

ФГОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра электропривода и электротехнологии

**Материаловедение.
Технология конструкционных материалов**

Часть 1. Материаловедение

Учебное пособие

(для студентов очной и заочной форм обучения
по специальности 311400 - Электрификация
и автоматизация сельского хозяйства)

Кострома 2004

УДК 620.1

Учебное пособие «Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Часть 1. Материаловедение» для студентов очной и заочной форм обучения по специальности 311400 – «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» рассмотрено на заседании кафедры электропривода и электротехнологии, протокол № 2 от «11» ноября 2003 г. и утверждено методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства, протокол № 4 от «14» ноября 2003 г.

Пособие составлено старшим преподавателем кафедры электропривода и электротехнологии Лобановым В.С.

Рецензенты: к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Ремонт машин и технология металлов» КГСХА Курбатов А.Е.;
старший преподаватель кафедры физики КГСХА
Кузьмин П.В.;
к.т.н., доцент кафедры технологии КГУ им. Некрасова Рябов Ю.Н.;
к.т.н., доцент кафедры ТКМ Азовочерноморской государственной агроинженерной академии Зорин А.Ф.

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» для студентов очного и заочного отделений. В шести разделах пособия рассмотрены: основные сведения о материалах, конструкционные материалы, магнитные материалы, проводники, полупроводники и диэлектрики. Пособие содержит 37 таблиц, 44 рисунка, 4 приложения. При составлении пособия использованы сведения 8 литературных источников.

Оглавление

	стр.
Введение	5
1. Основные сведения о материалах	6
1.1. Виды связей веществ	6
1.2. Особенности строения твердых веществ	7
1.3. Элементы зонной теории вещества	15
2. Конструкционные материалы	19
2.1. Основы металловедения	19
2.2. Выплавка чугуна и стали	29
2.3. Углеродистые стали	31
2.4. Чугуны	42
2.5. Некоторые металлы	44
2.6. Сплавы на основе цветных металлов	47
2.7. Основы термической обработки металлов	54
2.8. Химико-термическая обработка стали	58
3. Магнитные материалы	60
3.1. Общие сведения о магнетизме	60
3.2. Классификация	61
3.3. Общие сведения	61
3.4. Процесс намагничивания ферромагнетиков	63
3.5. Магнитный гистерезис	64
3.6. Магнитная проницаемость	65
3.7. Ферромагнетики в переменных магнитных полях	66
3.8. Потери на вихревые токи	67
3.9. Магнитомягкие материалы	68
3.10. Магнитотвердые материалы	74
4. Проводниковые материалы	76
4.1. Классификация	76
4.2. Электропроводность материалов	77
4.3. Свойства проводников	77
4.4. Материалы высокой проводимости	79
4.5. Сплавы высокого сопротивления	82
4.6. Сплавы для термопар	84
4.7. Контактные материалы	85
4.8. Припой	85
4.9. Флюсы	86
4.10. Неметаллические проводники	86
4.11. Проводники особо высокой нагривостойкости	88
4.12. Сверхпроводники	88

5.	Полупроводниковые материалы	89
5.1.	Классификация	89
5.2.	Общие сведения о полупроводниках	89
5.3.	Электропроводность полупроводников	91
5.4.	Простые полупроводники. Кремний	96
5.5.	Германий	101
5.6.	Сложные полупроводники	104
6.	Диэлектрические материалы	109
6.1.	Классификация и физические процессы в диэлектриках	109
6.1.1.	Классификация диэлектрических материалов (диэлектриков)	109
6.1.2.	Поляризация диэлектриков	109
6.1.3.	Классификация диэлектриков по виду поляризации	111
6.1.4.	Электрические свойства диэлектриков	112
6.1.5.	Пробой диэлектриков	118
6.1.6.	Пробой твердых диэлектриков	120
6.1.7.	Физико-химические свойства диэлектриков	121
6.1.8.	Тепловые свойства диэлектриков	123
6.2.	Газообразные диэлектрики	126
6.3.	Жидкие диэлектрики	126
6.4.	Волокнистые материалы	128
6.5.	Лакоткани	130
6.6.	Полимеры	130
6.7.	Пластмассы	137
6.8.	Слоистые пластики	138
6.9.	Битумы, лаки, компаунды	139
6.10.	Гибкие пленки	140
6.11.	Слюда и слюдяные материалы	141
6.12.	Асбест и асбестовые материалы	143
6.13.	Стекла	144
6.14.	Керамические материалы	146
	Список использованных источников	148
	Приложения 1...4	149-152

Введение

“Технология конструкционных материалов и материаловедение” - прикладная наука о строении и свойствах технических материалов, основная задача которой - установить связь между составом, структурой и свойствами.

С развитием техники расширяется и номенклатура используемых материалов. Наряду с традиционными материалами, обеспечивающими определенный комплекс механических и технических свойств, появляются всё новые материалы, обладающие особыми свойствами и применяемые в различных отраслях народного хозяйства. В их числе: магнитные, тугоплавкие и теплопрочные, порошковые материалы, материалы атомной техники, композиционные материалы, сверхпроводники, полимерные диэлектрики, стеклопластики, ситаллы и др.

Развитие электротехники выдвинуло на одно из первых мест проблему совершенствования электротехнических материалов высокого качества.

В настоящее время новые электротехнические материалы появляются в результате глубокого изучения физических, механических и химических характеристик различных веществ и новейших технологий их получения.

Дисциплина «Технология конструкционных материалов и материаловедение», включенная в образовательный стандарт подготовки инженеров-электриков является связующим звеном при переходе от изучения общеобразовательных (физики, химии) к специальным дисциплинам (электронике, электрическим машинам и др.).

1. Основные сведения о материалах

1.1. Виды связей веществ

Основные элементарные частицы всех веществ - электрон, нейтрон и протон. Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, электроны заполняют оболочки атомов, компенсируя положительный заряд ядра атома.

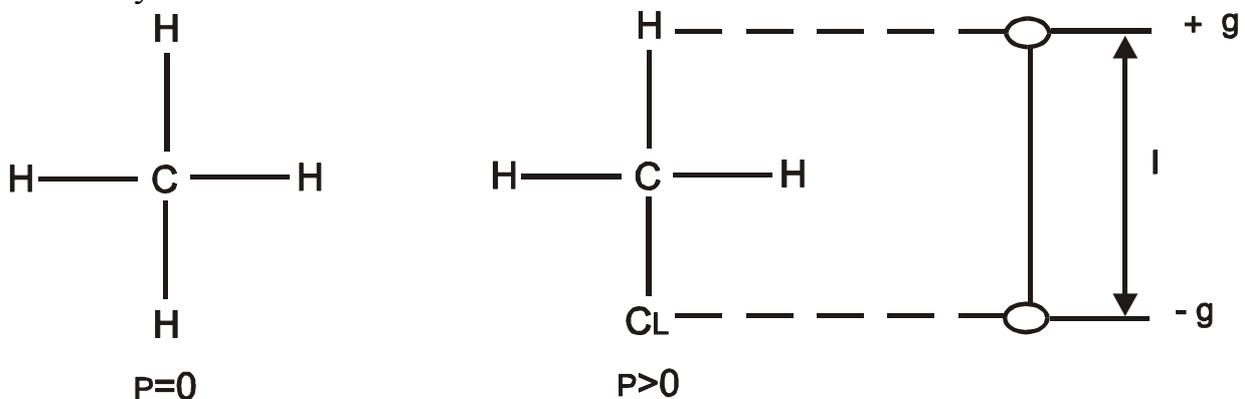
В зависимости от строения внешних электронных облаков, могут образовываться различные виды связей.

Ковалентная связь. Объединение атомов в молекулы при этой связи достигается за счет электронов, которые становятся общими для пар атомов. Обобществление электронов не сводится к простому наложению друг на друга двух электронных орбит, а сопровождается значительным перераспределением электронной плотности. При обобществлении электронов происходит втягивание электронных облаков в пространство между ядрами. В основе ковалентной связи лежит обменное взаимодействие или обменный эффект, обусловленный обменом атомов электронами и имеющий квантовую природу. Ковалентные связи образуются только между ближайшими соседними атомами. Молекулы с ковалентной связью бывают неполярными и полярными (дипольными). Молекулы, в которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, называют *неполярными*. У полярных (дипольных) молекул центры противоположных по знаку зарядов не совпадают и находятся на расстоянии друг от друга. Дипольная молекула характеризуется дипольным моментом, который определяется произведением заряда на расстояние между центрами положительных и отрицательных зарядов:

$$\vec{p} = q \cdot \vec{l}$$

Заряд q примерно равен $2 \cdot 10^{-19}$ Кл, расстояние $l = (1-3) \cdot 10^{-10}$ м. Поэтому дипольный момент молекулы равен $p = 5 \cdot (10^{-29} - 10^{-30})$ единиц СИ.

Примеры неполярной (симметричной) и полярной (несимметричной) молекул:



Ковалентная связь характерна для органических молекул. Но она может наблюдаться и у твердых неорганических веществ, если их кристаллические решетки состоят из атомов. Примерами таких веществ являются алмаз, кремний, германий, карбид кремния и др. Ковалентная связь характеризуется большой прочностью.

Ионная связь. Этот вид химической связи характерен для ионных кристаллов. Ионная связь определяется силами притяжения между положительными и отрицательными ионами. В узлах ионного кристалла располагаются ионы.

Типичными представителями с ионной связью являются кристалл соли - NaCl, а также галогениды щелочных металлов.

Металлическая связь. С помощью этой связи образуются твердые кристаллические вещества. Металлы можно рассматривать как системы, построенные из положительных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки, находящихся в среде свободных электронов. Монолитность металла объясняется силами притяжения между положительными атомными остовами решетки и электронами. Высокая электропроводность и теплопроводность металла объясняется наличием свободных электронов.

Молекулярная связь. Такая связь существует в некоторых веществах между молекулами с ковалентными внутримолекулярными связями. Силы притяжения в этом случае объясняются согласованным движением электронов в соседних молекулах (силы Ван-дер-Ваальса). В любой момент времени электроны максимально удалены друг от друга и максимально приближены к положительным зарядам. При этом силы притяжения валентных электронов положительно заряженными остовами соседних молекул оказываются сильнее сил взаимного отталкивания электронов внешних орбит. Вещества с этой связью (например, парафин) имеют низкую температуру плавления из-за непрочности их кристаллической решетки.

1.2. Особенности строения твердых веществ

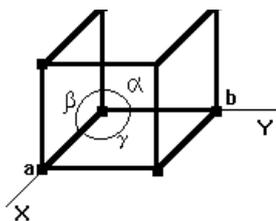
Большинство конструкционных и электротехнических материалов представляют собой твердые вещества.

1.2.1. Кристаллы

Кристаллическая решетка вещества - это регулярное расположение частиц (атомов, молекул, ионов), с периодической повторяемостью в трех измерениях. Причина той или иной пространственной решетки в основном зависит от размеров атома и электронной конфигурации его внешних оболочек.

Русский ученый Е.С. Федоров почти за 40 лет до того, как были найдены методы рентгеноструктурного анализа, рассчитал возможные варианты расположения частиц в кристаллических решетках различных веществ.

Геометрически возможны 14 разных пространственных решеток, составляющих основу 6 кристаллических систем (см. табл. 1.1), которые характеризуются осевыми углами и осевыми единицами (см. рис. 1.1).



a, b, c - параметры кристаллической решетки.

