свойствами, которые находят самое широкое применение в различных отраслях науки и техники.

Германий. После сложной химической обработки получают слитки германия, которые служат исходным материалом для получения особо чистого германия методом зонной плавки или для получения монокристаллов методом вытягивания из расплава. Германий применяется для изготовления выпрямителей переменного тока, транзисторов, приборов для измерения напряженности магнитного поля, мощности, фототранзисторов, оптических линз для инфракрасных лучей, счетчиков ядерных излучений. Рабочий интервал температур германиевых приборов $-60...+70^{\circ}\text{C}$.

Кремний. Это самый распространенный элемент земной коры. Окончательная очистка кремния производится путем бестигельной зонной плавки при вертикальном расположении стержня. В настоящее время кремний является основным материалом для изготовления полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, процессоров, фотоэлементов схем микроэлектроники. Верхний интервал рабочих температур зависит от степени очистки и составляет $120\div 200^{\circ}\text{C}$.

Карбид кремния применяется в качестве резисторов, вентильных разрядников, низковольтных варисторов (нелинейных резисторов), силитовых стержней, служащих нагревателями электропечей до 1500°C .

Арсенид галлия. Применяется для изготовления фотоэлементов, дозиметров рентгеновских лучей, лазеров. Рабочая температура – до 450°C.

Это только малая часть разнообразных способов применения полупроводниковых материалов.

В общем виде полупроводниковые приборы имеют следующие преимущества: 1) малые габариты; 2) большой срок службы; 3) простота и надежность в работе; 4) малая потребляемая мощность; 5) экономичность в условиях массового производства; 6) возможность создания сложных кибернетических схем и т.д.

6.3. Специальные технологии получения полупроводников

Получение сверхчистых материалов. Для получения особо чистых элементов полупроводников разработаны различные методы, обеспечивающие высокую степень очистки: дисциляция (испарение жидкой фазы) – удаляет легко испаряющиеся примеси; сублимация (испарение твердой фазы) – очищает от механических примесей, газов и др. Кристаллографические методы основаны на различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазах. Схематическая диаграмма состояния германий – примесь с образованием твердого раствора последней в германии показана на рис. 6.3

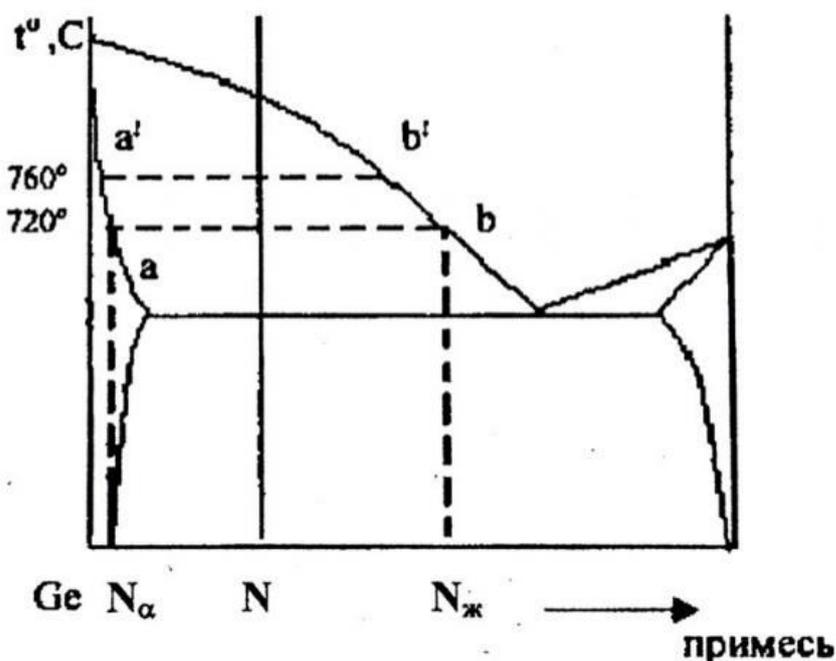


Рис.6.3. Схема диаграммы состояния системы “германий – примесь”

При общем содержании примесей, равном N при температуре 720°C содержание примесей в твердой фазе N_{α} значительно меньше, чем в жидкой фазе $N_{\text{ж}}$. Распределение примесей между фазами характеризуется коэффициентом K , который определяется отношением концентраций:

$$K = N_{\alpha} / N_{\text{ж}} .$$

Если $K < 1$, то при кристаллизации большая часть примесей оказывается в жидкой фазе.

Для очистки германия обычно применяется метод зонной плавки (рис.6.4). Стержень очищаемого германия 3 в графитовой лодочке 2 помещается в кварцевую трубку 1, в которой создается вакуум или подается инертный газ. Индуктор ТВЧ 4 расплавляет узкую область германиевого слитка 5, где и сосредотачивается большая часть примесей. Расплавленная зона вместе с индуктором перемещается в правую часть слитка, куда переходят и примеси. Процесс повторяется многократно, после чего правая часть слитка обрезается. Чем меньше коэффициент распределения K , тем лучше степень очистки. Методом зонной плавки (очистки) из германия можно удалить все примеси, кроме бора, у которого $K=1$.

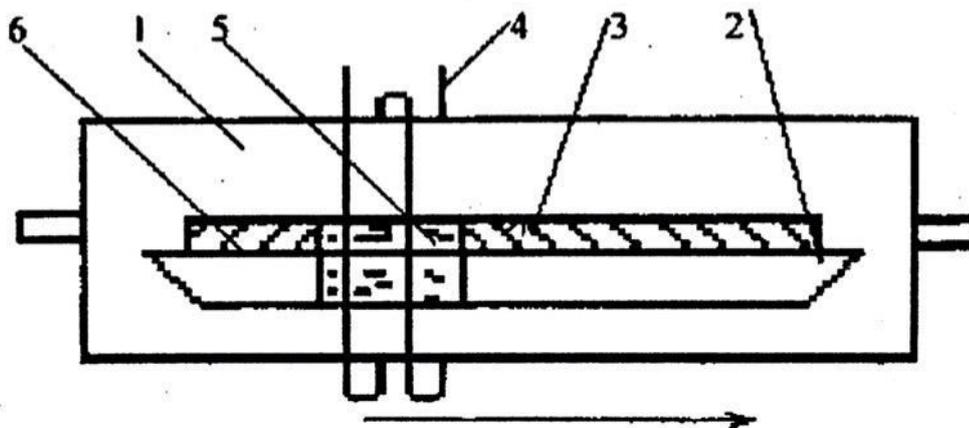


Рис. 6.4. Схема зонной плавки: 1 – кварцевая трубка; 2 – графитовая лодочка; 3 – слиток германия; 4 – индуктор ТВЧ; 5 – зона плавления; 6 – затвердевшая часть образца

Получение монокристаллов. Монокристаллы отличаются от поликристаллов меньшим количеством несовершенств. Применение германия и кремния высокой чистоты в монокристаллическом состоянии позволяет лучше использовать их полупроводниковые

свойства и свести к минимуму неконтролируемые изменения свойств. Монокристаллы получают в том случае, если созданы условия их роста только из одного центра кристаллизации. Существуют несколько методов, основанных на этом принципе. Важнейшими из них считаются методы Бриджмена и Чохральского.

Схема метода Бриджмена приведена на рис. 6.5,а. Германий 3, помещенный в конический тигель 2, нагревается в вертикальной трубчатой печи 1 выше температуры плавления, после чего тигель медленно выводится из печи. Первой начинает охлаждаться коническая часть тигеля 4, где и появляются первые центры кристаллизации. Монокристаллы вырастают из зародыша, у которого направления преимущественного роста совпадают с направлением движения тигеля. Рост других зародышей подавляется. Для непрерывного роста монокристалла необходимо, чтобы скорость перемещения тигеля примерно совпадала со скоростью роста кристалла.

Схема метода Чохральского приведена на рис. 6.5, б. Метод состоит в вытягивании монокристалла из расплава. В камере 1 создается вакуум. Затравка 2 из монокристалла с возможно более идеальной структурой вводится в поверхностный слой расплава 3. Затравка выдерживается некоторое время для оплавления и начинает медленно со скоростью 1-2 мм/мин выниматься из расплава. За счет поверхностного натяжения на затравке сохраняется жидкий германий 5, который за счет более низкой температуры начинает кристаллизоваться. Образующийся монокристалл наследует структуру затравки. Для получения симметричной формы штоку 6 (или ванне 4) сообщается медленное вращательное движение. Диаметр растущего монокристалла определяется температурой и скоростью вращения.

Для кремния рассмотренные выше методы неприменимы из-за высокой температуры плавления ($t_{пл} = 1414^{\circ}\text{C}$) и химической активности. При высокой температуре плавления кремний загрязняется материалами тигеля. Коэффициент распределения со многими примесями у кремния значительно больше, чем у германия. Для кремния применяется метод бестигельной зонной очистки (рис. 6.6). Прутки технического чистого кремния 1 укрепляются вертикально. В нижнюю часть укрепляется затравка 4 из монокристалла. Пруток нагревается индуктором ТВЧ 5 до начала оплавления затравки. Индуктор медленно поднимается вверх. На затравке кристаллизуется монокристалл 3. Примеси скапливаются в расплаве 2 и перемещаются вместе с ним вверх. Верхняя часть стержня отрезается. Процесс повторяется многократно.

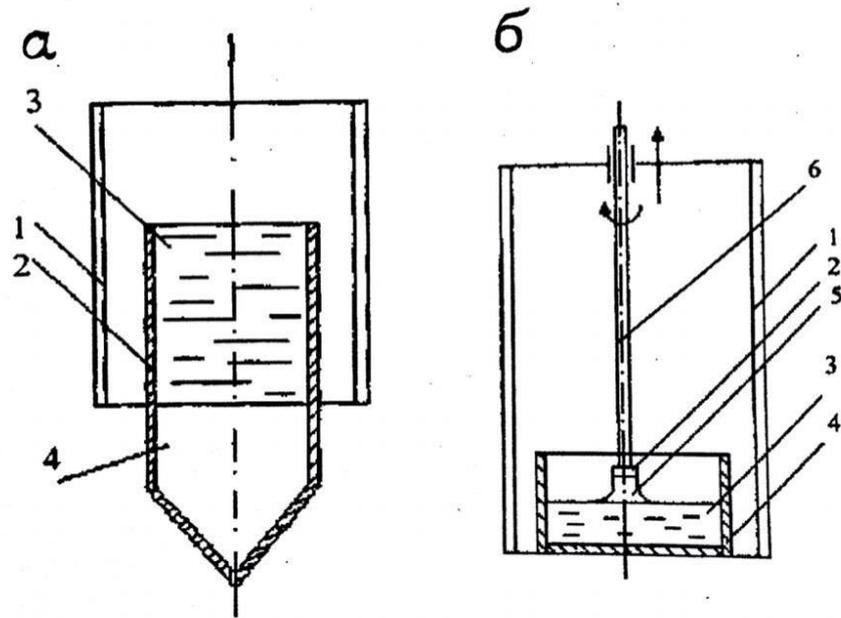


Рис. 6.5. Схемы установок для выращивания монокристаллов: а – по методу Бриджмена; б – по методу Чохральского

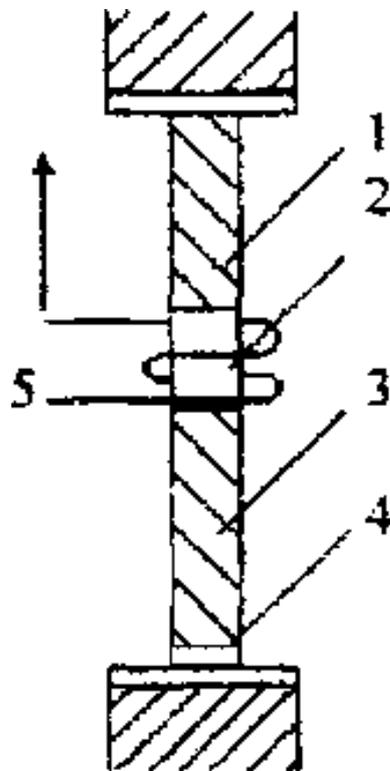


Рис. 6.6. Установка для бестигельной зонной очистки кремния

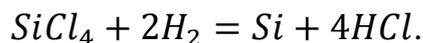
Легирование полупроводников. Чистые беспримесные полупроводники являются исходными материалами для создания приборов. На стыке зон разной проводимости создается электронно-дырочный р-п переход, позволяющий выпрямлять и усиливать ток, превращать энергию других видов в электрическую. Получение в монокристаллах определенной проводимости осуществляется специальным легированием очищенных германия и кремния микродозами легирующих элементов ($10^{-5} - 10^{-7}\%$). Введение легирующих примесей обычно осуществляется методом вытягивания монокристалла из расплава и методом зонного выравнивания. В обоих случаях легирующая примесь вводится в расплавленную зону. Степень легирования и степень очистки контролируется изменением электрического сопротивления.

Получение р-п переходов. Для получения р-п переходов используется диффузионный и сплаво-диффузионный методы и ионное легирование в тлеющем разряде. При диффузионном методе легирующая примесь попадает в пластинку полупроводника в результате диффузии из газовой фазы, содержащей легирующую примесь. На поверхности полупроводника легирующая примесь взаимодействует с атомами полупроводника и диффундирует в его поверхность, образуя твердый раствор. Метод дает возможность вводить примеси совместно, используя различные коэффициенты диффузии примесей. При диффузии донорной примеси в пластинку германия с р-проводимостью на некотором расстоянии от поверхности возникает р-п переход. Меняя температуру процесса и время выдержки, можно получать р-п переход на любой глубине. При введении в газовую среду одновременно донорной и акцепторной примесей можно сразу получить несколько р-п переходов за счет разной скорости их диффузии. Коэффициенты диффузии донорных примесей для германия больше, чем акцепторных. В кремнии диффундируют быстрее акцепторные примеси, следовательно, они проникают на большую глубину.

Получение пленок германия и кремния методом эпитаксии. Для изготовления полупроводниковых приборов монокристаллы германия и кремния режутся на тонкие пластинки. С увеличением толщины пластин возрастают потери и ухудшаются частотные характеристики. Получить при разрезании толщину пластин менее 100 мкм практически невозможно.

Метод эпитаксии позволяет получить высокоомные (более чистые) пленки германия и кремния толщиной 15-20 мкм, что значительно улучшает параметры приборов. Эпитаксильные пленки обычно выращивают на подложке монокристалла из того же материала методом водородного восстановления хлоридов.

Хлориды германия или кремния испаряются, транспортируются потоком водорода к подложке, где восстанавливаются по реакции:



Пары чистого полупроводника осаждаются на подогретой подложке. Этот же метод положен в основу получения легированных и сложных полупроводников. В этом случае, помимо хлоридов основного элемента, в камеру вводят хлориды или иные соединения легирующих элементов.

7. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

7.1. Свойства диэлектриков

Важнейшими свойствами диэлектриков являются электрические. К ним относят поляризацию, электропроводимость, диэлектрические потери и пробой. Также при выборе диэлектрического материала следует учитывать его тепловые свойства, важнейшим из которых является нагревостойкость, и механические свойства (см. раздел 1.3).

Поляризация диэлектриков. Диэлектрик, помещенный между электродами, к которым подводится электрическое напряжение, поляризуется. Поляризация представляет собой процесс, состоящий в ограниченном смещении или ориентации связанных зарядов в диэлектрике при воздействии на него электрического поля.

В диэлектрике, как и в любом другом веществе, всегда имеются связанные заряды: электроны оболочек атома, атомные ядра, ионы. Под действием внешнего электрического поля связанные электрические заряды смещаются относительно равновесного положения: положительные – к отрицательному электроду, а отрицательные – к положительному. Смещенные заряды создают собственное внутреннее электрическое поле, которое направлено противоположно внешнему.

В глубине диэлектрика смещенные положительные и отрицательные заряды взаимно компенсируются, но на поверхности диэлектрика остаются нескомпенсированные электрические заряды. При этом у внутренней поверхности отрицательного электрода образуются нескомпенсированные положительные заряды, а у внутренней поверхности положительного – отрицательные.

Мерой поляризации является относительная диэлектрическая проницаемость ε

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_0},$$

где, C_d - емкость конденсатора, когда между его пластинами находится данный диэлектрик;

C_0 - емкость конденсатора, когда между его пластинами находится вакуум.

Чем выше значение диэлектрической проницаемости, тем сильнее поляризуется диэлектрик.

В твердом диэлектрике обычно проявляется несколько видов поляризации, которые в сумме определяют величину ϵ . Конструкционные диэлектрики общего применения имеют небольшое значение ϵ - до $10 \div 12$. Диэлектрики, которые используются в конденсаторах, должны иметь высокие значения ϵ , чтобы увеличить емкость конденсатора. У конденсаторных диэлектриков ϵ меняется от $12 \div 15$ до 100 000.

Электропроводимость диэлектриков. Диэлектрические материалы обладают незначительной электропроводностью, которая связана с направленным перемещением свободных заряженных частиц – электронов или ионов. Основное значение для диэлектрических материалов имеет ионная электропроводимость, которая обусловлена прежде всего наличием примесей.

Различают объемную и поверхностную электропроводность диэлектриков. Каждая из них характеризуется своим удельным электрическим сопротивлением – объемным ρ_V (Ом · м) и поверхностным ρ_S (Ом).

Удельное объемное электрическое сопротивление численно равно сопротивлению образца данного материала в виде кубика единичных размеров, когда напряжение прикладывается к двум его противоположным граням.

$$\rho_V = R_V \frac{S}{b},$$

где, R_V – объемное сопротивление образца постоянному току, Ом;

S – площадь электродов, контактирующих с испытуемым образцом, м²;

b – толщина образца, м.

Удельное объемное электрическое сопротивление определяет свойства изоляции, когда основные утечки тока происходят через объем материала, например, в экранированном электрическом проводе. Диэлектрики имеют высокое удельное сопротивление $\rho_V \leq 10^{12}$ Ом · м. При нагреве оно понижается в результате роста подвижности ионов. Чем выше содержание примесей в диэлектрике, тем меньше удельное объемное сопротивление.

Удельное объемное электрическое сопротивление численно равно сопротивлению образца данного материала в виде кубика единичных размеров при прохождении тока через две его противоположные стороны:

$$\rho_S = R_S \frac{l}{h},$$

где, R_S - поверхностное сопротивление образца постоянному току, Ом;

l – длина электродов, м;

h – расстояние между двумя электродами, м.

Поверхностное электрическое сопротивление зависит не только от состава и структуры диэлектрика, но и от состояния его поверхности и влажности среды. Загрязнения и влага на шероховатой или пористой поверхности могут образовать проводящую пленку, за счет чего диэлектрик может утратить изоляционные свойства, хотя его объемное сопротивление при этом останется высоким. Для повышения поверхностного электрического сопротивления поверхность изделий стремятся сохранить чистой и гладкой, используя для этого покрытия – лаки и эмали.

Диэлектрические потери. При воздействии электрического поля на любое вещество часть потребляемой им электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается. Рассеянную часть поглощенной диэлектриком электрической энергии называют диэлектрическими потерями. Диэлектрические потери проявляются, прежде всего, на переменном токе. При частотах свыше 20 кГц величина потерь становится одним из самых важных параметров диэлектрика.

Для определения потерь диэлектрик рассматривается как конденсатор в цепи переменного тока. У идеального конденсатора угол сдвига φ между током I и напряжением U равен 90° (рис. 7.1, а), поэтому активная мощность $P_A = I \cdot U \cdot \cos\varphi$ равна нулю.

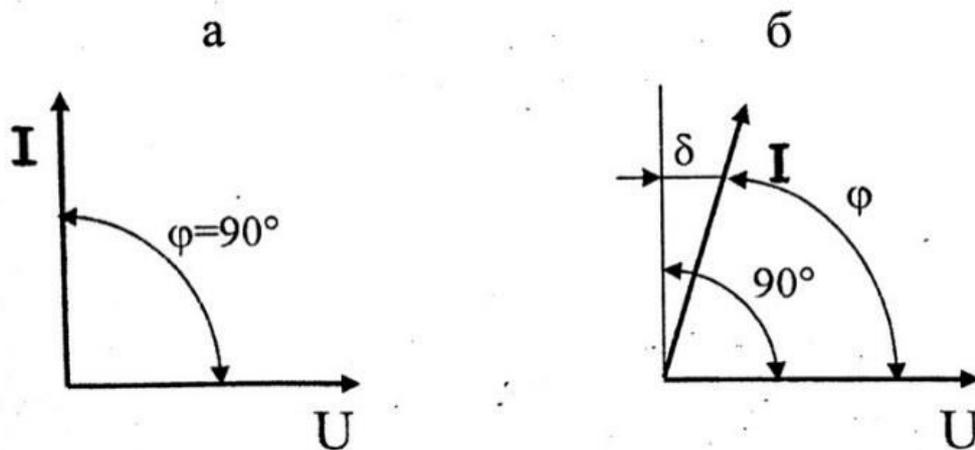


Рис. 7.1. Векторные диаграммы идеального (а) и реального (б) диэлектриков

Диэлектрик не является идеальным конденсатором, и угол сдвига фаз у него меньше 90° на угол δ (рис. 7.1, б). Этот угол называют углом диэлектрических потерь. Тангенс этого угла и диэлектрическая проницаемость ε характеризуют удельные потери на единицу объема диэлектрика, Вт/м³:

$$P = k \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

где k – коэффициент;

E – напряженность электрического поля, в/м;

f – частота поля, Гц.

Произведение $\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ называют коэффициентом диэлектрических потерь. По величине тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрики делятся на низкочастотные, у которых $\operatorname{tg} \delta = 0,1 \div 0,01$, и высококачественные, у которых $\operatorname{tg} \delta < 0,01$. Чем выше тангенс угла диэлектрических потерь, тем больше нагрев диэлектрика в электрическом поле заданной частоты и напряжения. Основными источниками диэлектрических потерь являются поляризация и электропроводимость диэлектриков, ионизация газов в имеющихся порах и неоднородности структуры из-за примесей и включений.

Пробой диэлектрика – это образование в нем проводящего канала под действием электрического поля. Полный пробой происходит, когда проводящий канал переходит от одного электрода к другому и замыкает их. Неполный пробой происходит, когда проводящий канал не достигает хотя бы одного из электродов. При полном пробое происходит необратимое разрушение твердого диэлектрика под действием электрического поля и потеря изолирующих свойств.

Минимальное напряжение, приводящее к пробую, называют пробивным напряжением $U_{\text{пр}}$. Пробивное напряжение возрастает с увеличением толщины диэлектрика h . Поэтому для характеристики способности диэлектрического материала противостоять разрушению в электрическом поле используют электрическую прочность $E_{\text{пр}}$, представляющую собой напряженность электрического поля, при которой произошел пробой,

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

Различают три вида пробоя: электрический, тепловой и электрохимический.

Электрический пробой происходит практически мгновенно под действием поля большой напряженности при включении напряжения

или при его резком скачке. Он возникает вследствие ударной ионизации нарастающей лавиной электронов.

Тепловой пробой наступает при комбинированном воздействии электрического поля и нагрева. При этом электрическая прочность диэлектрика из-за повышения температуры снижается. Тепловой пробой ускоряется при повышении частоты и ухудшении отвода теплоты в окружающую среду.

Электрохимический пробой возникает при длительном действии поля, которое сопровождается необратимыми изменениями в структуре диэлектрика и понижением его электрической прочности.

Нагревостойкость диэлектриков – это их способность выдерживать повышенные температуры без недопустимого ухудшения свойств.

В зависимости от вида материала высокая температура может вызвать в диэлектрике различные изменения. У некоторых материалов при нагревании наблюдается химическое разложение, интенсивное окисление, обугливание и даже горение. В других случаях результатом воздействия повышенной температуры является появление больших остаточных напряжений, которые нарушают форму изделия. У ряда материалов при высокой температуре наблюдается заметное ухудшение рассмотренных выше электрических параметров (повышение $tg\delta$ или снижение ρ_V), не сопровождаемое какими-либо видимыми внешними изменениями.

При длительном воздействии высокой температуры может происходить тепловое старение материалов, которое является результатом медленно протекающих химических процессов. Тепловое старение ускоряется при воздействии ультрафиолетовых лучей, электрического поля, механических нагрузок и т.п.

Одним из наиболее часто применяемых методов оценки нагревостойкости является определение теплостойкости по Мартенсу. Испытываемые образцы, к которым приложено изгибающее усилие 5 Мпа, нагревают со скоростью 1°C/с. Температура, при которой образец прогнется на 6 мм от первоначального положения или сломается, представляет собой теплостойкость по Мартенсу.

Для электроизоляционных материалов установлено семь классов нагревостойкости:

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	G
Предельно допустимая рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	Выше 180

К классу Y относятся волокнистые материалы на основе целлюлозы, шелка, если они не пропитаны (пряжа, бумага, ткани,

картон). К классу А относятся те же материалы, пропитанные смолами, лаками и т.п. Класс Е объединяет пластмассы с органическими наполнителями. К классу В относятся органические материалы с большим количеством наполнителей (слюдой, стекловолокном, асбестом). Класс F включает изделия на основе стекловолокна со связующими повышенной нагревостойкости. К классу Н относятся материалы на основе особо нагревостойких кремнийорганических смол. Класс G объединяет чисто неорганические материалы (слюда, стекло, кварц, асбест), а из органических - только фторопласт-4.