Рис. 1.1

Таблица 1.1

Пространственные решетки кристаллических систем

Кристаллическая система	Пространственная решетка	Соотношение между осевыми углами и осевыми единицами
1. Триклинная	1. Простая	$a \neq b \neq c \quad a \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$
2. Моноклинная	2. Простая 3. Базоцентрированная	$a \neq b \neq c \quad a = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$
3. Ромбическая	4. Простая 5. Базоцентрированная 6. Объемноцентрированная 7. Гранецентрированная	$a \neq b \neq c \quad a = \beta = \gamma = 90^\circ$
4. Гексагональная	8. Простая 9. Ромбоэдрическая	$a \neq b \neq c \quad a = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$
5. Тетрагональная	10. Простая 11. Объемноцентрированная	$a = b \neq c \quad a = \beta = \gamma = 90^\circ$
6. Кубическая	12. Простая 13. Объемноцентрированная 14. Гранецентрированная	$a = b = c \quad a = \beta = \gamma = 90^\circ$

Параметр кубической решетки обозначается буквой a и находится в пределах 0,28 ... 0,6 Нм (нанометров). Часто постоянную решетки измеряют в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). Гексагональная решетка характеризуется двумя параметрами: стороной шестигранника - a и высотой призмы - c.

В зависимости от вида частиц, образующих кристаллическую решетку, различают:

- атомные;
 - ионные;
 - металлические;
 - молекулярные
- кристаллические решетки.

В узлах атомных решеток находятся атомы, которые связаны друг с другом ковалентной связью.

В узлах ионных решеток располагаются, чередуясь, положительные и отрицательные ионы. Связь между ними ионная. В узлах металлических решеток расположены положительные ионы, в промежутках - свободные электроны. Здесь действует металлическая связь.

В узлах молекулярных решеток находятся молекулы. Такие решетки образуются за счет ковалентной и ионной связей.

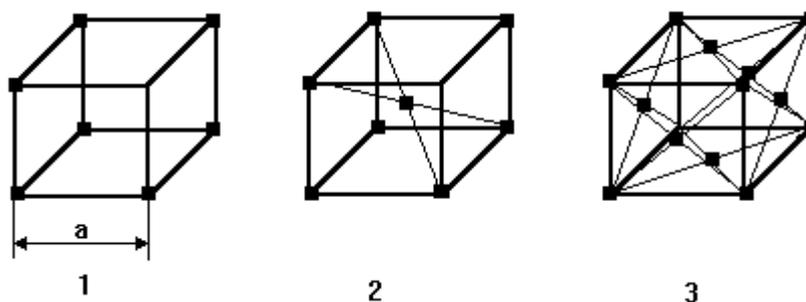


Рис. 2.1. Кубическая кристаллическая решетка:
1- простая; 2 - объемно-центрированная (ОЦК); 3 - гранецентрированная (ГЦК).

1.2.2. Монокристаллическая структура (монокристаллы)

Большинство твердых технических материалов является поликристаллическими, т. е. состоящими из большого количества кристаллических зерен, хаотически ориентированных относительно друг друга. В случае поликристалла в пределах каждого зерна атомы расположены периодически, т. е. регулярно, но при переходе от одного зерна к другому регулярность их расположения нарушается. В монокристаллах отдельные кристаллические зерна ориентированы в пространстве в одном направлении.

Монокристаллическое строение (монокристаллы) в отличие от поликристаллов более совершенно; отличается высокой степенью чистоты и минимальными структурными несовершенствами. Монокристаллы позволяют изучать истинные свойства веществ, исключая влияние границ зерен.

Применение в монокристаллическом состоянии германия и кремния высокой чистоты дает возможность в полной мере использовать их полупроводниковые свойства и свести к минимуму неконтролируемые изменения электрических свойств. Монокристаллы можно получить, если создать условия роста кристаллов только из одного центра кристаллизации. Монокристаллы проявляют анизотропию, т. е. их свойства (электрические, механические и др.) зависят от направления определения этих свойств. Эти направления определяются с помощью индексов Миллера.

1.2.3. Индексы Миллера

Для определения направления в кристалле принимают за начало системы координат одну из вершин элементарной кристаллической ячейки, а в качестве осей принимают ее ребра.

Так для кубического кристалла: плоскость параллельная осям Y и Z (рис. 1.3) имеет индекс (100) , плоскость параллельная осям X и Z - индекс (010) , плоскость параллельная осям X и Y - индекс (001) .

Направление кристаллографических осей записываются с помощью индексов Миллера, заключенные в квадратные скобки (рис. 1.3). Положительное направление оси X обозначают $[100]$, оси Y - $[010]$, оси Z - $[001]$.

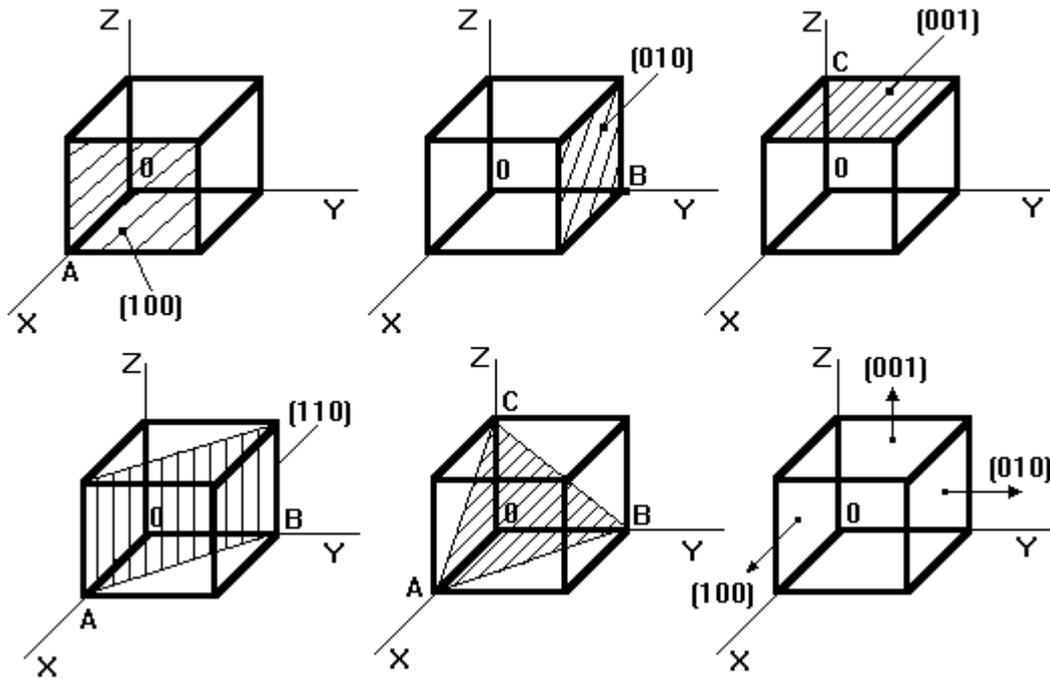


Рис. 1.3. Примеры обозначений направлений и кристаллических плоскостей в кубических кристаллах с помощью индексов Миллера

1.2.4. Процесс кристаллизации

Все кристаллические вещества сохраняют твердое состояние до определенной температуры. При этом следует иметь в виду, что частицы, находящиеся в узлах решетки, совершают непрерывные колебательные движения. С увеличением температуры амплитуда этих колебаний увеличивается. При достижении критической для данного вещества температуры, амплитуда колебаний частиц увеличивается настолько, что происходит разрушение кристаллической решетки, т. е. вещество из твердого состояния переходит в жидкое.

Температура, при которой вещество переходит из твердого состояния в жидкое называется температурой плавления ($t_{пл.}$) (рис. 1.4).

В точке А процесса плавления для полного разрушения кристаллов вещества требуется определенное время и энергия. Точка В соответствует окончанию процесса плавления, после которой температура снова растет.

Рис. 1.4. Кривая нагревания кристаллического вещества

В отличие от кристаллических аморфные вещества не имеют строго определенной температуры перехода из твердого в жидкое состояние. Этот переход происходит в некотором диапазоне температур (рис. 1.5).

Рис. 1.5. Кривая нагревания аморфного вещества.

Обратный переход кристаллических веществ из жидкого состояния в твердое происходит при определенной температуре, называемой *температурой кристаллизации*, а сам процесс образования кристаллов из жидкости называют *кристаллизацией*.

Кристаллизация происходит в два этапа: первый - образование центров кристаллизации (мельчайших частиц кристаллов), второй - рост кристаллов из этих центров. Образовавшиеся кристаллы (их форма, величина и направление роста) определяют все свойства данного вещества. Температура кристаллизации определяется экспериментально; для этого через определенные промежутки времени регистрируется температура охлаждающегося жидкого вещества. В координатах “температура - время” строят кривую охлаждения (см. рис. 1.6).

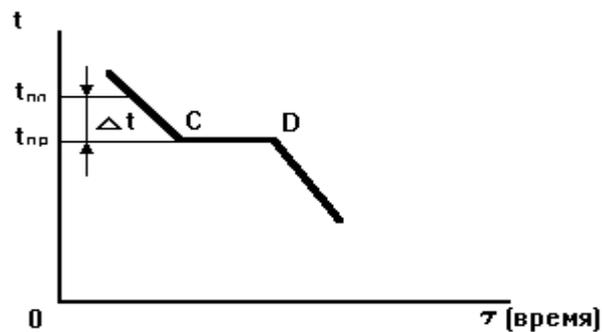


Рис. 1.6. Кривая охлаждения кристаллического вещества

Пока вещество находится в жидком состоянии, температура равномерно понижается до точки “С” (рис. 1.6). Для начала процесса кристаллизации вещество нужно охладить до *температуры переохлаждения* ($t_{пр}$), которая несколько ниже температуры плавления ($t_{пл}$). Разность температур $t_{пл} - t_{пр}$ называют степенью переохлаждения (Δt). В точке “С” при температуре ($t_{пр}$) в расплаве вещества возникают первые центры кристаллизации, число которых увеличивается по мере отвода тепла. В точке “D” процесс кристал-

лизации завершается. До окончания процесса кристаллизации температура вещества остается постоянной, так как этот процесс сопровождается выделением тепла. После затвердения температура плавно снижается. Степень переохлаждения определяет возникновение числа центров кристаллизации и скорость роста кристаллов. При медленном охлаждении получается крупнозернистая структура. При большой степени переохлаждения образуется большое число центров кристаллизации, а скорость роста кристаллов при этом невелика. Следовательно, при быстром охлаждении получается мелкозернистая кристаллическая структура вещества.

Таким образом, изменяя условия охлаждения вещества, можно управлять его кристаллической структурой, а значит и его свойствами. Это обстоятельство лежит в основе термической обработки материалов.

1.2.5. Полиморфизм (аллотропия)

Способность вещества иметь различные кристаллические решетки, называется *полиморфизмом* или *аллотропией*.

Полиморфные превращения происходят главным образом под влиянием температуры; не исключено влияние и других факторов: изменения давления, наличия примесей.

Сущность полиморфизма заключена в том, что при определенных температурах в твердом веществе возникают новые центры кристаллизации, в процессе роста которых может образоваться новая решетка.

Формирование новой решетки происходит с поглощением тепла при нагреве и с выделением тепла при охлаждении. Поэтому при перестройке решетки температура остается постоянной (на кривой охлаждения появляется горизонтальная площадка).

Температурным полиморфизмом обладают около тридцати металлов. Полиморфные превращения происходят в кобальте, железе, олове, титане, уране, цирконии и других веществах.

При изменении кристаллической структуры изменяются и свойства вещества. Ярким примером полиморфных превращений являются модификации углерода. Так графит, имеющий гексагональную кристаллическую решетку, мягкий, хрупкий материал, хорошо проводящий электрический ток. При повышении температуры до 2000°C и давления порядка 10^{10} Па графит можно перевести в алмаз, кристаллическая решетка которого состоит из двух гранцентрированных кристаллических решеток, сдвинутых относительно друг друга на $1/4$ постоянной "а". Алмаз самое твердое вещество, не проводящее электрический ток. Ряд веществ (медь, алюминий, кремний и др.) имеют только одну аллотропическую модификацию.

1.2.6. Аморфные вещества

Внутреннее строение аморфных веществ характеризуется беспорядочным расположением атомов и молекул, т. е. в них отсутствует кристаллическое строение. Эти вещества делятся на две группы:

- простые аморфные вещества - низкомолекулярные жидкости, неорганические стекла, плавленый кварц;
- высокомолекулярные соединения - каучуки, резины, органические стекла, смолы.