7.2. Пластические массы

Свойства, состав и классификация пластмасс. Пластическими массами (пластмассами) называются материалы, получаемые на основе природных или синтетических полимеров. Пластмассы являются важнейшими современными конструкционными материалами. Они обладают рядом ценных свойств: малой плотностью (до 2 г/см³), высокой удельной прочностью, низкой теплопроводностью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, звукоизоляционными свойствами. Некоторые пластмассы обладают оптической прозрачностью, фрикционными и антифрикционными свойствами, стойкостью к истиранию и др. Кроме того, пластмассы имеют хорошие технологические свойства: легко формируются, прессуются, обрабатываются резанием, их можно клеивать и сваривать. Недостатками пластмасс являются низкая теплостойкость, низкая ударная вязкость, для ряда пластмасс - склонность к старению.

Основой пластмасс являются полимерные связующие вещества. Кроме связующих в состав пластмасс входят: наполнители для повышения прочности и придания специальных свойств; пластификаторы для повышения пластичности, что необходимо при изготовлении изделий из пластмасс; отвердители, ускоряющие переход пластмасс в неплавкое, твердое и нерастворимое состояние; стабилизаторы, предотвращающие или замедляющие процесс старения; красители.

По поведению при нагреве все пластмассы делятся на термопластичные и термореактивные. Термопластичные при неоднократном нагревании и охлаждении каждый раз размягчаются и затвердевают. Термореактивные при нагревании размягчаются, затем еще до охлаждения затвердевают (вследствие протекания химических реакций) и при повторном нагревании остаются твердыми.

По виду наполнителя пластмассы делятся на порошковые, волокнистые, слоистые, газонаполненные и пластмассы без наполнителя.

По способу переработки в изделия пластмассы подразделяются на литьевые и прессовочные. Литьевые перерабатываются в изделия методами литьевого прессования и являются термопластичными. Прессовочные перерабатываются в изделия методами горячего прессования и являются терморективными.

По назначению пластмассы делятся на конструкционные, химически стойкие, прокладочные и уплотнительные, фрикционные и антифрикционные, теплоизоляционные и теплозащитные, электроизоляционные, оптически прозрачные, облицовочно-декоративные и отделочные.

Пластмассы без наполнителя чаще всего являются термопластичными материалами. Рассмотрим наиболее важные из них.

Полиэтилен $(-CH_2 - CH_2-)_n$ – продукт полимеризации бесцветного газа – этилена. Различают полиэтилен, получаемый полимеризацией при высоком давлении (ВД), среднем давлении (СД) и при низком давлении (НД). Один из самых легких материалов, имеет высокую эластичность, химически стоек, морозостоек. Недостатки – склонность к старению и невысокая теплостойкость (до 60°C). Благодаря высоким электроизоляционным свойствам используется для изготовления изоляционной пленки, изоляции проводов и кабелей, каркасов катушек, деталей, работающих в цепях высокой частоты. Также применяется для изготовления коррозионно-стойких труб, уплотнительных деталей, тары и упаковки. Занимает первое место в общем объеме производства пластмасс.

Полипропилен $(-CH_2 - CHC_6H_5-)_n$ - продукт полимеризации газа пропилена. По электроизоляционным свойствам и применению аналогичен полиэтилену, но более теплостоек (до 150°C) и менее морозостоек (до -10°C).

Поливинилхлорид $(-CH_2 - CHCl-)_n$ обладает несколько пониженными электрическими свойствами, но его удельное сопротивление почти не меняется при повышении температуры до 90°C. Используется для производства винипласта и пластиката. Винипласт представляет собой твердый листовый материал, полученный из поливинилхлорида без добавки пластификаторов. Обладает высокой прочностью, химической стойкостью, электроизоляционными свойствами, низкой гигроскопичностью. Пленки из винипласта применяют для изоляции водопогруженных электродвигателей, разделения катодных и анодных пластин в аккумуляторных батареях и в другой электрической аппаратуре, работающей в условиях повышенной влажности и воздействия кислот. Пластикат получают при добавлении в поливинилхлорид пластификаторов, повышающих его пластичность и морозостойкость. Его применяют для изготовления пленок, изоляционных лент, изоляции монтажных и телефонных проводов, в качестве специальных светостойких и шланговых материалов.

Полистирол $(-\text{CH}_2 - \text{CHC}_6\text{H}_5-)_n$ – твердый, жесткий, прозрачный полимер. Имеет очень хорошие электроизоляционные свойства, являясь одним из лучших высокочастотных диэлектриков. Его недостатки – низкая теплостойкость, склонность к старению и растрескиванию. Используется в радио- и электротехнической промышленности для изготовления каркасов индуктивных катушек, корпусов радиоприемников и телевизоров, плат переключателей, для изоляции кабелей и конденсаторов.

Органическое стекло (полиметилметакрилат, плексиглас) – прозрачный термопластичный материал на основе полиакриловой смолы. Отличается высокой оптической прозрачностью, в 2 раза легче минеральных стекол, обладает химической стойкостью. Недостатки – низкая твердость и низкая теплостойкость. Используется для остекления в автомобиле- и самолетостроении, для прозрачных деталей в приборостроении.

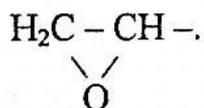
Фторопласты имеют наибольшую термическую и химическую стойкость из всех термопластичных полимеров. Фторопласт-4 $(-\text{CF}_2 - \text{CF}_2-)_n$ водостоек, не горит, не растворяется в обычных растворителях, обладает электроизоляционными и антифрикционными свойствами. За рубежом выпускается под названием тефлон. Применяется для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах при высокой температуре, электроизоляции и др. Из него изготавливаются тонкие конденсаторные и электроизоляционные пленки толщиной 5...200 мкм. Фторопласт-3 $(-\text{CF}_2 - \text{CFCl}-)_n$ по свойствам и применению аналогичен фторопласту-4, уступая ему по термо- и химической стойкости и превосходя по прочности и твердости.

Термореактивные смолы являются основой термореактивных пластмасс, которые обычно содержат различные наполнители. Поэтому смолы должны обладать высокой клеящей способностью, а также теплостойкостью, химической стойкостью, простотой переработки, небольшой усадкой. Температурные коэффициенты расширения смолы и наполнителя должны быть близки по величине.

Фенолформальдегидные смолы получают в результате реакции поликонденсации между фенолом $\text{H}_5\text{C}_6 - \text{OH}$ и формальдегидом H_2CO . Эти смолы называются также бакелитовыми. Поликонденсация производится при высокой температуре в присутствии катализатора. При избытке фенола и использовании кислого катализатора получается термопластичная новолачная смола с линейной структурой макромолекулы. Избыток формальдегида и использование щелочного катализатора приводит к образованию термореактивной резольной смолы, имеющей макромолекулу с пространственной структурой. Пластмассы, полученные на основе фенолформальдегидных смол называют фенолпластами.

Карбамидные (мочевино-формальдегидные) смолы получают в результате реакции поликонденсации карбамида (мочевины) и формальдегида в присутствии кислотного или щелочного катализатора. Пластмассы на основе этих смол называют аминопластами. Быстрое твердение карбамидных смол при нормальной температуре и хорошая сцепляемость с другими материалами позволяет использовать их для приготовления клеев.

Эпоксидные смолы представляют собой вязкие низкомолекулярные жидкости, молекулы которых содержат эпоксидную группу



При добавке отвердителей происходит полимеризация эпоксидных смол, они затвердевают и приобретают пространственное сетчатое строение. Эпоксидные смолы проявляют высокую адгезию как к наполнителям, так и к различным конструкционным материалам (металлам, стеклу, керамике), что позволяет использовать их в качестве клеев.

Кремнийорганические смолы содержат в молекулярной цепи макромолекул чередующиеся атомы кислорода и кремния. Отверждение этих смол происходит при нагревании. Связь между атомами кислорода и кремния имеет большую прочность, чем между атомами углерода. Поэтому кремнийорганические полимеры имеют высокую теплостойкость.

Полиэфирные смолы получают в результате реакции поликонденсации спиртов и органических кислот или их ангидридов. Из полиэфирных наибольшее распространение получили глифталевые смолы, получаемые поликонденсацией глицерина и фталиевого ангидрида. Эти смолы отверждаются при относительно высоких температурах и медленно. Глифталевые смолы применяют при производстве лаков и клеев.

Слоистые пластмассы получают прессованием (или намоткой) слоистых наполнителей, пропитанных смолой. Они обычно выпускаются в виде листов, плит, труб, из которых механической обработкой получают различные детали.

Текстолит – это материал, полученный прессованием пакета кусков хлопчатобумажной ткани, пропитанной смолой. Обладает хорошей способностью поглощать вибрационные нагрузки, электроизоляционными свойствами. Теплостоек до 80°C. Промышленность выпускает текстолит конструкционный и электротехнический. Электротехнический текстолит выпускается в виде листов толщиной 0,5...8 мм и плит толщиной 8...50 мм. Применяется как конструкционно-изоляционный материал для изготовления изделий,

которые подвергаются ударным нагрузкам, истиранию, но не требуют очень высоких электроизоляционных свойств (детали переключателей, панели, каркасы, щиты).

Стеклотекстолит отличается от текстолита тем, что в качестве наполнителя используется стеклоткань. Более прочен и теплостоек, чем текстолит, имеет лучшие электроизоляционные свойства, повышенную влагостойкость. Выпускается в виде листов толщиной 0,5...8 мм и плит толщиной 9...35 мм.

В асботекстолите наполнителем является асбестовая ткань. Кроме электроизоляционных, он имеет хорошие теплоизоляционные и фрикционные свойства. Выпускается в виде плит толщиной 6...30 мм.

Гетинакс представляет собой материал, полученный прессованием нескольких слоев бумаги, пропитанной смолой. Он обладает хорошими электроизоляционными свойствами, устойчив к действию химикатов, может применяться при температуре до 120 - 140°C. Гетинакс значительно дешевле текстолита, так как стоимость бумаги значительно ниже стоимости ткани. Выпускается гетинакс в виде листов и плит толщиной 0,4...50 мм, а также в виде трубок и цилиндров, из которых изготавливают каркасы катушек и изоляционные трубки диаметром 10...80 мм с толщиной стенок 1,5...5 мм.

Стекловолокнистый анизотропный материал (СВАМ) получают прессованием листов стеклошпона, пропитанных смолой. Стеклошпон изготавливается из стеклянных нитей, которые склеиваются между собой сразу после изготовления. Листы стеклошпона располагаются в материале так, чтобы волокна соседних листов располагались под углом 90°. СВАМ обладает высокой прочностью, хорошими электроизоляционными свойствами, теплостоек до 200 - 400°C.

Фольгированные слоистые пластмассы используются в качестве оснований для печатных плат. Они представляют собой слоистые пластмассы облицованные с одной или двух сторон металлической фольгой. Фольгированные слоистые диэлектрики должны иметь высокую электрическую прочность и высокое удельное сопротивление, большой диапазон рабочих температур, малые значения диэлектрической проницаемости коэффициента линейного расширения, хорошую сцепляемость с токопроводящим покрытием, повышенную влагостойкость, достаточную механическую прочность.

В качестве слоистых пластмасс для фольгирования чаще всего используют гетинакс, стеклотекстолит и армированный фторопласт.

Фолигированный гетинакс представляет собой гетинакс, облицованный медной фольгой. Выпускается в виде листов марок ГФ-1-35, ГФ-2-50 и др. Буквы ГФ означают гетинакс фольгированный, первая цифра означает толщину листа в миллиметрах, вторая – толщину фольги в микронах. Применяют его для изготовления печатных плат

радиоэлектронной аппаратуры, работающей в диапазоне частот до 10^6 Гц.

Фольгированный стеклотекстолит представляет собой стеклотекстолит, облицованный медной фольгой. Выпускается большое число марок фольгированного стеклотекстолита типа СФ-1-35 или СФ-1-Н-50. Принцип маркировки такой же как у фольгированного гетинакса, буква Н означает повышенную нагревостойкость материала. Применяют для изготовления печатных плат радиоэлектронной аппаратуры, работающих при температурах до 200°C в диапазоне частот до 10^{10} Гц.

Фольгированный армированный фторопласт-4 (ФАФ-4) представляет собой слоистый пластик, полученный горячим прессованием стеклоткани, пропитанной суспензией фторопласта-4Д, и облицованный с двух сторон медной фольгой толщиной 50 мкм. Используют для изготовления печатных плат, работающих в интервале температур -60°C до $+250^{\circ}\text{C}$ на частотах до 10^6 Гц.

Волокнистые пластмассы представляют собой композиции из волокнистого наполнителя, пропитанного смолой. Они делятся на волокниты, асбоволокниты и стекловолокниты.

В волокнитах в качестве наполнителя применяется хлопковое волокно. Они используются для относительно крупных деталей общетехнического назначения с повышенной стойкостью к ударным нагрузкам. Асбоволокниты имеют наполнителем асбест – волокнистый минерал, расщепляющийся на тонкое волокно диаметром 0,5 мкм. Обладают высокой теплостойкостью до 200°C , устойчивостью к ударным воздействиям, химической стойкостью, электроизоляционными и фрикционными свойствами. Стекловолокниты имеют в качестве наполнителя короткое стекловолокно или стеклонити. Прочность, электроизоляционные свойства и водостойкость стекловолокнитов выше, чем у волокнитов. Применяются для изготовления деталей, обладающих повышенной прочностью.

В порошковых пластмассах в качестве наполнителя используют органические порошки (древесная мука, порошкообразная целлюлоза) и минеральные порошки (молотый кварц, тальк, цемент, графит). Эти пластмассы обладают невысокой прочностью, низкой ударной вязкостью, электроизоляционными свойствами. Пластмассы с органическими наполнителями применяются для ненагруженных деталей общетехнического назначения – корпусов приборов, рукояток, кнопок. Минеральные наполнители придают порошковым пластмассам химическую стойкость, водостойкость, повышенные электроизоляционные свойства.

Рассмотренные выше пластмассы со слоистыми, волокнистыми и порошковыми наполнителями имеют чаще всего терморезистивные

связующие, хотя имеются пластмассы с термопластичными связующими.

Газонаполненные пластмассы представляют собой материалы на основе синтетических смол, содержащие газовые включения. В пенопластах поры, заполненные газом, не соединяются друг с другом и образуют замкнутые объемы. Они отличаются малой плотностью ($0,02 - 0,2 \text{ г/см}^3$), высокими тепло-, звуко- и изоляционными свойствами, водостойкостью. Недостатки пенопластов – низкая прочность и низкая теплостойкость (до 60°C). Используются для теплоизоляции и звукоизоляции, изготовления потопляемых плавучих средств, в качестве легкого заполнителя различных конструкций. Мягкие виды пенопластов используются для изготовления мебели, амортизаторов и т.п.

Поропласты – это газонаполненные пластмассы, поры которых сообщаются между собой. Их плотность составляет $0,02 - 0,5 \text{ г/см}^3$. Они представляют собой мягкие эластичные материалы, обладающие водопоглощением.

В табл. 7.1. приведены свойства некоторых видов пластмасс.

Таблица 7.1

Электрические свойства пластмасс

Материал	ρ_V , Ом · м	$\text{tg } \delta$ (при 10^6 Гц)	ϵ (при 10^6 Гц)	$E_{\text{пр}}$, МВ/м
Полиэтилен ВД	10^{14} $\div 10^{16}$	$0,0002 \div 0,0003$	$2,3 \div 2,4$	$45 \div 60$
Полиэтилен НД	10^{14} $\div 10^{16}$	$0,0002 \div$ $0,0004$	2,3	$45 \div 50$
Полистирол	10^{15}	0,0004	2,6	$20 \div 23$
Фторопласт-4	10^{15} $\div 10^{18}$	0,0002	$2,0 \div 2,1$	$25 \div 27$
Фторопласт-3	10^{14} $\div 10^{15}$	0,01	$2,3 \div 2,8$	$20 \div 25$
Органическое стекло	10^{10}	0,2	2,9	$25 \div 40$
Фенопласт порошковый	10^9	$0,2 \div 0,3$	$4,5 \div 8,0$	15
Стекловолокнит	$10^{10} \div 10^{12}$	0,05	8,0	13
Гетинакс	10^8	0,08	6	$12 \div 16$
Текстолит	10^8	0,07	7	$5 \div 8$
Стеклотекстолит	$5 \cdot 10^8$	$0,01 \div 0,02$	$5,3 \div 5,7$	$7 \div 9$

7.3. Резиновые материалы

Резина представляет собой искусственный материал, получаемый в результате специальной обработки резиновой смеси, основным компонентом которой является каучук. Каучук – это полимер, отличительной особенностью которого является способность к очень большим обратимым деформациям при небольших нагрузках. Это свойство объясняется строением каучука. Его макромолекулы имеют вытянутую извилистую форму. При нагрузке происходит выпрямление макромолекул, что и объясняет большие деформации. При разгрузке макромолекулы принимают исходную форму. Различают натуральный и синтетический каучук. Натуральный каучук добывают из некоторых видов тропических растений в незначительных количествах. Поэтому производство резины основано на применении синтетических каучуков. Сырьем для производства синтетического каучука служит спирт, на смену которого приходит нефтехимическое сырье.

Резину получают из каучука путем вулканизации, т.е. в процессе химического взаимодействия каучука с вулканизатором при высокой температуре. Вулканизатором чаще всего является сера. В процессе вулканизации сера соединяет невидимые молекулы каучука и образуется пространственная сетчатая структура. В зависимости от количества серы получается различная частота сетки. При введении 1 – 5% серы образуется редкая сетка и резина получается мягкой. С увеличением содержания серы сетка становится все более частой, а резина более твердой, и приблизительно при 30% серы получается твердый материал, называемый эбонитом.

Кроме каучука и вулканизатора в состав резины входит ряд других веществ. Наполнители составляют 15 до 50% от массы каучука. Активные наполнители (сажа, оксид цинка и др.) служат для повышения механических свойств резин. Неактивные наполнители (мел, тальк и др.) снижают стоимость резиновых изделий. Пластификаторы (парафин, вазелин, стеариновая кислота, мазут, канифоль и др.) предназначены для облегчения переработки резиновой смеси, повышения эластичности и морозостойкости резины. Противостарители служат для замедления процесса старения резины, приводящего к ухудшению ее эксплуатационных свойств. Красители служат для придания резине нужного цвета. В резину также добавляются регенераторы – продукты переработки старых резиновых изделий и отходы резинового производства. Они снижают стоимость резин.

Основное свойство резины – очень высокая эластичность. Резина способна к большим деформациям, которые почти полностью обратимы. Кроме того, резина характеризуется высоким сопротивлением разрыву и истиранию, газо- и водонепроницаемостью, химической стойкостью,

хорошими электроизоляционными свойствами, небольшой плотностью, малой сжимаемостью, низкой теплопроводностью.

По назначению различают резины общего и специального назначения. Из резин общего назначения изготавливаются автомобильные шины, транспортные ленты, ремни ременных передач, изоляция кабелей, рукава и шланги, уплотнительные и амортизационные детали, обувь и др. Резины общего назначения могут использоваться в горячей воде, в слабых растворах щелочей и кислот, а также на воздухе при температуре от -10 до +150°C.

Резины специального назначения подразделяются на теплостойкие, которые могут работать при температуре до 250 - 350°C; морозостойкие, выдерживающие температуру до -70°C; маслобензостойкие, работающие в среде бензина, других видов топлива, масел и нефтепродуктов; светоозоностойкие, не разрушающиеся при работе в атмосферных условиях в течение нескольких лет, стойкие к действию сильных окислителей; электроизоляционные, применяемые для изоляции проводов и кабелей; электропроводящие, способные проводить электрический ток.

В качестве диэлектрического материала резина применяется для изоляции проводов и кабелей, изготовления прокладок, шайб, изолирующих трубок, специальных электроизоляционных перчаток и обуви, электроизоляционных ковриков. Электротехнические свойства электроизоляционных резин находятся в следующих пределах: удельное объемное электрическое сопротивление $\rho_V = 10^9 \div 10^{13}$ Ом·м, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2,5 \div 4$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta = 0,005 \div 0,01$.

7.4. Керамика

Керамика – это неорганический минеральный материал, получаемый из отформованного минерального сырья путем спекания при высоких температурах (1200 - 2500°C). Структура керамики состоит из кристаллической, стекловидной (аморфной) и газовой фазы. Кристаллическая фаза является основой керамики, ее количество составляет до 100%. Она представляет собой различные химические соединения и твердые растворы. Стекловидная фаза находится в керамике в виде прослоек стекла. Ее количество составляет до 40%. Она снижает качество керамики. Газовая фаза представляет собой газы, находящиеся в порах керамики.

По назначению керамика может быть разделена на строительную, бытовую и художественно-декоративную, техническую (в том числе, электротехническую). Строительная (например кирпич) и бытовая (например посуда) чаще всего имеет в структуре газонаполненные поры

и изготавливается из глины. Техническая керамика имеет почти однофазную кристаллическую структуру и изготавливается из чистых оксидов (реже - карбидов, боридов или нитридов). Основные оксиды, используемые для производства керамики: Al_2O_3 , ZnO_2 , MgO , CaO , BeO . Техническая керамика используется в качестве огнеупорного, конструкционного и инструментального материала. Она обладает высокой прочностью при сжатии и низкой при растяжении. Главный недостаток керамики – высокая хрупкость.

Электротехническая и радиотехническая керамика подразделяется на 10 классов. По назначению она делится на конденсаторную (I – V классы) и установочную керамику (VI – X классы).

Конденсаторная керамика должна иметь высокую диэлектрическую проницаемость, малый тангенс угла диэлектрических потерь, электрическую и механическую прочность. Основными компонентами сырья при изготовлении конденсаторной керамики являются оксиды титана, олова, циркония, стронция, кальция, магния, алюминия и др.

Высокочастотная конденсаторная керамика не должна иметь слишком больших значений диэлектрической проницаемости во избежание потерь. Она отличается высоким содержанием кристаллической фазы. Высокочастотная керамика подразделяется на I, II и III классы.

Керамика I класса изготавливается на основе титаната стронция $SrTiO_3$ или титаната кальция $CaTiO_3$. Применяется эта керамика для изготовления высокочастотных конденсаторов, к которым не предъявляются требования стабильной емкости.

Керамика II класса изготавливается на основе твердых растворов цирконата кальция $CaZrO_3$ и титаната кальция $CaTiO_3$ или нитратов алюминия и кальция. Эта керамика применяется для изготовления термокомпенсирующих и разделительных конденсаторов высокого и низкого напряжения.

Керамика III изготавливается на основе твердых растворов стоната кальция $CaSnO_3$, титаната кальция $CaTiO_3$, цирконата кальция $CaZrO_3$, а также нитратов алюминия и кальция. Она отличается высокой термостабильностью и применяется для контурных конденсаторов высокой стабильности.

Низкочастотная конденсаторная керамика характеризуется высоким значением диэлектрической проницаемости и относительно большим тангенсом угла диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость низкочастотной керамики имеет нелинейную зависимость от температуры и напряженности электрического поля, поэтому эту керамику называют нелинейной. Ее делят на IV и V классы.

Керамика IV класса изготавливается на основе твердых растворов титанатов стронция $SrTiO_3$ и висмута $Bi_4Ti_3O_{12}$. Используют эту

керамику для изготовления низкочастотных конденсаторов и однополярных видеоимпульсных конденсаторов.

Керамику V класса изготавливают на основе твердых растворов титаната и цирконата бария, титаната висмута, ниобатов свинца, стронция и кальция. Эту керамику используют для изготовления разделительных и блокировочных конденсаторов.

Установочная керамика применяется для изготовления изделий, которые подвергаются механической нагрузке: изоляторов, колодок, плат, каркасов, катушек и т.д. Поэтому наряду с хорошими электроизоляционными свойствами она должна иметь высокую механическую прочность.

Высокочастотная установочная керамика используется для изготовления различных деталей радиоэлектронной аппаратуры, которые подвергаются механической нагрузке. Эта керамика характеризуется низким тангенсом угла диэлектрических потерь в области высоких частот и его малой зависимостью от температуры и частоты. Она делится на VI, VII и VIII классы.

Керамика VI класса характеризуется высокой нагревостойкостью. К этому классу относятся форстеритовая керамика на основе форстерита $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$; шпинельно-форстеритовая, содержащая кроме форстерита шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; цельзиановая на основе цельзиана $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; виллемитовая на основе виллемита $2\text{Zn} \cdot \text{SiO}_2$. Форстеритовая керамика применяется для спаев керамики с металлами в радиолампах и приборах, а цельзиановая и виллемитовая - для каркасов катушек со стабильной индуктивностью и конденсаторов малой мощности.