1.2.7. Аморфно-кристаллические вещества

Некоторые вещества могут иметь как кристаллическое, так и аморфное строение. Так, оксид кремния SiO_2 в природе встречается в виде кристаллов кварца, а также в аморфном состоянии в виде минерала - опала.

При повышенных температурах может наблюдаться самопроизвольная кристаллизация стекла с образованием мелких кристалликов, т. е. с превращением в аморфно-кристаллический материал, называемый *ситаллом*.

Аморфно-кристаллическую структуру имеют высокополимерные вещества.

1.2.8. Дефекты кристаллов

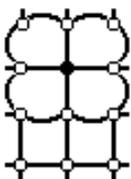
Кристаллов с идеально правильным строением в природе не существует. Структура кристаллов в реальных условиях (при температуре отличной от абсолютного нуля) отличается от идеальных моделей за счет обязательного присутствия в них различных несовершенств. Такие отклонения от идеальных форм, или несовершенства принято называть *дефектами*.

Основными видами дефектов являются:

- точечные;
- линейные;
- поверхностные;
- объемные.

Точечные (нульмерные) дефекты имеют размеры диаметра атома. Основная причина точечных дефектов - тепловое движение атомов. Такие дефекты обязательно появляются в любом кристалле и при увеличении температуры их количество увеличивается. На рис. 1.7 изображен точечный дефект, который называется *вакансией*, представляющий собой незаполненное место в узле кристаллической решетки.

Рис. 1.7



Точечный дефект в виде *атома замещения* (рис. 1.8), когда атом примеси располагается в узле кристаллической решетки.

Рис. 1.8

Атом внедрения (рис. 1.9) - атом примеси расположен в междоузлии.

Рис. 1.9

Линейные (одномерные) дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении. Такие дефекты, в виде нарушения кристаллической структуры вдоль некоторой линии называют *дислокациями*.

Образование дислокаций происходит за счет термических и механических напряжений в процессе кристаллизации и при термообработке материала. Дислокации существенно ухудшают свойства веществ. Так в металлах наличие дислокаций резко снижает их механическую прочность; в полупроводниках - значительно увеличивает электрическую проводимость.

Поверхностные (двухмерные) дефекты представляют собой поверхности раздела между кристаллическими зернами. Сама поверхность кристалла - естественное нарушение кристаллической структуры.

Объемные (трехмерные) дефекты кристалла имеют существенные размеры во всех трех измерениях. К таким дефектам относятся пустоты, включения кристаллических зерен другой кристаллической структуры. Такие дефекты возникают при изменении скорости роста кристалла.

Итак, дефекты кристалла существенно искажают свойства веществ.

Для получения более совершенных кристаллических веществ с минимальным количеством дефектов необходим тщательно контролируемый процесс кристаллизации, а также углубленная очистка от посторонних примесей.

1.3. Элементы зонной теории вещества

Зонная теория - основа современных представлений о различных физических явлениях, происходящих в твердом кристаллическом веществе при воздействии на него электрического поля.

Зонная теория твердого вещества - это теория валентных электронов, движущихся в потенциальном поле кристаллической решетки.

Классификация материалов по электрическим свойствам основана на выводах зонной теории электропроводности веществ.

Как установлено многочисленными экспериментами, электроны в изолированном атоме могут находиться лишь на отдельных орбитах, кото-

рым соответствуют строго определенные значения энергии - *энергетические уровни*.

Согласно *принципу Паули* на одном энергетическом уровне могут находиться не более двух электронов. Часть этих уровней заполнена при нормальном, невозбужденном состоянии атома, на других уровнях электроны могут находиться только тогда, когда атом подвержен внешнему энергетическому воздействию, т. е. когда он возбужден. Под воздействием притяжения положительно заряженного ядра атома электроны стремятся занять ближайšie к ядру уровни с минимальным значением энергии.

При образовании кристаллической решетки твердого вещества все имеющиеся у атома электронные уровни (как заполненные, так и не заполненные) несколько смещаются вследствие воздействия соседних атомов друг на друга. При сближении атомов происходит перекрытие электронных оболочек, это существенно изменяет характер движения электронов. Благодаря такому перекрытию электронных оболочек, электроны могут без изменения энергии переходить от одного атома к другому, т. е. перемещаться по кристаллу. Такое обменное взаимодействие имеет чисто квантовую природу; в этом случае уже нельзя говорить о принадлежности электрона данному атому, а каждый валентный электрон принадлежит всем атомам кристаллической решетки одновременно. Происходит обобществление электронов.

1.3.1. Энергетические зоны

Вследствие обменного взаимодействия дискретные энергетические уровни изолированного атома расщепляются в энергетические зоны, как показано для неметаллического твердого вещества на рис. 1.10.

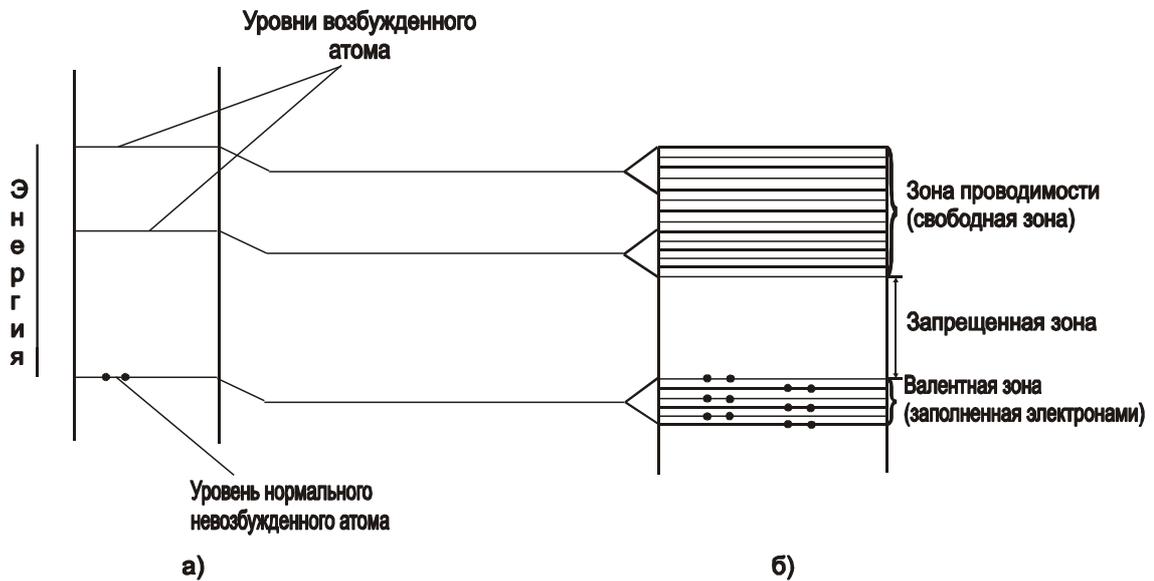


Рис. 1.10. Схема расположения энергетических уровней: а) уединенного атома; б) неметаллического твердого тела

Разрешенные энергетические зоны разделены запрещенными интервалами энергии. Ширина разрешенных энергетических зон не зависит от размеров кристалла, а определяется лишь природой атомов, образующих твердое вещество и симметрией кристаллической решетки.

Количество энергетических уровней определяется количеством атомов, составляющих твердое тело.

Самую верхнюю из заполненных электронами зон называют *валентной*. Эта зона соответствует энергетическим уровням электронов внешней оболочки в изолированных атомах. Ближайшую к ней свободную, незаполненную электронами зону называют *зоной проводимости*. Взаимное положение этих двух зон определяет большинство процессов, происходящих в твердом веществе.

1.3.2. Выводы зонной теории

В соответствии с зонной теорией все вещества по электрическим свойствам подразделяются на три разновидности (рис. 1.11):

- а)- диэлектрики;
- б)- полупроводники;
- в)- проводники.

Взаимное расположение энергетических зон этих трех групп твердых веществ представлены на Рис. 1.11.

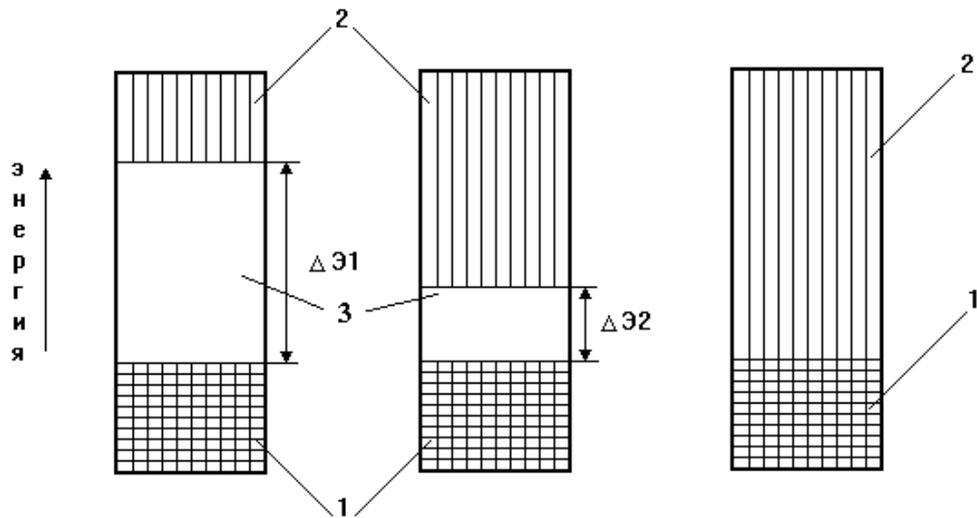


Рис. 1.11. Энергетические диаграммы твердых веществ: 1 - заполненная электронами зона (валентная зона); 2 - зона свободных энергетических уровней (зона проводимости); 3 - запрещенная зона шириной $\Delta \text{Э}$

Энергетические зоны, объединяющие энергетические уровни отдельных атомов вещества называются разрешенными зонами. Разрешенные зоны внутренних электронных орбит заполнены электронами полностью и при изучении электрических свойств твердых веществ не рассматриваются, так как эти электроны в образовании электрического тока не участвуют.

Электрический ток в твердых веществах может быть обусловлен электронами валентной зоны. Разрешенные зоны отдалены друг от друга запрещенными зонами. Значениями энергий, соответствующих этим зонам, электрон обладать не может.

У идеального диэлектрика ширина запрещенной зоны настолько велика ($\Delta \text{Э}1$, см. Рис. 1.11), что электроны не могут переходить в зону проводимости, которая остается абсолютно свободной. У реальных диэлектриков ширина запрещенной зоны может достигать 10эВ (электрон-Вольт).

К полупроводникам относят вещества, имеющие ширину запрещенной зоны меньше 3 эВ. При отсутствии в полупроводнике свободных электронов внешнее электрическое поле, приложенное к нему, не вызовет электрический ток. Если электрон, находящийся в валентной зоне, приобретает достаточную энергию (например, тепловую) для преодоления запрещенной зоны, он оказывается в зоне проводимости. При этом в зоне валентной образуется вакантное место — «дырка». При воздействии внешнего электрического поля это вакантное место занимает соседний электрон, оставив после такого перехода «дырку», т.е. начнется непрерывный процесс.

Дырка движется во внешнем поле противоположно движению электрона, т.е. ведет себя как положительный заряд с отрицательной эффективной массой.

У проводников (металлов) запрещенная зона отсутствует. Даже слабое поле способно сообщить электронам достаточный импульс, чтобы вызвать их переход в зону проводимости. Поэтому металлы хорошо проводят электрический ток.

Подводя итог вышесказанному, необходимо указать, что зонная теория применена к твердым веществам с ковалентными и металлическими связями.

И второе: разделение твердых веществ на полупроводники и диэлектрики довольно условно, т.к. в качестве полупроводников начинают использоваться материалы со все более широкой запрещенной зоной.

2. Конструкционные материалы

Важнейшими из конструкционных материалов являются металлы.

Металловедение - это наука, изучающая строение и свойства металлов.

Основополагающий принцип металловедения - свойства любого материала зависят от его строения, которое зависит от состава, способа получения и последующей обработки материала.

Железо служит основой важнейших материалов - стали и чугуна.

Сталь - основной металлический материал, широко применяемый в различных отраслях народного хозяйства благодаря сочетанию целого комплекса физико-механических, физико-химических и технологических свойств. Развитие техники предъявляет все возрастающие требования к свойствам и качеству стали.

2.1. Основы металловедения

2.1.1. Кристаллическое строение металлов

За редким исключением, металлы в твердом состоянии состоят из огромного количества зерен (кристаллитов), различимых только в микроскоп. Каждое зерно состоит из атомов, расположенных упорядочено в пространстве, образуя контур какого-либо геометрического тела, например куба. Такие геометрические тела называются *элементарными ячейками*. В одном зерне ячейки ориентированы одинаково. В соседних зернах ориентация ячеек уже другая.

Атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, колеблются относительно своего среднего положения с частотой 10^{13} Гц.

Что за сила удерживает атомы в узлах решетки? Чем обеспечивается прочность металлов? Для ответа на эти вопросы следует вспомнить строение атомов. Атом имеет ядро, имеющее положительный заряд. Ядро окружают несколько электронных оболочек, заполненных строго определенным количеством электронов, сильно связанных с ядром. На внешней оболочке находятся несколько электронов, слабо связанных с ядром и обуславливающих валентность металла.

С помощью так называемых валентных электронов атомы металла связываются с соседними атомами, взаимодействуют также и с атомами других элементов.

Но не все валентные электроны участвуют в образовании металлической межатомной связи. Часть их обеспечивает электро- и теплопроводность металла.

Наиболее распространенными типами кристаллических решеток металлов являются:

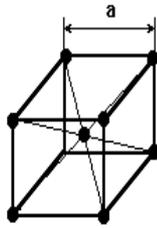


Рис. 2.1. Кубическая объемноцентрированная решетка (ОЦК)

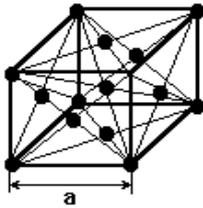


Рис. 2.2. Кубическая гранецентрированная решетка (ГЦК)

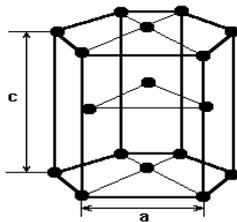


Рис. 2.3. Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ)

- ОЦК - решетку имеют: железо (при нормальной температуре), хром, вольфрам, ванадий, молибден, калий и натрий и др.;
- ГЦК - решетку имеют: никель, медь, алюминий, свинец, серебро, железо при температурах 911 ... 1392°C и др. металлы;
- ГПУ - решетку имеют: магний, цинк, кобальт, цирконий и титан при комнатной температуре.

Кубические решетки имеют по 8 атомов, расположенных в вершинах куба, а остальные в центре куба (у ОЦК) или на пересечении диагоналей каждой грани (в центре граней у ГЦК) (см. рис. 2.1, 2.2).

Ячейка решетки ГПУ - призма, основания которой шестигранники, в центрах которых расположены по одному атому. Внутри призмы находятся еще три атома, образующих равносторонний треугольник. (Рис. 2.3).

Кристаллические решетки металлов являются плотноупакованными, т. е. атомы, расположенные в узлах, соприкасаются друг с другом своими внешними электронными оболочками.

Металлы отличаются друг от друга не только типом кристаллической решетки, но и параметрами, т. е. размерами геометрического тела. Так для кубических решеток - ребро - "а", у гексагональной сторона основания "а" и расстояние между основаниями "с".

Параметр - расстояние между центрами соседних атомов выражается в нанометрах (нм) или ангстремах (А); $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$.

Как правило параметры решеток металлов находятся в пределах от 2 до 7 А (0,2...0,7 нм).

Некоторые металлы способны видоизменять тип кристаллической решетки в зависимости от температуры. Например, железо при температуре до 911°C имеет ОЦК-решетку, до 1392°C - ГЦК, а затем вплоть до температуры плавления снова принимает форму ОЦК.

Способность металла изменять тип своей кристаллической решетки в зависимости от температуры называется **аллотропией (полиморфизмом)**.

Полиморфизмом обладают кроме железа так же титан, цирконий, олово, селен и др. металлы.

Различные полиморфные формы вещества называют **модификациями** и обозначают начальными буквами (α , β , γ , δ) греческого алфавита.

Кристаллическая решетка зерен металла не является идеальным геометрическим построением. Она обладает, как и кристаллы других веществ, различными несовершенствами (дефектами): вакансиями, внедренными атомами, дислокациями (см. разд. 1). Наличие дефектов кристаллических решеток отрицательно сказывается на прочности металлов. Важное значение, для показателей прочности металла, имеет строение и состояние границ его зерен. При кристаллизации металла (т. е. при образовании зерен из жидкого металла) кристаллическая решетка у границ зерна содержит большое количество вакансий и недостроенных ячеек.

Кроме этого по границам зерен могут находиться различные легкоплавкие неметаллические примеси. Например, в стали между зернами часто присутствует сульфид железа FeS (легкоплавкое вещество). Тугоплавкие включения, например сульфид марганца MnS, находятся внутри зерен.

2.1.2. Кристаллизация металлов

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

Перед тем, как рассматривать вопрос кристаллизации металлов и возможности управления размерами зерен с целью получения требуемых

свойств материала, рассмотрим процесс нагрева и охлаждения железа. (См. рис. 2.4)

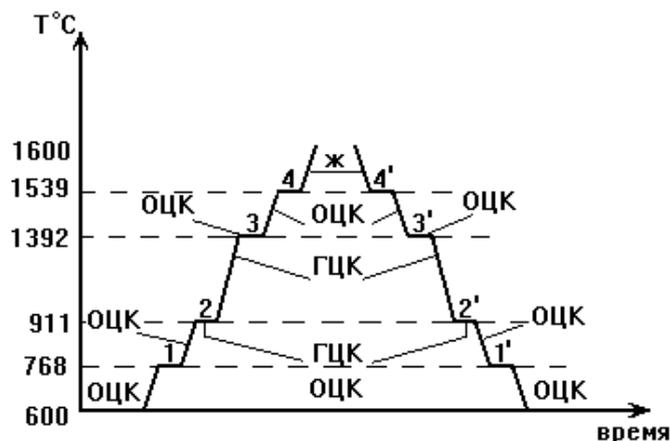


Рис. 2.4. Кривые нагрева и охлаждения железа

При $T = 768^\circ\text{C}$ железо теряет магнитные свойства, т. е. железо- α переходит в немагнитное β -железо. Решетка ОЦК сохраняется до $T = 911^\circ\text{C}$; при этой температуре происходит перестройка ОЦК-решетки в ГЦК. Эта перестройка требует некоторой энергии. Рост температуры металла прекращается (участок 2), хотя поглощение теплоты металлом продолжается. Решетка ГЦК (γ -Fe) сохраняется до 1392°C , затем снова перестраивается в ОЦК (δ -Fe). ОЦК сохраняется до температуры плавления железа, т. е. до 1539°C . Кристаллическая решетка разрушается. При этом рост температуры не происходит (участок 4) до полного разрушения кристаллической решетки.

Процесс охлаждения идет в обратном порядке по кривой $4' - 3' - 2' - 1'$ до полного остывания отвердевшего металла. При снижении температуры до 1539°C (участок $4'$) происходит переход железа из жидкого состояния в твердое, кристаллическое. При этом атомы, занимая определенное положение в узлах кристаллической решетки, резко уменьшают амплитуду колебаний, а освобождающаяся тепловая энергия поддерживает температуру на одном уровне (участок - $4'$) до окончания процесса кристаллизации.

При $T = 1392^\circ\text{C}$ (участок - $3'$) происходит превращение δ -Fe в γ -Fe, а при $T = 911^\circ\text{C}$ - γ -Fe в железо с решеткой ОЦК. На участке $1'$ происходит превращение немагнитного железа с ОЦК-решеткой (β -Fe) в магнитное α -Fe с той же решеткой.

Анализ кривых нагрева и охлаждения показывает, что при плавлении металла происходит разрушение его кристаллической решетки, сопровождаемое значительным увеличением кинетической энергии его атомов, связанной с ростом амплитуды их колебаний.

При затвердевании металла происходит процесс формирования его кристаллической решетки, что вызывает резкое уменьшение энергии

движения его атомов. Выделяющаяся при этом, так называемая скрытая теплота кристаллизации, поддерживает температуру металла постоянной до окончания процесса кристаллизации.

При достижении жидким металлом критической температуры (температуры плавления - $T_{пл}$) возникают центры кристаллизации, состоящие из ячеек кристаллической решетки. Постепенно эти центры обрастают другими ячейками и превращаются в зерна металла. Центры возникают в течение всего процесса кристаллизации до окончания и каждый центр превращается в зерно. По мере роста образующихся кристаллов они сталкиваются друг с другом и теряют правильную форму. На границах зерен возникает большое количество дефектов в виде недостроенных ячеек, вакансий и т. п. В местах четко обозначенного направления отвода тепла зерна образуются вытянутыми вдоль этого направления. В местах, где такое направление отсутствует, зерна получаются равноосными, т. е. имеющие одинаковые размеры по всем направлениям.

Средний размер образующихся зерен зависит от количества центров кристаллизации. Чем больше центров, тем мельче зерно и тем прочнее металл. Так для получения мелкозернистого металла в расплавленный металл вводят небольшое количество специально подобранного вещества - *модификатора*, который наряду с основным металлом образует дополнительные центры кристаллизации, вследствие чего общее число центров увеличивается, а размеры зерен уменьшаются.

В качестве примера рассмотрим расположение зерен стального слитка, схематично изображенного на рис. 2.5.

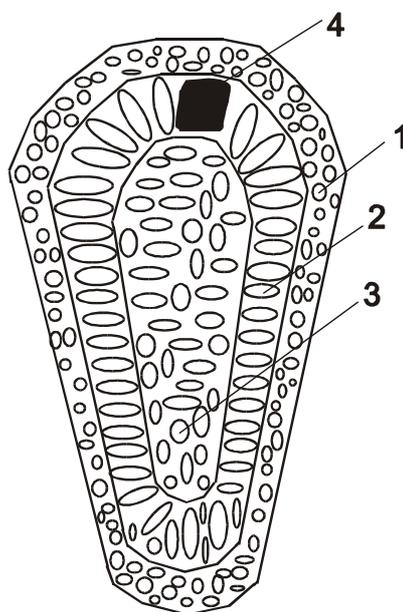


Рис. 2.5. Схема строения стального слитка

Стальной слиток в разрезе состоит из трех зон кристаллизации: тонкой зоны мелких равноосных зерен 1, зоны столбчатых кристаллов 2, имеющих вытянутые формы вдоль направления отвода теплоты и средней зоны равноосных зерен 3. В третьей зоне нет преимущественного направ-

ления отвода теплоты, поэтому зерна равноосные. В верхней части слитка образуются усадочная раковина 4.

2.1.3. Механические свойства металлов

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

Деформация - это изменение формы и размера изделия. Она может быть растягивающей, сжимающей и сдвиговой. Растяжение приводит к увеличению размера изделия (или образца) в направлении силы и уменьшению размера в поперечном направлении.

При сжатии, наоборот, продольный размер уменьшается, а поперечный увеличивается.

Сдвиг приводит к смещению одной части материала изделия (образца) относительно другой части по какой-нибудь плоскости.

Любая деформация может быть упругой или остаточной.

Упругая деформация после снятия вызвавшей ее силы полностью исчезает, и все размеры изделия (образца) остаются без изменения. При этом не изменяется и взаимное расположение атомов в кристаллической решетке.