Керамику VII класса изготавливают на основе талька $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Это, прежде всего, стеатитовая керамика, которая используется для изготовления изолирующих колец, проходных изоляторов, опорных плит и подложек, элементов корпусов полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Керамика VIII класса изготавливается из глинозема, ее основу составляет корунд Al_2O_3 . Она обладает наибольшей механической прочностью, высокой твердостью, высокой химической стойкостью, повышенной теплопроводностью и высокими электроизоляционными свойствами. В зависимости от содержания Al_2O_3 керамика этого класса делится на ультрафарфор, алюмооксид и поликор.

Ультрафарфор в качестве исходного сырья кроме глинозема имеет глину, углекислые соли бария и стронция. Он имеет повышенные, по сравнению с обычным фарфором, механическую прочность и теплопроводность. Применяется для высоковольтных конденсаторов, спаев с металлами, плат и радиотехнических подложек.

Алюмооксид – очень твердый непластичный материал, выдерживающий температуру до 1600°C . Исходное сырье алюмооксида содержит $95 \div 98\%$ глинозема. Используется алюмооксид в качестве

изоляции для электронных ламп, корпусов полупроводниковых приборов, антенн.

Поликор относится к высокоглиноземистой керамике, его плотность близится к теоретической плотности корунда. В отличие от других видов рундовой керамики, поликор прозрачен. Используется поликор в качестве подложек для гибриднопленочных интегральных микросхем.

Низкочастотная установочная керамика по сравнению с высокочастотной имеет худшие электротехнические характеристики и обычно более низкую механическую прочность, но характеризуется более высокой пластичностью исходного сырья и более простой технологией изготовления изделий. Эта керамика делится на IX и X классы.

Керамика IX класса представляет собой стеатиты, изготовленные из оксида бария BaO со значительной добавкой глинистых материалов.

Керамику X класса получают при использовании специальных сортов глин и минералов: кварца и полевого шпата.

В табл. 7.2. приведены электрические свойства некоторых видов керамики.

Таблица 7.2

Электрические свойства керамических материалов

Вид керамики	ϵ при 0,5 ÷ 5 МГц	ρ_v при 100°C, Ом · м	$\text{tg}\delta$ при 1МГц и 20°C $\times 10^{-4}$	$E_{\text{пр}}$, МВ/м
ультрафарфор	8 ÷ 8,2	$10^{10} \div 10^{12}$	8 ÷ 10	20 ÷ 25
цельзиановая	6,5 ÷ 7	10^{14}	2	35 ÷ 45
стеатитовая	6 ÷ 7	$10^{10} \div 10^{11}$	3 ÷ 8	20 ÷ 30
шпинелевая	7,5 ÷ 8	$10^{10} \div 10^{11}$	4 ÷ 6	20 ÷ 30
форстеритовая	6,8 ÷ 7	10^{12}	2 ÷ 10	20 ÷ 40
станнатная	14 ÷ 16	$10^{10} \div 10^{11}$	3 ÷ 4	10 ÷ 12
рутиловая	70 ÷ 80	$10^9 \div 10^{10}$	4 ÷ 5	10 ÷ 12

7.5. Стекло

Стеклом называется твердый аморфный термопластичный материал, получаемый переохлаждением расплава различных оксидов. В состав стекла входят стеклообразующие кислотные оксиды (SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 и др.), а также основные оксиды (K_2O , CaO , Na_2O и др.), придающие ему специальные свойства и окраску. Оксид кремния SiO_2 является основой практически всех стекол и входит в их состав в

количестве 50 – 100 %. По назначению стекла подразделяются на строительные (оконные, витринные и др.), бытовые (стеклотара, посуда, зеркала и др.) и технические (оптические, свето- и электротехнические, химико-лабораторные, приборный и др.).

Важными свойствами стекла являются оптические. Обычно стекло пропускает около 90 %, отражает – 8 % и поглощает – 1 % видимого света. Механические свойства стекла характеризуются высоким сопротивлением сжатию и низким – растяжению. Термостойкость стекла определяется разностью температур, которую оно может выдержать без разрушения при резком охлаждении в воде. Для большинства стекол термостойкость колеблется от 90 до 170°C, а для кварцевого стекла, состоящего из чистого SiO_2 - 1000°C. Основной недостаток стекла – высокая хрупкость.

Электротехнические свойства стекла существенно зависят от его химического состава и температуры. При нормальной температуре удельное объемное электрическое сопротивление ρ_V стекол колеблется от 10^6 до 10^{15} Ом·м, но у некоторых видов стекол может составлять 10^3 . Увеличение содержания оксидов щелочных металлов в составе стекла значительно снижает его электрическое сопротивление. Повышение температуры очень сильно снижает объемное электрическое сопротивление стекла. При температуре 200°C оно уменьшается в 10^4 раз по сравнению с сопротивлением при комнатной температуре. Введение в состав стекла оксидов двухвалентных металлов повышает электрическое сопротивление стекла на несколько порядков, и оно становится менее зависимым от повышения температуры.

Относительная диэлектрическая проницаемость стекла ϵ также зависит от его состава и температуры. В интервале температур от 20 до 60°C изменение диэлектрической проницаемости незначительно, но начиная с температуры 110 °C проницаемость щелочных стекол резко возрастает. Наименьшую относительную диэлектрическую проницаемость имеет чистое кварцевое стекло ($\epsilon=3,7$). Наиболее высокие потери наблюдаются у щелочных стекол. Увеличение содержания щелочных оксидов повышает диэлектрическую проницаемость силикатных стекол, причем увеличение содержания Na_2O повышает проницаемость в большей степени, чем K_2O .

Ситаллы представляют собой материалы, полученные путем кристаллизации стекол. Ситаллы изготавливают путем плавления стекольного материала с добавкой катализаторов кристаллизации. Далее расплав охлаждается до пластического состояния, и из него формируются изделия. Кристаллизация обычно происходит при повторном нагревании изделий.

По структуре ситаллы занимают промежуточное место между стеклом и керамикой. Их структура состоит из зерен кристаллической фазы, скрепленных стекловидной прослойкой. Содержание

кристаллической фазы составляет 30 – 95 %. Пористость отсутствует. Ситаллы характеризуются исключительной мелкозернистостью. По внешнему виду могут быть прозрачными и непрозрачными.

Структура ситаллов определяет их свойства. Ситаллы имеют высокую твердость, высокую прочность при сжатии и низкую при растяжении, обладают жаропрочностью до 900 - 1200°C, жаростойкостью, износостойкостью. Они характеризуются высокой химической стойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами. Ситаллы отличаются хрупкостью, однако меньшей, чем стекло. Применяются ситаллы для деталей, работающих при высоких температурах и в агрессивных средах, деталей радиоэлектроники, инструментов.

Ситаллы характеризуются более высокими электроизоляционными свойствами, чем стекла того же химического состава. Удельное объемное электрическое сопротивление ситаллов находится в пределах $10^{10} \dots 10^{12}$ Ом·м, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon=5 \dots 7$, тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц составляет $(1 \dots 8) \cdot 10^{-3}$. Эти свойства ситаллов позволяют применять их для различных приборов электронной техники, работающих в широком диапазоне частот и температур.

7.6. Волокнистые материалы

В электротехнике достаточно широко применяются волокнистые материалы, состоящие преимущественно из частиц удлиненной формы – волокон. Преимуществом этих материалов является невысокая стоимость, достаточная механическая прочность, гибкость, удобство обработки. Недостатки волокнистых материалов: низкая электрическая прочность, низкая теплопроводность, высокая гигроскопичность. Свойства волокнистых материалов могут быть существенно улучшены путем пропитки, поэтому эти материалы в электрической изоляции обычно применяют в пропитанном состоянии.

Древесина исторически явилась одним из первых электроизоляционных материалов. Она характеризуется неплохими механическими свойствами, легкостью механической обработки, дешевизной. Недостатками древесины являются резкое снижение электроизоляционных свойств при увлажнении, неоднородность свойств, низкая нагревостойкость и горючесть. Свойства древесины значительно улучшаются при пропитке парафином, маслом, различными смолами. В электротехнике древесина применяется для опорных и крепежных деталей трансформаторов и электрических машин, рукояток рубильников, опор линий электропередачи и связи и т.п.

Бумага представляет собой листовой материал на основе древесных целлюлозных волокон. В качестве электроизоляционного

материала используется кабельная, телефонная, пропиточная, намоточная и конденсаторная бумага.

Кабельная бумага предназначена для изоляции силовых кабелей. Она выпускается различных марок, обозначаемых буквами К, КМ, КВ, КВУ, КВМ и КВМУ (эти буквы обозначают: К – кабельная, М – многослойная, В – высоковольтная, У – уплотненная) и цифрами от 015 до 240 (обозначающими толщину бумаги в мкм). Бумаги марок К и КМ применяются для силовых кабелей напряжением до 35 кВ, КВ и КВУ – 35 кВ и выше, КВМ и КВМУ – 110 кВ и более. Уплотненная бумага пропитана нефтяным маслом, она имеет более высокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon \approx 4,3$), чем неуплотненная, у которой $\epsilon \approx 3,5$.

Телефонная бумага марок КТ и КТУ предназначена для изоляции телефонных кабелей, работающих при сравнительно низком напряжении. Она имеет толщину 50 мкм и применяется в непропитанном состоянии.

Пропиточная бумага марок ЭИП-50, ЭИП-63 и ЭИП-75 (числа обозначают массу 1 м^2 бумаги в граммах) применяется для изготовления листового гетинакса (см. раздел 7.2).

Конденсаторная бумага в пропитанном виде образует диэлектрик бумажных конденсаторов. Выпускается двух видов: КОН – обычная конденсаторная бумага и «силикон» – бумага для силовых конденсаторов. Номинальные значения толщины этой бумаги различных марок – от 4 до 30 мкм. Малая толщина конденсаторной бумаги позволяет получить высокую удельную (на единицу объема) емкость конденсатора. Пробивное напряжение конденсаторных бумаг в зависимости от вида и толщины колеблется от 240 до 680 В.

Картон отличается от бумаги большей толщиной. Электроизоляционные картоны выпускаются двух типов: воздушные – более твердые и упругие, предназначенные для работы на воздухе (прокладки для пазов электрических машин, каркасы катушек, шайбы и др.) и масляные – более рыхлой структуры и более мягкие, предназначенные в основном для работы в трансформаторном масле (например, в изоляции маслонаполненных трансформаторов). Масляные картоны хорошо пропитываются маслом и в пропитанном виде имеют высокую электрическую прочность.

Текстильные материалы получают методами специальной обработки (прядение, ткачество) длинноволокнистого сырья. Ткани отличаются от бумаги закономерным строением (определенным характером переплетения нитей). При прочих равных условиях текстильные материалы имеют более высокую механическую прочность, особенно при перегибе и истирании, не столь сильно снижают прочность при увлажнении, но эти материалы и пропитанные изделия из

них намного дороже и обладают меньшей электрической прочностью, чем бумага и пропитанная бумага.

В качестве электроизоляционного материала пряжу применяют для защитных покровов кабелей и изоляции обмоточных проводов; ленты и ткани используют для защиты изоляции электрических машин и аппаратов. Ткани используют также для изготовления лакотканей и текстолитов (см. раздел 7.2).

Лакоткани являются гибкими электроизоляционными материалами, представляющими собой ткань, пропитанную электроизоляционным лаком. Ткань обеспечивает значительную механическую прочность, а лаковая пленка – электрическую прочность материала. Лакоткани широко применяются для изоляции в электрических машинах, аппаратах, кабельных изделиях в виде обмоток, оберток, прокладок и др.

В качестве основы для изготовления лакоткани чаще всего применяют хлопчатобумажную и шелковую ткань. В последнее время применение находят также ткани из синтетических волокон. По роду пропитывающего лака лакоткани подразделяют на светлые (желтые) – на масляных лаках и черные – на масляно-битумных лаках. Электрическая прочность светлых лакотканей: хлопчатобумажных $35 \div 50$, шелковых $55 \div 90$ МВ/м. Недостатком светлых лакотканей является склонность к тепловому старению. Черные лакоткани обладают лучшими электроизоляционными свойствами: электрическая прочность черных хлопчатобумажных лакотканей равна примерно $50 \div 60$ МВ/м. Гигроскопичность черных лакотканей значительно меньше, чем светлых. Недостатком черных лакотканей является их пониженная стойкость к действию органических растворителей. Толщина различных лакотканей составляет: хлопчатобумажных - от 0,15 до 0,30 мм, шелковых от 0,04 - до 0,15 мм, капроновых - от 0,10 до 0,15 мм.

При пропитке бумаги лаками получается лакобумага, которая может использоваться как заменитель лакотканей. В последнее время наблюдается тенденция замены лакотканей и лакобумаги гибкими полимерными пленками.

7.7. Жидкие и твердеющие диэлектрики

Кроме рассмотренных выше твердых диэлектриков, в качестве электроизоляционных материалов в электротехнических устройствах используют жидкие диэлектрики (минеральные масла и синтетические жидкие диэлектрики). Особую группу диэлектриков составляют твердеющие материалы, которые в исходном состоянии являются жидкостями, а в процессе изготовления изоляции отверждаются (лаки, компаунды, эмали).

Нефтяные (минеральные) электроизоляционные масла получают в процессе ступенчатой перегонки нефти и последующего рафинирования, т.е. удаления из получившегося продукта посторонних примесей. Эти масла сравнительно дешевы, при хорошей очистке имеют малый тангенс угла диэлектрических потерь, обладают достаточно высокой электрической прочностью. К недостаткам нефтяных масел относятся ограниченный интервал рабочих температур, пожаро- и взрывоопасность, склонность к старению.

Трансформаторное масло применяется в качестве изолирующей и охлаждающей среды в силовых и импульсных трансформаторах. Оно заполняет поры в изоляции и пространство между проводами обмоток, что повышает электрическую прочность изоляции. Другое назначение трансформаторного масла – заполнение силовых масляных выключателей. Разрыв электрической дуги в этих выключателях происходит в масле, что способствует быстрому гашению дуги.

Трансформаторное масло обладает следующими свойствами: малая диэлектрическая проницаемость $\epsilon=2,2\ldots 2,3$; электрическая прочность $E_{пр}=10\ldots 25$ МВ/м; температура вспышки $135-140^{\circ}\text{C}$, температура застывания - 45°C . Электрическая прочность масла сильно снижается при попадании в него воды, но при просушке восстанавливается.

Конденсаторное масло получают из трансформаторного путем обработки в вакууме для удаления растворенного воздуха, что снижает диэлектрические потери. Его применяют для пропитки изоляции в бумажных конденсаторах, что позволяет уменьшить их размеры.

Кабельное масло отличается от трансформаторного повышенной вязкостью, а от конденсаторного – пониженными электрическими свойствами. Оно используется (как составная часть в масляно-канифольных компаундах) для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей.

Лаки представляют собой коллоидные растворы пленкообразующих веществ в летучих растворителях. Пленкообразующими веществами являются смолы (см. раздел 7.2), масла, битумы и др. При сушке лака растворитель улетучивается, а пленкообразующее вещество в результате химических реакций переходит в твердое состояние, образуя лаковую пленку. По назначению электроизоляционные лаки делят на пропиточные, покрывные и клеящие.

Пропиточные лаки предназначены для пропитки пористой и волокнистой изоляции. При пропитке лак вытесняет воздух из пор, и после высыхания электрическая прочность изоляции значительно повышается. К пропиточным лакам относятся кремнийорганические (см. раздел 7.2), битумно-масляные и др. В состав битумно-масляных лаков входят битумы, которые определяют черный цвет лака и лаковой

пленки. Битумы бывают природными и искусственными, представляющими собой тяжелые продукты перегонки нефти. Кремнийорганические лаки применяют для пропитки стекловолокнутой обмотки проводов и кабелей и изготовления стеклотекстолита. Битумно-масляный лак применяют для изготовления лакотканей.

Покрывные лаки предназначены для защиты изделий от воздействия атмосферной влаги и паров агрессивных веществ. Они создают на поверхности защищаемых изделий прочную и гладкую лаковую пленку.

Клеящие лаки применяют для склеивания между собой твердых материалов, например, фольгированных диэлектриков, листов пакетов трансформаторов, пластинок слюды и др.

Эмали представляют собой разновидность покрывных лаков, в состав которых введен неорганический наполнитель – пигмент. Пигменты повышают твердость, теплопроводность, влагостойкость покрытия и придают им соответствующий цвет. В качестве пигментов используют железный сурик, оксиды цинка, титана и др.

Эмали используют в качестве защитных покрытий поверхностей различных деталей и элементов радиоэлектроники, а также для декоративной отделки корпусов электрорадиотехнических приборов. Эмали на эпоксидной основе (см. раздел 7.2) обладают очень хорошей адгезией и нагревостойкостью до температуры 150°C. Эмали на кремнийорганической основе (см. раздел 7.2) характеризуются высокой нагревостойкостью до температуры 200°C.

Лаки и эмали маркируются буквенно-цифровыми обозначениями. Буквы обозначают химическую основу главного компонента лака, а последующие цифры – его порядковый номер в соответствующей группе. Например, обозначение ПЭ-993 расшифровывается так: ПЭ – полиэфирный, 9 – электроизоляционный, 93 – порядковый номер в группе полиэфирных лаков.

Компаунды представляют собой механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей. По сравнению с лаками компаунды обеспечивают лучшую влагостойкость и влагонепроницаемость изоляции, а также лучшие условия отвода тепла.

В исходном состоянии компаунды могут быть жидкими и твердыми. В жидкие компаунды перед употреблением вводят отвердитель, в результате чего они постепенно затвердевают, превращаясь в монолитный твердый диэлектрик. Твердый компаунд предварительно нагревают для получения вязкой массы.

По назначению компаунды разделяют на пропиточные и заливочные. Пропиточные компаунды служат для пропитки пористых и волокнистых материалов. Заливочные компаунды служат для заполнения сравнительно больших полостей и промежутков в различных

деталей, а также для нанесения сравнительно толстых покрытий. При их применении изделия помещают в формы и заливают компаундом. После удаления формы образуется гладкая однородная поверхность, повторяющая поверхность формы.

Наибольшее распространение получили эпоксидные, кремнийорганические и полиэфирные компаунды, имеющие своей основой соответствующие смолы (см. раздел 7.2).

Применяются компаунды для заливки трансформаторов, работающих в тяжелых условиях, заливки блоков сопротивления вместо громоздких фарфоровых деталей, в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем для герметизации кристаллов, а также для герметизации оптоэлектронных приборов.

8. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

8.1. Классификация и общая характеристика магнитных материалов

По магнитным свойствам материалы подразделяются на слабомагнитные (диамагнетики и парамагнетики) и сильномагнитные (ферромагнетики и ферримагнетики). Диамагнетиками являются вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r < 1$, значение которой не зависит от напряжённости внешнего магнитного поля. К ним относятся инертные газы, водород, многие органические соединения, некоторые металлы (медь, цинк, серебро, золото, ртуть), полупроводниковые материалы (висмут, галлий, сурьма).

К парамагнетикам относятся вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r > 1$, также не зависящей от напряжённости внешнего магнитного поля. К ним относятся кислород, оксид азота, соли железа, никеля, кобальта и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина. Диамагнетики и парамагнетики имеют магнитную проницаемость, близкую к единице, и по магнитным свойствам находят в технике ограниченное применение. У ферромагнетиков и ферримагнетиков магнитная проницаемость $\mu_r \gg 1$ и зависит от напряжённости магнитного поля. К ним относятся железо, никель, кобальт, гадолиний, сплавы железа, никеля, кобальта, хрома, марганца и ферриты различного состава.

Магнитные свойства материалов обусловлены внутренними скрытыми формами движения электрических зарядов, каковыми являются вращение электронов вокруг собственных осей – электронные спины и орбитальное вращение электронов в атомах. Явление

ферромагнетизма связано с образованием внутри некоторых материалов ниже определённой температуры (точки Кюри) кристаллических структур, называемых магнитными доменами, в которых электронные спины оказываются ориентированными параллельно друг другу и одинаково направленными. Таким образом в ферромагнетиках присутствуют области самопроизвольной (спонтанной) намагниченности без приложения внешнего магнитного поля. Однако направления магнитных моментов отдельных доменов оказываются различными. Магнитный поток такого тела во внешнем пространстве оказывается равным нулю (рис. 8.1, а). Размеры доменов колеблются в широких пределах от 0,001 до 10 мм³ при толщине пограничных слоёв между ними в несколько десятков – сотен атомных радиусов. Процесс намагничивания ферромагнетика под влиянием внешнего магнитного поля сводится: 1) к росту доменов, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением поля, и уменьшению размеров других доменов (процесс смещения границ); 2) к повороту магнитных моментов в направлении внешнего поля (рис.8.1, б). Магнитное насыщение достигается тогда, когда рост доменов прекращается и магнитные моменты всех намагниченных участков окажутся ориентированными в направлении поля (рис.8.1, г). При намагничивании ферромагнитных монокристаллов происходит изменение их линейных размеров. Это явление называется магнитострикцией. Магнитострикция монокристалла железа (никеля, кобальта) различна для разных направлений в кристалле. Монокристалл, намагниченный в направлении ребра куба сжимается, а в направлении диагонали – удлиняется. Магнитострикция наблюдается и у поликристаллических металлов. Знак магнитострикционной деформации может быть как положительным (растяжение в направлении поля), так и отрицательным. Явление магнитострикции используется при конструировании ультразвуковых генераторов волн и других магнитострикционных приборов.

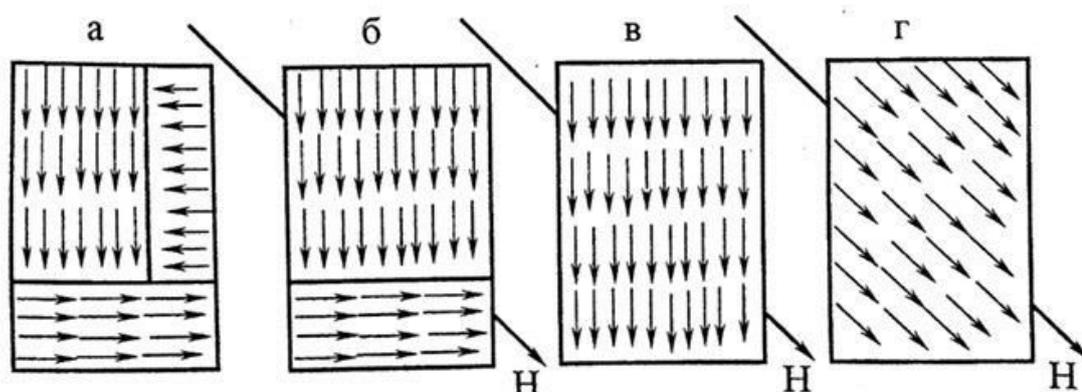


Рис. 8.1. Схема ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика: а – поля нет; б – слабое поле; в – сильное поле; г – насыщение

Протекание процессов намагничивания ферромагнитного материала характеризуют кривыми намагничивания. Относительная магнитная проницаемость (в дальнейшем - магнитная проницаемость) определяется как отношение индукции B к напряжённости магнитного поля H :

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$. Магнитная проницаемость μ_{rH} при $H \approx 0$ называется начальной проницаемостью. Она определяется при очень слабых полях $\sim 0,1$ А/м. На рис. 8.2 показана гистерезисная петля, полученная при намагничивании и размагничивании ферромагнетика. Остаточная индукция B_r (Тл) остаётся после намагничивания и снятия поля. Коэрцитивная сила H_c (А/м) представляет собой напряжённость поля, приложенного для размагничивания. В зависимости от формы гистерезисных кривых и магнитных свойств магнитные материалы делятся на магнитотвёрдые (рис. 8.2, а) и магнитомягкие (рис. 8.2, б).