При остаточной деформации происходят необратимые перемещения материала, сохраняющиеся после снятия нагрузки. Такая деформация носит название *пластической*. Результатом пластической деформации может быть разрушение детали.

Механические свойства в основном отражают способность материала сопротивляться пластической деформации.

К механическим свойствам относятся:

- твердость;
- прочность;
- пластичность;
- ударная вязкость.
- упругость;
- хрупкость;

Твердость - это способность материала оказывать сопротивление внедрению в него под действием силы наконечника из другого, более твердого материала.

Замер твердости производится при помощи специальных приборов-твердомеров: по методу Бринелля и по методу Роквелла. Твердость по Бринеллю (НВ) оценивается в мегапаскалях (Мпа) или в кг·с/мм². 1 Ма = 0,1 кг·с/мм².

Прочность - характеризует сопротивление материала пластической деформации под действием приложенной силы.

При испытании на растяжение образца материала на специальной разрывной машине определяются следующие основные характеристики прочности:

- предел пропорциональности ($\sigma_{\text{пц}}$);
- предел упругости (σ_y);
- предел текучести (σ_T);
- предел прочности (временное сопротивление разрыву) (σ_B).

Временное сопротивление или предел прочности σ_B - это напряжение, создаваемое в образце наибольшей нагрузкой при испытании перед разрушением образца

$$\sigma_B = \frac{P_{\text{max}}}{F_0}, \quad \text{кг}\cdot\text{с}/\text{мм}^2$$

где: F_0 - площадь сечения образца, мм^2 .

Пластичность - это способность материала к пластической деформации. Характеристиками ее являются:

- относительное удлинение δ

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

- относительное сужение ψ

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

где l_0 , F_0 - длина образца и сечение его до испытаний;

l_k , F_k - длина образца в разрушенном состоянии и площадь его сечения в месте разрушения.

Ударная вязкость - способность материала сопротивляться разрушению при ударной нагрузке. Она оценивается по результатам ударного разрушения на маятников копре специального брусчатого образца с надрезом.

Ударная вязкость обозначается КСУ, измеряется в МДж/м² или в кг·с·м/см² и вычисляется как результат деления затраченной на разрушение образца работы A на его сечение:

$$\text{КСУ} = \frac{A}{F}.$$

2.1.4. Компоненты и фазы в сплавах железа с углеродом

Ж е л е з о - элемент VIII группы периодической системы. Имеет две аллотропические модификации: α и γ . Модификация Fe_α существует в двух интервалах температур: до 911⁰С и от 1392 до 1539⁰С; решетка ОЦК с периодом 2,86 Å при комнатной температуре. Плотность Fe_α равна 7680 кг/м³, сопротивление - 0,10 Ом·мм²/м, Fe_α обладает ферромагнитными свойствами ниже температуры 768⁰С, называемой точкой Кюри.

Модификация Fe_γ существует в интервале температур от 911 до 1392⁰С и имеет ГЦК- решетку.

У г л е р о д - элемент IV группы, существует в двух модификациях: графита и алмаза. При нормальных условиях стабилен графит, при высоких температурах и давлениях стабильным становится алмаз.

Ф а з ы в сплавах железа с углеродом следующие:

- жидкий раствор;
- феррит;
- аустенит;
- цементит.

Ф е р р и т (Ф) - твердый раствор внедрения углерода в Fe_{α} , имеет ОЦК-решетку; растворимость углерода в этой решетке незначительна. Так в низкотемпературном феррите углерода содержится 0,02%, в высокотемпературном - 0,1%. Такая низкая растворимость углерода в Fe_{α} обусловлена малым размером межатомных пор в ОЦК-решетке. Значительная доля атомов углерода вынуждена размещаться на дефектах решетки (вакансиях, дислокациях).

Азот с ферритом образует твердый раствор внедрения, а металлы - твердый раствор замещения.

Феррит - мягкая, пластичная фаза.

А у с т е н и т (А). Название произошло в честь ученого Р. Аустена. А - твердый раствор внедрения углерода в Fe_{γ} . Имеет ГЦК - решетку. Растворимость углерода в Fe_{γ} достигает 2,14%. Такая достаточно большая растворимость объясняется тем, что межатомные поры ГЦК - решетки в 1,65 раза больше, чем ОЦК - решетки.

Аустенит, так же, как и феррит способен растворять и другие элементы, при этом металлы образуют твердые растворы замещения. Аустенит пластичен, но более прочен, чем феррит.

Ц е м е н т и т (Ц) - химическое соединение железа с углеродом (Fe_3C). Он содержит 6,67% углерода; имеет сложную ромбическую решетку. Твердый, хрупкий материал. Обладает слабыми ферромагнитными свойствами, которые теряет при температуре $210^{\circ}C$.

При высоких температурах разлагается на графит и аустенит, поэтому температура плавления точно не определена и принята равной $1250^{\circ}C$.

В цементите железо может замещаться марганцем, хромом и другими металлами; углерод - частично азотом.

Г р а ф и т - углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Имеет гексагональную кристаллическую решетку ($a = 1,14\text{А}$, $c = 3,40 \text{А}$), плотность 2500 кг/м^3 . Обладает электропроводностью, химически стоек, мягок, имеет малую прочность.

2.1.5. Диаграмма состояния железо - углерод

Сплавы на основе железа и особенно железоуглеродистые сплавы - стали и чугуны, продолжают оставаться важнейшими конструкционными материалами.

Русский ученый Чернов Д. К. (1839 - 1921), которого по праву называют отцом современного материаловедения, разработав теорию кристаллизации и строения слитков, указал актуальные пути улучшения качества

стали. В 1868 г. им были открыты так называемые критические точки стали.

Для понимания природы свойств разнообразных марок стали и чугунов необходимо иметь представление будущему инженеру о диаграмме железо-углерод, разобраться на ней в структурно-фазовых превращениях железоуглеродистых сплавов (см. рис. 2.6).

Ввиду того, что цементит ведет себя как самостоятельный компонент сплава, поэтому на диаграмме показаны две согласующиеся друг с другом шкалы концентрации: одна показывает содержание углерода, а другая количество цементита в процентах. Таким образом, левая ордината соответствует чистому железу, а правая — цементиту.

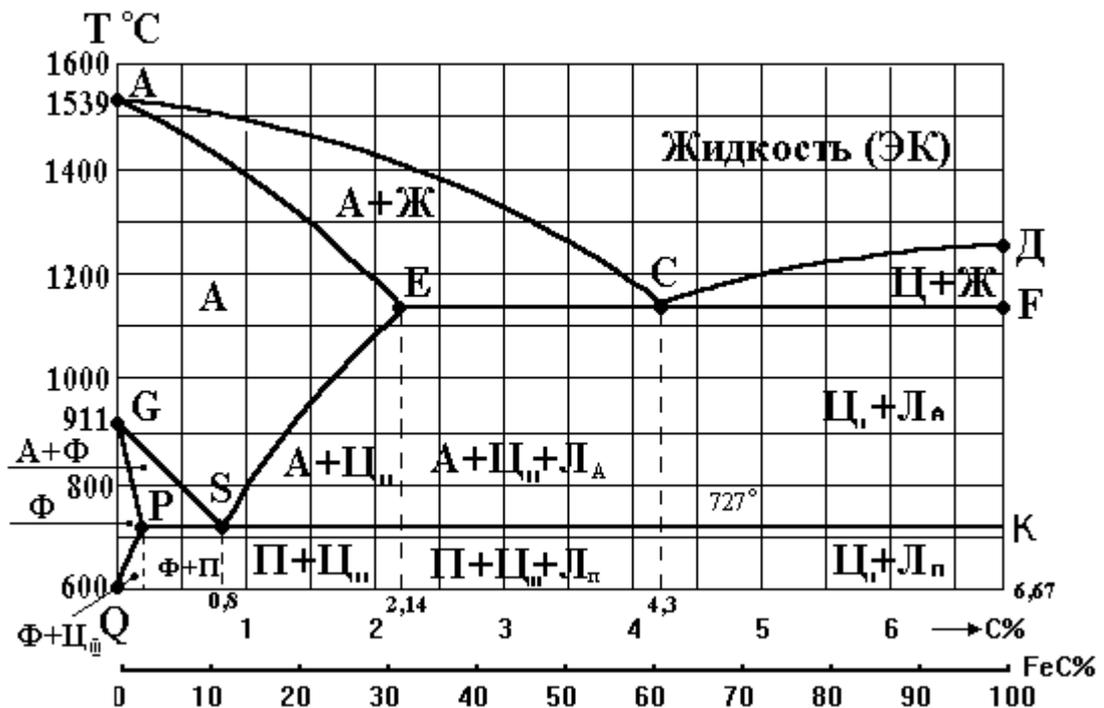


Рис. 2.6. Упрощенная диаграмма Fe - C

Анализируя диаграмму следует пользоваться простым правилом: умножение содержания углерода на 15 дает содержание цементита в стали и чугуне, %.

Диаграмма состояния Fe - C характеризует фазовый состав и превращения в сплавах с концентрацией от чистого железа до цементита.

Превращения в сплавах диаграммы происходит как при затвердевании жидкой фазы (Ж), так и в твердом состоянии.

Таблица 2.1

Характерные точки диаграммы Fe - C

Обозначение точки на диаграмме	Температура, С ⁰	Концентрация углерода, %
A	1539	0
D	1250	6,67

E	1147	2,14
C	1147	4,3
F	1147	6,67
G	911	0
P	727	0,02
S	727	0,8
K	727	6,67
Q	600	0,006

Первичная кристаллизация происходит в интервале температур, определяемых линиями ACD и AECF.

Вторичная кристаллизация вызывается превращением железа одной аллотропической модификации в другую и переменной растворимостью углерода в аустените и феррите.

Часть диаграммы Fe - C с содержанием углерода в сплаве до 2,14% относится к стали, а остальная - к чугунам.

Основными фазами, от которых зависят свойства сплавов, являются:

- феррит (Ф);
- аустенит (А);
- цементит (Ц).

В аустените может раствориться углерода максимально 2,14% (при $T = 1147^{\circ}\text{C}$). Атомы растворенного углерода располагаются в центре ячеек ГЦК-решетки аустенита. Обычно аустенит существует при $T \geq 727^{\circ}\text{C}$. При комнатной температуре он может сохраниться в виде остаточного только в закаленной стали.

При $T = 720^{\circ}\text{C}$ аустенит может содержать только 0,8% углерода (точка S на рис. 2.6); во всех точках на линии PSK аустенит содержит 0,8% углерода. При этом аустенит находится в равновесном состоянии с ферритом (участок PS) и цементитом (участок SK).

При повышении температуры растворимость углерода в аустените возрастает по линии SE до 2,14% при 1147°C .

Следует уяснить, что при охлаждении всех сплавов, содержащих аустенит и лежащих ниже и правее линии его насыщения углеродом SE, из него будет выделяться углерод (вследствие уменьшения его растворимости). Выделяющийся из сплава углерод при этом образует с Fe цементит, получивший название вторичного (Ц_{II}). (Рис. 2.6, области ниже и правее линии SE).

Из диаграммы видно, что количество цементита в сплавах возрастает от 0 до 6,67% углерода. Количество феррита соответственно убывает от 100% до 0. Поэтому у сплавов будут возрастать свойства, определяемые цементитом и снижаться характеристики, определяемые ферритом.

Таким образом, сплавы, представленные на диаграмме охватывают широкий диапазон механических свойств: высокая пластичность, вязкость, небольшая твердость в левой части диаграммы и очень большая твердость с очень малыми пластичностью и вязкостью - в правой ее части.

Рассмотренные ранее и входящие в состав сталей и чугунов фазы (аустенит, феррит, цементит) могут также образовать механические смеси с характерными для них свойствами: перлит и ледебурит.