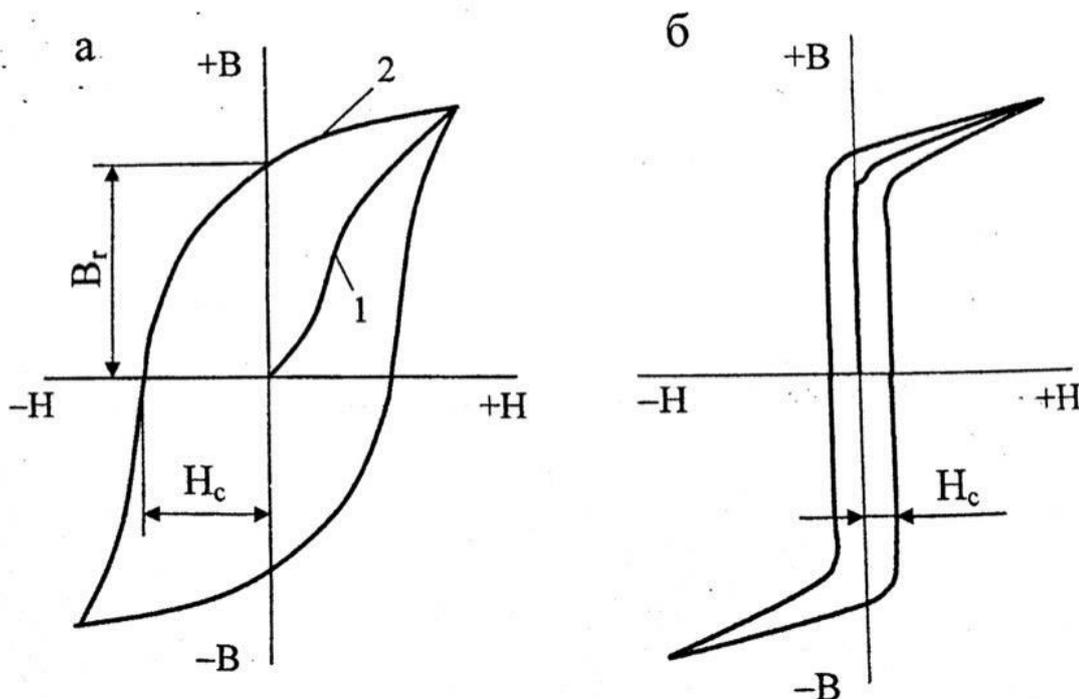


Рис. 8.2. Гистерезисная кривая для магнитотвёрдого (а) и магнитомягкого (б) материалов

8.2. Магнитотвёрдые материалы

Магнитотвёрдыми называются материалы с большой коэрцитивной силой H_c и сравнительно низкой проницаемостью. Материалы с малым значением H_c и большой магнитной проницаемостью называются магнитомягкими. Магнитная твёрдость – коэрцитивная сила H_c повышается: 1) легированием (особенно, если легирование идёт сверх предела растворимости). 2) отклонением от равновесного состояния (наклёп, закалка, фазовые превращения). 3) измельчением зерна, т.е. повышение механической твёрдости повышает и магнитную твёрдость (по аналогии и дано условное название «магнитная твёрдость»). Магнитотвёрдые материалы применяются для постоянных магнитов. Характеристиками материалов для постоянных магнитов служат коэрцитивная сила и остаточная индукция. Магнитная проницаемость (максимальная удельная магнитная энергия W_{max}) для магнитотвёрдых материалов ниже, чем для магнитомягких, причём, чем выше коэрцитивная сила, тем меньше магнитная проницаемость. По составу и способу получения магнитотвёрдые материалы подразделяются на: 1) инструментальные углеродистые стали; 2) легированные хромистые и хромистокобальтовые стали; 3) литые сплавы; 4) порошковые материалы; 5) магнитотвёрдые ферриты; 6) деформируемые сплавы. Постоянные магниты намагничиваются в сильных магнитных полях $H > 1000$ кА/м, имеют большие потери на перемагничивание, остаточную индукцию $B_r = 0,5 \div 1,0$ Тл и коэрцитивную силу $H_c \leq 560$ кА/м. примеры магнитотвёрдых материалов различных групп и их свойства приведены в табл. 8.1, 8.2.

Самые дешёвые постоянные магниты изготавливаются из *углеродистых инструментальных сталей У10-У12*. Эти стали имеют низкую прокаливаемость, поэтому из них могут изготавливаться мелкие магниты.

Для повышения твёрдости (следовательно, и магнитной твёрдости) мартенситные стали (табл. 8.2) подвергаются сложной термической обработке. Например, для стали ЕХ5К5 она состоит из: 1) воздушной закалки с температуры 1150-1200°C (для растворения крупных карбидных фаз); 2) второй закалки 930-950°C (для создания неравномерного состояния, повышения твёрдости); 3) обработки холодом -70°C (для устранения остаточного аустенита и повышения магнитных свойств); 4) отпуска 100°C, 5 часов – кипячением в воде (стабилизация свойств). Эти стали хотя и обладают невысокими магнитными свойствами, но они

дешевы, позволяют проводить обработку на металлорежущих станках, находят достаточное применение.

Таблица 8.1

Характеристики ряда магнитотвердых материалов

Группа	Марка	W_{max} , кДж/м ²	B_r , Тл	H_c , кА/м
1	2	3	4	5
Легированные стали	EX3	0,595	0,95	4,775
	EX9K15	1,035	0,80	11,94
	M2			
Литые сплавы Fe – Al – Ni Fe – Al – Ni – Co	ЮНД	3,6	0,50	40
	ЮНДК15	6,0	0,75	48
	ЮНДК35	40	1,05	115
	T5AA			

Окончание табл. 8.1

1	2	3	4	5
Деформируемые сплавы Fe – Cr – Co	28X10K	3,5	0,8	10
	22X15KA	28	1,5	47
	ПлК78	39,8 – 43,8	0,75	270
Pt – Co (литой)				
Порошковые сплавы Fe – Al – Ni Fe – Ni – Al – Co	ММК – 1	3,0	0,60	24
	ММК - 2	3,5	0,48	39
	ММК – 3	4,0	0,52	44
	ММК - 11	16,0	0,70	128
Феррит бария	4БИ145	2,0	0,17	95
	28БА190	14,0	0,39	185
Феррит стронция	28СА250	14,0	0,39	240
Sm – Co	КС37А	65	0,82	540
Sm – Pr – Co	КСП37А	72,5	0,90	500

Литые магнитотвердые сплавы. Литые магнитотвёрдые материалы – это сплавы на основе Fe – Ni – Al и Fe – Ni – Al – Co. Марки сплавов и магнитные свойства регламентированы ГОСТ 17809-72. Примеры сплавов и их состав приведены в табл. 8.1. Эти сплавы имеют более высокие магнитные свойства. Недостатком является

высокая твёрдость и хрупкость, поэтому магниты из них изготавливают литьём или методом порошковой металлургии. Механическая обработка их возможна только шлифованием. Кроме современной маркировки в литературе встречаются прежние названия. Так сплав Al – Ni – Fe называется ални, сплав с добавкой кремния – алниси, с добавкой кобальта – алнико, а сплав с содержанием кобальта 24% - магнико. Добавка кобальта, кремния, титана и др. повышает магнитные свойства, облегчает изготовление. Сплавы с кобальтом в несколько раз дороже, чем без него. Значительное улучшение магнитных свойств достигается не только составом, но и охлаждением магнитов после отливки в сильном магнитном поле. Магниты этой группы используют в измерительных приборах, акустических устройствах, электрических машинах, магнитных муфтах, тормозах и т.д.

Таблица 8.2

Состав и свойства мартенситных сталей для постоянных магнитов

Марка стали	Химический состав, % (остальное – Fe)					Магн. свойства	
	C	Cr	W	Co	Mo	Br, Тл	H _c , кА/м
1	2	3	4	5	6	7	8
EX	0,95-1,10	1,30-1,60	--	--	--	0,9	4,6
EX3	0,90-1,10	2,80-3,60	--	--	--	0,95	4,8
E7B6	0,68-0,78	0,30-0,50	5,2-6,2	--	--	1,0	5,0
EX5K5	0,90-1,05	5,50-6,50	--	5,50-6,50	--	0,85	8,0
EX9K15 M2	0,90-1,05	8,0-10,0	--	13,5-16,5	1,7	0,8	11,94

Примечание. Химический состав и свойства нормированы ТУ14-1-4487-88

Деформируемые магнитотвердые сплавы предназначены для постоянных магнитов активной части роторов, элементов памяти систем управления автоматизации связи, для носителей магнитной записи информации. Магнитотвёрдые деформируемые материалы на основе

сплавов Fe – Cr – Co изготавливают литыми (Л), горячекатаными (ГК) и холоднокатаными (ХК). В зависимости от направленности магнитных свойств материалы подразделяются на анизотропные и изотропные. Высококоэрцитивное состояние Fe – Cr – Co сплавов достигается образованием в результате термической обработки (заковки и старения) анизотропных включений сильномагнитной фазы FeCo в слабомагнитной матрице FeCr.

Порошковые магнитотвёрдые материалы. Спеканием порошков при температуре 1200-1300°C в вакууме в течение 1-5 часов получают дисперсионно-твердеющие сплавы Fe – Al – Ni и Fe – Al – Ni – Co. Остаточная пористость 3-7% приводит к снижению магнитных свойств. Снижение пористости обеспечивает повышение магнитных свойств. Спечённые магниты имеют мелкозернистую структуру, однородные магнитные свойства и превышают по прочности литые. Порошковые магниты применяются в узлах, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

Магнитотвёрдые ферриты. Наиболее известным из магнитотвёрдых ферритов является бариевый феррит $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ (ферроксдюр). Промышленностью выпускается два вида бариевых ферритов: марок БИ (бариевый изотропный) и БА (бариевый анизотропный). Магниты из феррита бария по сравнению с металлическими имеют более высокую коэрцитивную силу, низкую плотность, высокое электрическое сопротивление. Оксидные ферриты дешевле, так как не содержат дефицитных элементов. Недостатком ферритов является низкая прочность и существенная зависимость характеристик от температуры. Кроме феррита бария применяются ферриты кобальта и ферриты стронция. Магнитотвёрдые ферриты используются в качестве постоянных магнитов в электротехнике, радиотехнике, станкостроении, при создании магнитных сепараторов, муфт, вентиляей.

Сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов. Магнитотвёрдые материалы изготавливаются на основе сплавов: Ag – Mn – Al; Pt – Fe, Pt – Co, Pt – Pd – Co. Они обладают большой коэрцитивной силой, что обеспечивает им высокую стабильность. Сплавы изготавливаются только для постоянных магнитов очень малых размеров для точных приборов. Более широкое применение ограничивает их высокая стоимость. Магниты системы Pt – Co, марки ПЛК-78, содержащие 76,5-79,0% Pt (остальное – кобальт), изготавливаются литьём. Магниты аналогичного состава изготавливаются также методом порошковой металлургии. Порошковый сплав подвергают холодной обработке давлением; после заковки он легко обрабатывается резанием. Рабочая температура порошковых Pt – Co металлов до 350°C. Методами порошковой металлургии изготавливают на основе кобальта с редкоземельными элементами

сплавы марок КС37А и КС37 (36,0-38,5% самария, остальное кобальт) и марок КСП37, КСП37А (36,0-38,5 самария с празеодимом). Основные магнитные свойства приведены в табл. 8.1.

8.3. Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы обладают высокой магнитной проницаемостью, небольшим коэрцитивной силой ($H_c < 4$ кА/м), малыми потерями на гистерезис. Они используются для сердечников трансформаторов, электромагнитов в электрических приборах, для магнитоприводов в переменных магнитных полях, а также в системе автоматики и телемеханики, вычислительной технике и в других случаях, где необходимо достигнуть наибольшей индукции при наименьших затратах энергии. Магнитомягкие материалы имеют высокое значение начальной магнитной проницаемости, они способны намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях. Выше было показано, что высокая магнитная твёрдость достигается получением неравновесной высокодисперсной структуры. Магнитная мягкость обеспечивается получением равновесного состояния (отсутствие дефектов и внутренних напряжений, крупное зерно). К магнитомягким материалам относятся: ферромагнитное особо чистое железо, низкоуглеродистые электротехнические нелегированные и кремнистые стали, прецизионные сплавы на железной и железоникелевой основе, порошковые ферро- и ферромагнитные и композиционные материалы.

Железо (низкоуглеродистая нелегированная сталь). Технически чистое железо содержит до 0,1% примесей, в том числе до 0,05% углерода. Железо имеет малое удельное электрическое сопротивление, обладает повышенными потерями на вихревые токи, поэтому применяется его ограниченно - в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока (полюсные наконечники, реле). Технически чистое железо является основным компонентом многих магнитных материалов. Магнитные свойства железа (табл. 8.3) определяются количеством и составом примесей, наиболее вредными из которых являются углерод, кислород, сера, азот, водород.

Особо чистое железо получается электролизом раствора серноокислого или хлористого железа или термическим разложением пентакарбонила железа. Карбонильное железо используется в виде порошка в качестве ферромагнитной фазы высокочастотных магнитодиэлектриков и в виде листов. В табл. 8.3 показано насколько большое влияние оказывает на магнитные свойства даже незначительное количество примесей.

Таблица 8.3

Состав и магнитные свойства железа

Железо	Содержание примесей, %		Магнитные свойства		
	углерод	кислород	μ_H	μ_{max}	H_c , А/м
Технически чистое	0,020	0,060	250	7000	64,0
Электролитическое	0,020	0,010	600	15000	28,0
Карбонильное	0,005	0,005	3300	21000	6,4
Переплавленное в вакууме электролитическое	0,060	---	---	61000	7,2
Обработанное в водороде	0,005	0,003	6000	200000	3,2
Тщательно обработанное в водороде	---	---	20000	340000	2,4
Монокристаллы чистейшего железа, обработанные в водороде особо тщательно	---	---	---	1430000	0,8

Примечание: μ_H - начальная магнитная проницаемость,
 μ_{max} - максимальная магнитная проницаемость
 H_c - коэрцитивная сила.