П е р л и т (П) - это механическая смесь феррита и цементита. Он образуется из аустенита, содержащего 0,8% углерода. Аустенит, находящийся в любой части диаграммы выше 727° С, остывая и подходя к 727° С, т.е. к линии PSK, приобретает концентрацию 0,8% углерода. Распад происходящий по формуле:



Л е д е б у р и т (Л) - механическая смесь аустенита и цементита. Название этой смеси дано в честь немецкого ученого Ледебура. Образуется из жидкой фазы при постоянной температуре 1147°С и содержит 4,3% углерода. Когда остывающая жидкая фаза приближается по температуре к линии ЕС (1147°С), углерода в ней содержится 4,3% и она, затвердевая, образует смесь зерен аустенита и цементита по формуле:



При дальнейшем охлаждении содержание углерода в аустените из-за уменьшения растворимости снижается по линии FS и при 727°С (линия SK) достигает 0,8%. Аустенит при этом превращается в перлит, ледебурит становится смесью зерен перлита и цементита. На диаграмме ледебурит с аустенитом обозначен Л_А, а с перлитом - Л_П.

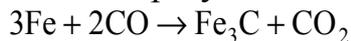
Ледебурит содержится только в чугунах и отсутствует в сталях.

2.2. Выплавка чугуна и стали

Основная масса производимой в стране стали получается из чугуна путем его переплавки. Чугун выплавляется из железной руды в доменных печах. Железо в руде содержится в виде оксида (Fe₂O₃, Fe₃O₄ или FeO), называемого рудным минералом. Кроме рудного минерала в руде содержится пустая порода, в основном состоящая из кремнезема SiO₂. В железной руде содержится также небольшое количество марганца в виде минерала MnO₂ (пиролюзита).

Чтобы выплавить чугун, надо восстановить железо из его оксида и отделить его от пустой породы. Для этого вместе с рудой в доменную печь надо загрузить кокс (топливо) и флюс, известняк CaCO₃ (углекислый кальций). Кокс служит источником теплоты, необходимой для плавки, а также поставщиком оксида углерода - CO - восстановителя железа. Флюс (известняк) в сочетании с пустой породой - кремнеземом SiO₂, образует легкоплавкую смесь, которая скапливается над расплавленным чугуном в виде шлака. Так пустая порода отделяется от металла. Но вместе с рудой, коксом и известняком в чугун, а из него в сталь, попадают вредные примеси, главным образом сера и фосфор. Сера находится в руде и коксе в виде сульфидов FeS, FeS₂, а фосфор - в руде и известняке в виде минералов 3CaP₂O₅ и 3FeO·P₂O·8H₂O.

Благодаря воздействию CO из оксидов железа восстанавливается т.н. губчатое железо, которое взаимодействует с раскаленным коксом и в особенности с CO, науглероживается и образует цементит:



При увеличении содержания углерода до 4,3% образуется легкоплавкая (ледебуритная) смесь, которая плавится и стекает в колодец доменной печи. Затем по мере повышения температуры в нижней части печи образуются новые порции губчатого железа, которые плавятся в образующемся чугуна.

Одновременно с восстановлением железа из пирролюзита и кремнезема восстанавливаются и растворяются в жидком чугуна марганец и кремний. Растворяются также сера и фосфор.

Скапливающийся в колодец доменной печи жидкий чугун периодически выпускается, разливается и транспортируется на переплавку.

Примеси - марганец и кремний считают полезными. К вредным примесям относятся сера и фосфор, а также попадающие из атмосферы кислород, азот и водород.

Сера в виде сульфида марганца (MnS) находится внутри зерен, а в виде сульфида железа (FeS) - по границам зерен.

Фосфор в основном растворяется в феррите, делая его хрупким, а избыточный образует фосфид железа Fe₃P.

Кислород образует точечные включения оксидов, азот и водород частично растворяются, а частично образуют точечные включения нитридов и гидридов.

Все эти примеси при переплавке чугуна переходят в сталь.

Процесс выплавки стали сводится к тому, чтобы удалить лишний углерод до требуемого уровня, а также примесные элементы до определенных пределов.

В зависимости от назначения стали, существует несколько промышленных способов ее выплавки.

При любом способе плавильная печь имеет выложенную огнеупорным кирпичом ванну с отлогими стенками.

В нее загружают т. н. шихтовые материалы, необходимые для выплавки стали:

жидкий или твердый чугун;

стальной лом;

шлакообразующие материалы для удаления в шлак вредных примесей.

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

В ходе плавки по достижении в ней заданного количества углерода дальнейшее его окисление прекращают. Для этого прекращают подачу кислорода и в жидкий металл вводят раскислители в такой последовательности:

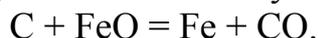
ферромарганец (FeMn)

ферросилиций (FeSi)

и алюминий(Al). Раскислители удаляют из ванны закись железа и этим останавливают окисление углерода.

Полностью раскисленная сталь называется *спокойной*, а недостаточно раскисленная (например, только ферромарганцем) продолжает “кипеть” при выпуске, заливке в форму и при кристаллизации. Такую сталь называют *кипящей*.

Процесс окисления углерода в жидкой стали сопровождается напоминающим кипение бурным выделением из нее пузырей оксида углерода:



Большинство марок стали выплавляют спокойными.

Во время выплавки вводят специальные материалы для удаления вредных примесей.

После выплавки готовую сталь разливают в специальные формы - изложницы, в которых происходит кристаллизация с образованием слитка. (Строение стального слитка - см. рис. 2.5).

С целью улучшения качества стали применяют следующие технологические меры:

- использование шихтовых материалов с минимальным содержанием S и P;
- применение электродуговых и вакуумных печей индукционного нагрева;
- обработка стали синтетическим шлаком;
- обработка стали вакуумом для удаления из нее газов и различных неметаллических примесей;
- продувка жидкой стали нейтральным газом аргоном для удаления газов.

Осваивается и постепенно внедряется в производство перспективное направление получения стали непосредственно из руды, минуя доменное производство.

2.3. Углеродистые стали

Основной продукцией черной металлургии является сталь. Причем примерно 90% выплавляется углеродистой стали и $\approx 10\%$ - легированной.

(О легированной стали - см. 2.3.1).

Сплавы железа с углеродом (при содержании $C < 2,14\%$) называют углеродистыми сталями, которые занимают левую часть диаграммы Fe-C (см. рис. 2.6).

Содержание железа в этих сталях может колебаться в пределах 97,0...99,5%. Они имеют сложный по химическому составу сплав. Один элемент - углерод в состав углеродистых сталей вводится специально. Каково же влияние углерода на свойства стали? Увеличение содержания углерода в стали приводит к повышению прочности и снижению пластичности.

Увеличение содержания углерода повышает порог хладоломкости и уменьшает ударную вязкость.

Следует иметь ввиду при этом, что твердость и прочность стали могут быть увеличены в результате термической обработки (см. 2.7.1) в три-пять раз.

А каково же влияние постоянных примесей?

К постоянным примесям относятся:

- марганец;
- кремний;
- фосфор;
- сера,

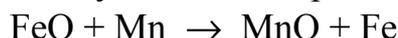
а также газы (водород, азот, кислород).

Содержание этих элементов в стали ограничивается следующими верхними пределами, %:

0,8Mn; 0,5Si; 0,05P; 0,05S (кроме отдельных марок стали).

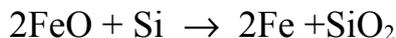
При большем содержании этих элементов сталь относится к сорту легированных, куда эти элементы вводятся специально.

Марганец. Его вводят в любую сталь для раскисления:



т.е. для устранения вредных примесей закиси железа. Марганец повышает прочность железа.

Кремний. Его влияние аналогично влиянию марганца. Он раскисляет сталь по реакции:



Фосфор и сера - считаются вредными примесями. Попадая в сталь из руды, они снижают прочность, пластичность и ударную вязкость.

Растворяясь в феррите, фосфор упрочняет его и делает хрупким, т.е. снижает вязкость стали, особенно при низких температурах (придает стали хладноломкость).

Сера не растворима в железе, поэтому любое ее количество образует с железом сульфид железа FeS. Это соединение располагается по границам зерен, делает сталь хрупкой при 800°C и выше, т.е. в работе температур красного каления. Такое явление носит название красноломкости.

Вследствие красноломкости сталь с повышенным содержанием серы не поддается горячей обработке давлением.

По содержанию углерода углеродистые стали делятся на:

- низкоуглеродистые (до 0,25% углерода) очень пластичны, хорошо свариваются;

- среднеуглеродистые (0,3...0,6% углерода) обладают достаточно высокой прочностью; являются основными конструкционными материалами для машиностроения и др. отраслей;

- высокоуглеродистые (0,7...1,3% углерода) обладают очень высокой твердостью, низкими пластичностью и вязкостью. Из этих сталей изготавливают режущий и другой инструмент, а также изделия с высокой износостойкостью.

По назначению углеродистые стали делятся на:

- строительные;
- конструкционные;
- инструментальные.

Стали обыкновенного качества изготавливают в соответствии с ГОСТ 380-94 следующих марок: Ст0, Ст1_{кп}, Ст1_{сп}, Ст2_{кп}, Ст2_{сп}, Ст3_{кп}, Ст3_{сп}, Ст4_{кп}, Ст4_{сп}, Ст5_{кп}, Ст5_{сп}, Ст6_{кп}, Ст6_{сп}.

Расшифровка марки: Стенд для исследования – «сталь», цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава; буквы – степень раскисления (кп – кипящая, сп – пулуспокойная).

В стали Ст0 углерода не более 0,23%, марганец и кремний – отсутствуют.

В стали Ст1 углерода от 0,06 до 0,12%, марганца от 0,25 до 0,5%, кремния около 0,05%; увеличение номера стали говорит об увеличении процентного содержания С, Мп и Si. Так в стали Ст6 углерода от 0,38 до 0,49%, марганца от 0,5 до 0,8% и кремния от 0,15 до 0,30%.

Качественные углеродистые конструкционные стали имеют в своем составе не более 0,03% серы и не более 0,03% фосфора. Содержание углерода в них не превышает 0,85%.

Маркировка таких сталей выражается двухзначным числом, означающим содержание углерода в сотых долях процента: сталь 05, 08, 10, 15, 20, ... 40, 45, 50, ..., 85. Буква А, стоящая в конце марки стали означает высокое качество: более полное раскисление, меньше содержание серы и фосфора (менее 0,02% каждого). Из этих сталей делают ответственные детали машин и механизмов.

Инструментальные углеродистые стали являются высокоуглеродистыми, содержащими углерода от 0,7 до 1,3 %. Они имеют высокую твердость и износостойкость.

Их маркировка: У7, У7А, У8, У8А, ..., У13, У13А. Цифра в марке стали означает содержание углерода в десятых долях %, буква А - высокое качество. Такие стали используют для изготовления различного режущего инструмента.

2.3.1. Легированные стали

Легированной, называется такая сталь, в состав которой кроме углерода вводят один или несколько других элементов, называемых легирующими, с целью улучшения механических и технологических свойств стали или получения каких-либо новых свойств ее, не присущих углеродистым сталям.

В качестве легирующих используют следующие элементы.

Наименование элемента	Его буквенное обозначение в марке стали
1	2
Хром (Cr)	Х
Никель (Ni)	Н
Молибден (Mo)	М
Марганец (Mn)	Г

Вольфрам (W)	В
Ванадий (V)	Ф
Ниобий (Nb)	Б
Кобальт (Co)	К
Кремний (Si)	С
Титан (Ti)	Т
Цирконий (Zr)	Ц

1	2
Алюминий (Al)	Ю
Фосфор (P)	П
Азот (N)	А
Бор (B)	Р
Медь (Cu)	Д

По своему назначению легированные стали объединяются в следующие группы:

- конструкционные, применяемые для изготовления деталей машин;
- низколегированные (строительные), применяемые в основном в строительстве;
- инструментальные, применяемые для изготовления разнообразного по своему назначению инструмента;
- стали с особыми свойствами (специальные стали): нержавеющие, жаропрочные, теплоустойчивые, износоустойчивые и электрическими свойствами.

Легированные стали производят качественными и высококачественными. Их, как правило, применяют после закалки и отпуска (см. 2.7.1), т. к. в отожженном состоянии они по механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых.

Маркировка легированных сталей:

первые цифры в марке стали показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, идущие после букв, указывают на примерное содержание данного легирующего элемента (при содержании элемента менее 1 % цифра отсутствует; при содержании около 1% - цифра 1 и около 2 % - цифра 2 и т.д.)

Примеры маркировки:

- сталь состава: 0,1... 0,15% С и 1,3...1,7% Mn обозначается 12Г2;
- сталь состава: 0,28...0,35% С; 0,8...1,1%Cr; 0,9...1,2% Mn и 0,8...1,2% Si обозначается 30ХГС.

Буква А в конце обозначения марки стали говорит о пониженном содержании в ней серы и фосфора ($S < 0,03\%$ и $P < 0,03\%$) и что данная сталь высококачественная.

2.3.2. Легированные конструкционные стали

Высокая конструктивная прочность этих сталей достигается за счет оптимального количества легирующих элементов. Избыточное легирование (за исключением никеля) снижает вязкость стали и делает ее хрупкой (см. табл. 2.2).

Таблица 2.2

Химический состав (%) некоторых легированных конструкционных сталей

Марки стали	Легирующий элемент	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Прочие
Цементуемые								
15 X		0,12-0,18	-	-	0,7-1,0	-	-	-
25 ХГМ		0,23-0,29	0,9-1,2	-	0,9-1,2	-	0,2-0,3	-
30 ХГТ		0,24-0,32	0,8-1,1	-	1,0-1,3	-	-	0,03-0,09Ti
20 ХНЗА		0,12-0,24	-	-	0,6-0,9	2,75-3,15	-	-
12 Х2Н4А		0,09-0,15	-	-	1,25-1,65	3,25-3,65	-	-
18 Х2Н4МА		0,14-0,2	-	-	1,35-1,65	4,0-4,4	0,3-0,4	-
Улучшаемые								
40 X		0,36-0,44	-	-	0,8-1,1	-	-	-
40 ХГТР		0,38-0,45	0,7-1,0	-	0,8-1,1	-	-	до 0,09 Ti
40 ХНМА		0,37-0,44	-	-	0,6-0,9	1,25-1,65	до 0,25	-
38 ХМЮА		0,35-0,42	-	-	1,35-1,65	-	до 0,25	до 1,1 Al
Рессорно-пружинные								
60 С2		0,57-0,65	-	1,5-2	-	-	-	-
60 СГА		0,56-0,64	0,8-1,0	1,3-1,8	-	-	-	-
50 ХФА		0,46-0,54	-	-	0,8-1,1	-	-	0,1-0,2V
60 С2ХА		0,56-0,64	-	1,4-1,8	0,7-1,0	-	-	-

Легирующие элементы для этих сталей:

Хром - вводят до 2%, недефицитный элемент; растворяясь в феррите и цементите оказывает благоприятное воздействие на механические свойства стали. Нашел широкое применение.

Никель - вводят от 1 до 5%, растворяясь в феррите, повышает его прочность и вязкость. Наиболее ценный и в то же время дефицитный элемент.

Марганец - дешевый легирующий элемент; распределяется между ферритом и цементитом; вводят до 1,5% и используют часто как заменитель Ni. Заметно повышает предел текучести стали, но делает ее чувствительной к перегреву, поэтому вместе с ним вводят карбидообразующие элементы (хром, ванадий, цирконий, молибден, вольфрам и др.).

Кремний - вводят до 2%; дешевый некарбидообразующий элемент; растворяясь в феррите и цементите оказывает благоприятное воздействие на механические свойства стали. Нашел широкое применение.

Молибден, вольфрам - дорогие и дефицитные карбидообразующие элементы, которые большей частью растворяются в цементите. Мо вводят (0,2...0,4)%, вольфрама от 0,8 до 1,2%; снижают хрупкость стали, измельчают зерно, улучшают механические свойства стали.

Ванадий и титан - сильные карбидообразователи; их вводят в небольшом количестве (до 0,3% V и 0,1% Ti) в стали, содержащие хром, марганец, никель с целью измельчения зерна.

Бор - вводят в микродозах (0,002...0,005%) для увеличения прокаливаемости. Микролегирование бором эквивалентно 1% Ni, 0,5% Cr, 0,2% Mo.

Легированные конструкционные стали подразделяются на:

- цементируемые;
- улучшаемые;
- рессорно-пружинные.

К цементируемым легированным сталям относятся низкоуглеродистые (0,1 - 0,3% C) низко- и среднелегированные стали, которые после насыщения углеродом, закалки и низкого отпуска обеспечивают высокую поверхностную твердость при вязкой, но достаточно прочной сердцевине. Они предназначены для деталей машин и приборов (зубчатых колес, кулачков и т. п.), работающих на износ и испытывающих переменные и ударные нагрузки.

Хромистые стали 15X, 20X, а также содержащие ванадий (15XФ), образуют группу среднепрочных дешевых сталей после закалки в масле сердцевина этих сталей заметно упрочняется. Стали этой группы применяют для небольших деталей, работающих при средних нагрузках.

Хромоникелевые стали 12ХН3А, 20ХН3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А применяют для крупных деталей ответственного назначения. После закалки в масле эти стали в сечениях до 100 мм приобретают высокую прочность и вязкость.

Хромоникельмолибденовая 18Х2Н4МА (хромоникельвольфрамовая 18Н2Н4ВА) сталь используется для изготовления крупных деталей особо ответственного назначения (в авиации, судостроении).

Хромомарганцевые стали с титаном (18ХГТ, 30ХГТ) и молибденом (25ХГМ) предназначены для замены хромоникелевых сталей. Применяются для ответственных деталей в автомобилестроении.

Улучшаемые легированные стали (см. табл. 2.2) предназначены для изготовления ответственных деталей машин (валов, штоков, шатунов и т. п.), работающих в условиях циклических или ударных нагрузок.

Рессорно-пружинные легированные стали (см. табл. 2.2) предназначены для изготовления упругих элементов. Особенность работы пружин, рессор и других деталей пружинного типа состоит в том, что при значи-

тельных ударных или статических нагрузках в них не допускается остаточная деформация. Этим требованиям удовлетворяют стали с повышенным содержанием углерода (0,5...0,7%), которые подвергают закалке и среднему отпуску (420 - 450°C).

Основными легирующими элементами в них являются кремний и марганец, а в сталях более ответственного назначения - хром, ванадий, никель.

2.3.3. Легированные инструментальные стали

В маркировке инструментальных сталей содержание углерода указывается в десятых долях процента, а отсутствие цифры говорит о том, что углерода содержится около 1%.

Стали для режущего инструмента должны быть твердыми и износостойкими, поэтому они должны содержать достаточное количество углерода (0,8 - 1%) и карбидообразующих элементов, главным образом хрома. Получаемая после закалки и низкого отпуска структура стали обеспечивает высокие режущие свойства инструмента.

О наличии легирующих элементов в легированных инструментальных сталях смотри таблицу 2.3.

Таблица 2.3

Химический состав (%) некоторых легированных инструментальных сталей

легиру- элемент	C	Si	Cr	W	Mo	V	Прочие
марка стали							
Низколегированные стали							
ХВ4	1,25-1,45	-	0,4-0,7	3,5-4,3	-	0,15-0,3	-
9ХС	0,85-0,95	1,2-1,6	0,95-1,25	-	-	-	-
ХВГ	0,9-1,05	-	0,9-1,2	1,2-1,6	-	-	до 1,1 Mn
ХВСГ	0,95-1,05	0,65-1,0	0,6-1,1	0,5-0,8	-	до 0,15	до 0,9 Mn
Быстрорежущие стали							
P18	0,7-0,8	-	3,8-4,4	17,0-18,5	≤ 1,0	1,0-1,4	-
P9	0,85-0,95	-	3,8-4,4	8,5-10,0	≤ 1,0	2,0-2,6	-
P6M5	0,8-0,88	-	3,8-4,4	5,5-6,5	5,0-5,5	1,7-2,1	-
Стали для штампов холодного деформирования							
X12	2,0-2,2	-	11,5-13,0	-	-	-	-
X12M	1,45-1,65	-	11,0-12,5	-	0,4-0,6	0,15-0,39	-
X12Ф1	1,25-1,45	-	11,0-12,5	-	-	0,7-0,9	-
X6ВФ	1,05-1,15	-	5,5-6,5	1,1-1,5	-	0,5-0,8	-
Стали для штампов горячего деформирования							
5ХНМ	-	-	0,5-0,8	-	0,15-0,30	-	1,4-1,8 Ni
5ХНВ	-	-	0,5-0,8	0,4-0,7	-	-	1,4-1,8 Ni
3Х2В8Ф	-	-	2,2-2,7	7,5-8,5	-	0,2-0,5	-
4Х2В5МФ	-	-	2,2-3,0	4,5-5,5	0,6-0,90	0,6-0,9	-

Низколегированные стали содержат повышенное количество углерода и до 5% легирующих элементов. Их применяют для инструмента, ра-

ботающего при небольших скоростях резания, не вызывающих нагрева свыше 200 - 260 °С.

Сталь ХВ4 отличается особо высокой твердостью и износостойкостью благодаря тому, что в ней, кроме легированного цементита, присутствуют карбиды вольфрама.

Сталь 9ХС применяют для изготовления фрез, сверл, резьбонарезного и другого инструмента сечением до 35 мм.

Сталь ХВГ применяют для длинного стержневого инструмента (сверл, разверток и т. п.) сечением до 45 мм.

Сталь ХВСГ сочетает в себе лучшие свойства сталей 9ХС и ХВГ и используется для инструментов большого сечения (до 100 мм).

Быстрорежущие стали - группа высоколегированных сталей, предназначенных для изготовления высокопроизводительного инструмента. Обозначаются эти стали буквой Р, цифра после которой указывает содержание вольфрама- основного легирующего элемента в процентах. Содержание ванадия (до 2%) и хрома (до 4%) во всех сталях, в марке не указывается.

Стали, содержащие дополнительно молибден, кобальт или повышенный процент ванадия, имеют в марке соответственно буквы М, К и Ф и цифры, показывающие их количество.

Спеченные твердые сплавы - материалы, состоящие из высокотвердых и тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала, сцементированных металлической связкой.

Твердые сплавы изготавливают методом порошковой металлургии. Порошки карбидов смешивают с порошком кобальта, выполняющего роль связки, прессуют и спекают при 1400-1550°С. При спекании кобальт растворяет часть карбидов и плавится. В результате получается плотный материал, структура которого на 80-95% состоит из карбидных частиц, соединенных связкой. Твердые сплавы производят в виде пластин, которые напаивают на державку из углеродистой стали.

Твердые сплавы применяют для резцов сверл, фрез и другого инструмента. Такой инструмент сочетает высокую твердость, износостойкость с очень высокой теплостойкостью (800 - 1000°С). По своим режущим свойствам инструмент из этих сплавов значительно превосходит быстрорежущие сплавы.