Электротехническая нелегированная сталь и сортовая электрическая нелегированная сталь содержит до 0,04 % углерода, до 0,06 % примесей. Изготавливаются листы толщиной от 0,1 до 3,9 мм. Термообработка сталей заключается в длительном отжиге при температуре 950°C, медленном охлаждении (10 часов) до 600°C. Марки сталей состоят из 5 цифр: 11832, 21832, 10880, 21895 и т.д. Первая цифра – класс по виду прокатки: 1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная. Вторая цифра – тип по содержанию кремния: 0 – сталь нелегированная без нормативного коэффициента старения, 1 – сталь нелегированная с коэффициентом старения (увеличение коэрцитивной силы до 6 А/м). Третья цифра – группа по основной характеристике (8 – коэрцитивная сила). Четвёртая и пятая цифры – значение основной характеристики (для восьмой группы – значение коэрцитивной силы (32, 80, 95 А/м)). Эти стали применяются в магнитных цепях электрических приборов и аппаратов.

Электротехническая кремнистая сталь. В массовом потреблении эта сталь является основным магнитомягким материалом. Введение в сталь кремния повышает удельное сопротивление, что приводит к снижению потерь на вихревые токи. Кроме того, кремний способствует выделению углерода в виде графита и раскислению стали. Это приводит

к увеличению μ_{rH} , уменьшению H_c и снижению потерь на гистерезис. Стали, содержащие до 4 % кремния, имеют достаточно высокие свойства, свыше 5 % - становятся хрупкими. Путём специализированной прокатки и особой термической обработки изготавливается текстурированная сталь крупнокристаллического строения. Магнитные свойства такой стали в направлении прокатки значительно выше, чем в стали, не подвергнутой такой обработке.

Электротехническая кремнистая сталь классифицируется по следующим параметрам: по структурному состоянию – первая цифра в марке (1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная); по содержанию кремния в % - вторая цифра в марке: 0 – до 0,4%; 1 – 0,4-0,8; 2 – 0,8-1,8; 3 – 1,8-2,8; 4 – 2,8-3,8; 5 – 3,8-4,8; по основной нормируемой характеристике – третья цифра (0 – удельные потери P при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$); 1 – при 1,5 Тл и 50 Гц ($P_{1,5/50}$); 2 - $P_{40/400}$; 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряжённости поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$), 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях – 10 А/м (B_{10}). Сталь маркируется четырьмя цифрами: 2013, 2112, 3411, 3415. Вместе первые три цифры обозначают тип стали, четвёртая – порядковый номер стали.

Сталь выпускается в виде листов, рулонов, ленты. Она может быть с электроизоляционным покрытием и без него. Сталь различных классов предназначена для изготовления магнитных цепей аппаратов, трансформаторов, приборов и электромашин. Применение текстурированной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и размеры на 20-25 %.

Прецезионные сплавы. Прецезионные магнитомягкие сплавы классифицируются на восемь групп, из которых семь групп классифицируются по основному магнитному параметру, восьмая – коррозионно-стойкие сплавы. В первую группу включены сплавы с наивысшей магнитной проницаемостью. Во вторую – сплавы с высокой магнитной проницаемостью, в третью – сплав с повышенной магнитной проницаемостью, в четвёртую – сплавы с прямоугольной петлёй гистерезиса и т.д. Магнитные свойства сплавов первых трех групп приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Свойства железоникелевых сплавов (пермаллоев) после термической обработки

Группа	Марка	μ_{rH}	μ_{rmax}	H_c , А/м	B_{max} , Тл	$\rho \cdot 10^6$, Ом · м
I	79НМ	16000-	50000-	5,2-1,0	0,65	0,55

	80НХС 81НМА	35000	220000			0,61 0,80
II	50НХС	1500- 3200	15000- 30000	20-8	1,00	0,90
III	45Н 50Н	1700- 3000	16000- 35000	32-10	1,50	0,45

Пермаллои – железоникелевые сплавы, обладают большой начальной магнитной проницаемостью в области слабых магнитных полей. Основные магнитные свойства и сопротивление сплавов зависит от содержания никеля. Наиболее высокие магнитные свойства имеет сплав, содержащий 78,5 % Ni. Кроме того, магнитные свойства сплавов зависят от механических напряжений, химического состава, режимов термической обработки. Наиболее высокие магнитные свойства достигаются нагревом до высокой температуры в среде водорода и медленном охлаждении в магнитном поле. Магнитная проницаемость высоконикелевых пермаллоев в несколько раз выше чем у низконикелевых. При повышенных частотах предпочтительно использовать низконикелевые пермаллои. Для придания сплавам необходимых свойств в пермаллои вводятся добавки. Молибден и хром повышают удельное сопротивление и начальную магнитную проницаемость. Медь повышает постоянство μ_r , удельное сопротивление, облегчает механическую обработку. Кремний, марганец повышают удельное сопротивление. Сплавы 45Н и 50Н применяют для изготовления сердечников силовых трансформаторов, реле. Из сплава НС50 изготавливается аппаратура связи звуковых и высоких частот. Сплавы 70НМ, 80НХС, 76НХД используют для изготовления сердечников малогабаритных трансформаторов, реле, магнитных экранов, бесконтактных реле. Тонкие ленты из пермаллоев используются для ячеек памяти и устройств вычислительной техники.

Более дешёвыми являются сплавы системы Fe-Al-Si. Например, альсифер (9,6% Si + 5,4% Al, остальное – железо) имеет $\mu_H = 35400$, $\mu_{max} = 117000$; $H_c = 1,76$ А/м.

Ферромагнитные материалы (ферриты). Технологический процесс производства ферритовых изделий сводится к тонкому измельчению, тщательному перемешиванию предварительно обожженных оксидов металла. К ним добавляется пластификатор, из полученной массы под большим давлением прессуются изделия требуемой формы. Изделия подвергаются обжигу при температуре 1100-1400°C и спеканию, в результате чего происходит образование твердых растворов ферритов. Оксидные ферриты делятся на четыре класса: 1) магнитомягкие ферриты никель-цинковой и марганец-цинковой систем для радиочастот; 2) ферриты с прямоугольной петлей

гистерезиса (ППГ); 3) магнитоотрицательные ферриты; 4) сверхвысокочастотные ферриты (СВЧ).

Магнитомягкие ферриты для радиочастот по назначению и магнитным свойствам классифицируются на 10 групп: никель-цинковый (марок НН, НТ, ВН) и марганец-цинковый (марок НМ, МТ и другие). Примеры марок: 400НН, 2000НН, 2000НМ, 150ВН и т.д. На первом месте в марке стоит число, соответствующее относительной проницаемости. На втором месте – буква, определяющая частотный диапазон: Н – низкочастотные, В – высокочастотные. На третьем месте – буква, обозначающая оксид: Н – никель-цинковый, М – марганцово-цинковый феррит. Ферриты Мп – Zn обладают высокой магнитной проницаемостью, но относительно небольшим удельным электрическим сопротивлением, что ограничивает их использование при высоких частотах (< 3 МГц). Ферриты Ni – Zn имеют высокое удельное сопротивление, малые потери, поэтому могут использоваться при более высоких частотах (< 200 МГц).

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ). Такие ферриты используются в вычислительной технике (в марке буквы ВТ), в переключающих и накопительных устройствах, магнитных усилителях. Наибольшее применение имеют ферриты из оксидов магния и марганца. Основным параметром является коэффициент прямоугольности петли гистерезиса K_n , представляющий отношение остаточной индукции B_r к максимальной индукции B_{max} :

$$K_n = B_r / B_{max}$$

Желательно, чтобы K_n был возможно близок к единице. Для большинства ферритов ППГ $K_n = 0,85$.

Магнитоотрицательные ферриты. Эти сплавы имеют большой коэффициент магнитоотрицательности. Они применяются для сердечников преобразователей магнитных колебаний в ультразвуковые, для звукозаписывающих головок. Кроме большого коэффициента магнитоотрицательности сплавы должны обладать малой коэрцитивной силой и высоким удельным электрическим сопротивлением. Большой магнитоотрицательностью обладают никель ($\lambda_s = -37 \cdot 10^{-6}$), сплав железа с 13% алюминия ($\lambda_s = 45 \cdot 10^{-6}$), сплав железа с 50% Со ($\lambda_s = 70 \cdot 10^{-6}$).

Сверхвысокочастотные ферриты (ферриты СВЧ). Эти ферриты характеризуются малой магнитной кристаллографической анизотропией и малой коэрцитивной силой, очень высоким удельным электрическим сопротивлением ($10^4 - 10^{12}$ Ом·м). СВЧ – ферриты используются в диапазоне частот от сотен МГц до тысяч ГГц (длина волн от метров до миллиметров). По химическому составу и рабочему диапазону СВЧ-ферриты делятся на шесть групп. Например, магниевый феррит (для средней части сантиметрового диапазона длин волн) марки ЗСЧ5

расшифровывается так: первая цифра 3 указывает длину волны в сантиметрах, при которой используется феррит, 5 – разновидность. Кроме магниевых, используются иттриевые, литиевые, никелевые и др. ферриты.

Магнитодиэлектрические материалы. Магнитодиэлектриком называется композиционный материал, наполнителем в котором является магнитомягкий металлический или ферритовый порошок, а связкой – диэлектрик. В качестве наполнителя используется карбонильное железо, размолотые сплавы – альсифер, пермаллой. Изолирующей связкой служит фенолформальдегидная смола, полистирол и стекло. От основы требуется высокие магнитные свойства, от связки способность образовывать сплошную электроизоляционную плёнку. Плёнка снижает потери на вихревые токи магнитодиэлектриков, что позволяет использовать их для деталей, работающих при высоких частотах (до сотен мегагерц), при высокой стабильности магнитных свойств. Изделия получают холодным прессованием при давлении 600-2000 МПа с последующей термообработкой для снятия внутренних напряжений и стабилизации магнитных свойств.

Аморфные магнитомягкие материалы. Аморфные материалы состоят из металлов и элементов-аморфизаторов (бора, углерода, кремния). Структура сплавов достигается сверхбыстрым охлаждением из газообразного, жидкого или ионизированного состояния. По химическому составу сплавы подразделяются на три системы: на основе железа ($Fe_{86}B_2C_7$), железа и никеля (Н25А, 10НСР), железа и кобальта (К83А, К25А, 24КСР и др.). Аморфные сплавы на основе железа имеют высокую индукцию насыщения (до 1,8 Тл), низкие потери. Железоникелевые сплавы имеют высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу. Их используют для изготовления трансформаторов, электромагнитных устройств, работающих на повышенных частотах, что позволяет уменьшить габариты изделий. Железкокобальтовые сплавы заменяют в радиоэлектронной аппаратуре пермаллой, превосходя последние по ряду свойств и технологичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материаловедение: учебник для вузов / Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И. СПб.: Химиздат, 2014.— 784 с.
2. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М., Матюнин и др.; под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2000. – 640 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	4
1.1. Строение металлов.....	4
1.2. Металлические сплавы.....	9
1.3. Механические свойства материалов.....	14
2. СПЛАВЫ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ.....	16
2.1. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов.....	16
2.2. Стали.....	19
2.3. Чугуны	22
3. ТЕРМИЧЕСКАЯ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ.....	25
3.1. Отжиг стали.....	25
3.2. Закалка и отпуск стали.....	27
3.3. Химико-термическая обработка.....	31
4. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ.....	32
4.1. Конструкционные стали.....	33
4.2. Стали со специальными свойствами.....	34
4.3. Инструментальные стали и сплавы.....	37
5. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	40
5.1. Материалы высокой проводимости.....	40
5.2. Материалы высокого электросопротивления.....	46
5.3. Контактные материалы.....	54
5.4. Сверхпроводниковые материалы.....	56
6. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	60
6.1. Классификация и общая характеристика полупроводников.....	60
6.2. Примесные полупроводники.....	63
6.3. Специальные технологии получения полупроводников.....	67

7. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	72
7.1. Свойства диэлектриков.....	72
7.2. Пластические массы.....	77
7.3. Резиновые материалы.....	83
7.4. Керамика.....	85
7.5. Стекло.....	88
7.6. Волокнистые материалы.....	90
7.7. Жидкие и твердеющие диэлектрики.....	92
8. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	95
8.1. Классификация и общая характеристика магнитных материалов.....	95
8.2. Магнитотвердые материалы.....	97
8.3. Магнитомягкие материалы.....	101
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	108