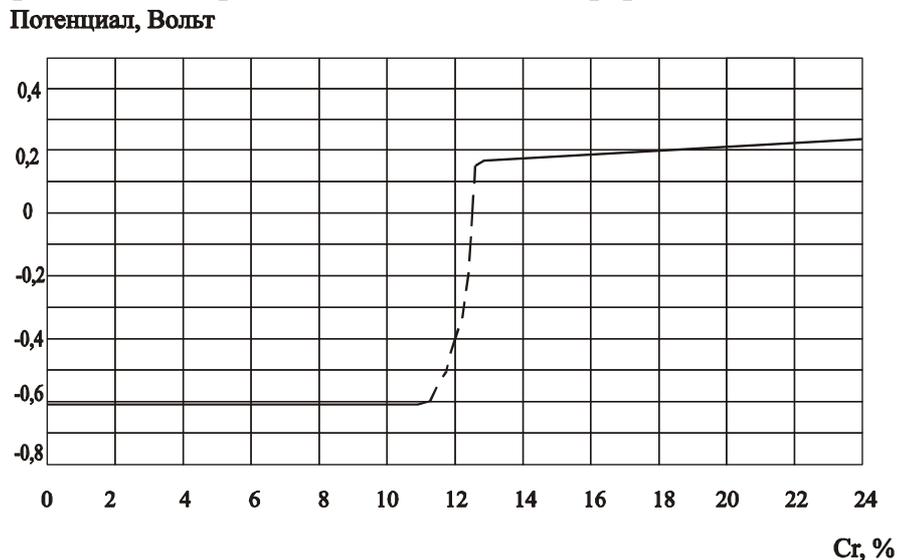
В зависимости от состава карбидной основы спеченные твердые сплавы выпускают трех групп:

- вольфрамовую группу составляют сплавы системы WC-Co;
- титановольфрамовую - системы TiC-WC-Co;
- титанотанталовольфрамовую системы TiC-TaC-WC-Co.

2.3.4. Специальные стали

Коррозионностойкие стали

Коррозия - процесс поверхностного разрушения металла вследствие химического воздействия окружающей среды. Электрохимическая коррозия развивается в различных средах: влажной атмосфере или почве; водных



растворах солей, щелочей, кислот. В этих средах на поверхности металла возникают участки с различным электрохимическим потенциалом, что приводит к возникновению микрогальванического коррозионного элемента. Участок с пониженным потенциалом в таком элементе является анодом и растворяется. Причин возникновения химической неоднородности несколько: неоднородность структуры металлов и сплавов, остаточные напряжения и др.

Рис. 2.7. Изменение электрохимического потенциала железа при легировании хромом

Чистое, железо и низколегированные стали подвержены процессу коррозии, так как электрохимический потенциал железа равен - 0,6 В (см. рис. 2.7).

При введении в сталь хрома происходит скачкообразное повышение коррозионной стойкости. Введение хрома более 12-14% делает сталь коррозионностойкой. Сплавы, содержащие более 12-14% хрома, ведут себя как благородные металлы: обладая положительным потенциалом, (рис. 2.7), они не ржавеют и не окисляются на воздухе, в воде, в ряде кислот, солей и щелочей.

Хромистые коррозионностойкие стали не поддаются коррозии

⇒ во влажной атмосфере;

⇒ водяном паре:

⇒ в водопроводной и речной воде;

⇒ в морской воде:

⇒ в азотной и некоторых органических кислотах.

При содержании Cr 13, 17 и 25% - коррозионностойкие и жаростойкие.

Маркировка:

12X 13 - первые две цифры: содержание углерода в сотых долях %, последние две цифры: содержание хрома в %, буква **X**: хромистая.

марка стали	σ_b (после отжига)	σ_b (после закалки)	
12X13	40	60	конструкционный материал при $t < 450^\circ\text{C}$ – лопатки турбин, клапаны, арматура хим. установок
:			детали машин (валы, болты, шестерни, пружины)
20X13	50	66	изготавливают режущий хирургический
30X13	50	70	и бытовой инструмент, пружины, мерит.
40X13	60	80	и режущий инструмент

Хромоникелевые коррозионностойкие стали

Стали аустенитного класса: 18% Cr 9...10% Ni.

Работают при нагреве в условиях атмосферной коррозии, в кипящих растворах азотной, лимонной, фосфорной кислот. Подвержены точечной коррозии во влажной почве и морской воде; для устранения этого недостатка дополнительно легируют молибденом. Легирование медью повышает стойкость к серной кислоте. Хорошо штампуются, свариваются. Плохие литейные свойства и обработка резанием. Опасен нагрев стали в интервале температур 400...800°C, при котором из аустенита выделяется избыток углерода в виде карбида. Он выделяется по границам аустенитного зерна, в результате граница обедняется хромом. При наличии коррозионной среды границы зерна становятся анодами. Образуется межкристаллическая коррозия. На ранних стадиях она обнаруживается только кристаллографически. Поздние стадии: теряется металлический звук, а затем сталь разрушается. Для борьбы с этим явлением уменьшают содержание углерода, вводят титан, ниобий. Такие стали называют **стабилизированными**.

Маркировка:

04X18N10, 08X18N10, 08X18N10T.

Первые две цифры содержание углерода в сотых долях %

Жаростойкие и жаропрочные стали

Жаростойкость - способность металла сопротивляться окислению в газовой среде при высоких температурах.

С повышением температуры скорость окисления металлов возрастает, но по мере образования поверхностных пленок процесс коррозии замедляется.

Чтобы окисная пленка обладала защитными свойствами, она должна быть сплошной. Металлы Fe, Cr, Al, Cu дают сплошные защитные окисные пленки.

Железо с кислородом при $t > 570^{\circ}\text{C}$ может образовать три окисла: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO . Но FeO обладает худшими защитными свойствами, чем Fe_2O_3 (в 100 раз) и Fe_3O_4 (в 10 раз). Для того, чтобы исключить образование окисла FeO к железу добавляют хром и алюминий, образующие окислы Cr_2O_3 и Al_2O_3 . Создается надежный защитный слой SiO_2 (керамический материал). Обладает хорошей стойкостью при высоких температурах, поэтому Si используют для легирования жаростойких сталей.

Стали легированные Cr и Si называют *сильхромами*.

Стали легированные Cr и Al называют *ХРОМАЛЯМИ*.

Стали легированные Cr-Si-Al называют *сильхромалями*.

марки жаропрочных сталей	X6M	40X9C2	12X18H9T	36X18H25C2
рабочая температура	650°C	850°C	800°C	1100°C

40X9C2

10X13C10

08X17T

12X18H9T

36X18H25C2

изготавливают клапаны двигателей внутреннего сгорания и печного оборудования.

В теплообменниках: при добавках Si становится стойкой в среде горячих топочных газов, богатых серой.

Пластичны, хорошо свариваются: повышенные механические свойства при высоких температурах; жаровые трубы в газотурбинных установках.

Жаропрочные - способны к сопротивлению, деформациям и разрушению в области высоких температур. Из них делают детали двигателей внутреннего сгорания, реактивных двигателей, паровых и газовых турбин, паровых котлов и т.п.

Влияние структуры и состава на жаропрочность.

Сплавы крупнозернистые обладают большой жаропрочностью. Особенно монокристаллы. Чем больше содержание хрома, тем они прочнее.

Жаропрочные стали: клапанные
котельные
паровых турбин
газовых турбин
реактивной техники и др.

Клапанные стали

Таблица 2.4

Химический состав клапанных сталей

Марка	Легировующие элементы, %					Применение
	C	Si	Cr	Ni	Другие	
X6C	0,15	1,75	6,0	0,6	-	Клапаны легковых машин и тракторов небольшой и средней мощности.
X6CM	0,15	1,75	6,0	0,6	0,5Mo	
40X9C2	0,42	2,5	9,0	-	-	Клапаны двигателей

40X9C2M	0,4	2,25	10,0	0,5	0,8Mo	средней мощности Клапаны мощных двигателей
30X13H7C2	0,3	2,5	13,0	7,5	-	
45X14H14B2M	0,45	0,8	14	15	0,3W	

Клапанный узел - очень ответственный узел д.в.с. (определяет в значительной мере срок службы двигателя). Клапаны выхлопа подвергаются большим механическим нагрузкам при $t = 700...900^{\circ}\text{C}$ и газовой коррозии; его шток работает на износ, а конец не должен сминаться при ударах.

2.4. Чугуны

Чугунами называют железоуглеродистые сплавы, содержащие $>2,14\%$ углерода. В зависимости от формы углерода чугун может быть:

- белый;
- серый;
- высокопрочный;
- ковкий.

Белый - чугун, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Фазовые превращения в этих чугунах протекают согласно диаграмме состояний Fe-Fe₃C.

Очень тверд, хрупок; для изготовления деталей машин не используется.

Имеет ограниченные применения: чугунные отливки с отбеленной поверхностью, прокатные валки, лемеха плугов, шары мельниц и другие детали работающие на износ.

Серые литейные чугуны - сплавы сложного состава, содержащие Fe, C, а также Si, Mn и неизбежные примеси: S и P (сера и фосфор).

3 вида:

- 1) серый перлитный со структурой П+Г (перлит + графит);
- 2) серый ферритоперлитный со структурой Ф+П+Г;
- 3) серый ферритный со структурой Ф+Г.

Механические свойства чугуна зависят от свойств металлической основы и количества, а также формы и размеров графитовых включений. Чем больше графита, тем ниже механические свойства.

Маркировка серого чугуна:

$$СЧ\sigma_{\text{в}}\sigma_{\text{изг}},$$

где: $\sigma_{\text{в}}$ - предел прочности при растяжении, кг/мм²;

$\sigma_{\text{изг}}$ - предел прочности при изгибе, кг/мм².

СЧ 12-28 небольшой прочности	в деталях без износа: корпуса редукторов, подшипников, крышки, пробки, каретки, фланцы.
СЧ 21-40 СЧ 24-44 СЧ 28-48 повышенной прочности	ответственные детали, работающие при больших статистических нагрузках, в тяжелых и средних условиях по износу: маховики, втулки, зубчатые колеса, гильзы, поршни, станины станков.

СЧ 32-52 СЧ 36-56 СЧ 40-60 высокой прочности	особо ответственные детали, работающие при высоких статистических и динамических нагрузках, в тяжелых условиях износа: шестерни, поршни, тормозные барабаны, шпиндели, гидроцилиндры, корпуса и гидронасосов и др.
---	--

Высокопрочные чугуны

Высокопрочными называются чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Их получают путем модифицирования магнием, но из-за сильного пироэффекта чистый магний заменяют лигатурами (например: 20% Mg+80%Ni).

Маркировка высокопрочного чугуна:

$$\text{ВЧ} - \sigma_{\text{в}} - \delta,$$

где: ВЧ - высокопрочный чугун;

$\sigma_{\text{в}}$ - предел прочности при растяжении, кг/мм²;

δ - относительное удлинение, %.

Для отливок ответственного назначения применяют чугуны:

ВЧ-40-10 (ферритная основа);

ВЧ-45-5 (ферритно-перлитная основа);

ВЧ-60-2 (перлитная основа).

Из них изготавливают оборудование прокатных станов (прокатные валки весом до 12 т, кузнечно-прессовое оборудование, корпуса паровых турбин, коленчатые валы, поршни и др. ответственные детали).

В некоторых случаях для улучшения механических свойств применяется термическая обработка отливок; для повышения прочности - закалка и отпуск при 500 - 600⁰С; для увеличения пластичности и вязкости - отжиг.

Ковкие чугуны (см. табл. 2.5).

Ковкими называют чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают из белых чугунов путем отжига-томления. Поэтому графит ковких чугунов носит название углерода отжига.

Маркировка:

$$\text{КЧ} - \sigma_{\text{в}} - \delta$$

где КЧ - ковкий чугун;

$\sigma_{\text{в}}$ - предел прочности при растяжении кг/мм²;

δ - предел по относительному удлинению, %.

Таблица 2.5

Механические свойства ковких чугунов

Марка чугуна	$\sigma_{\text{в}}$, кг/мм ²	δ ,%	НВ твёрдость в МПа	Структура металлической основы
	не менее		не более	
КЧ 30-6	30	6	163	феррит + (3...10)% перлита
КЧ 33-8	33	8	163	
КЧ 35-10	35	10	163	
КЧ 37-12	37	12	163	

КЧ 45-6	45	6	241	Перлит + (0...20)%феррита
КЧ 50-4	50	4	241	
КЧ 56-4	56	4	269	
КЧ 60-3	60	3	269	
КЧ 63-2	63	2	269•	

Ковкие чугуны нашли широкое применение в сельскохозяйственном, автомобильном и текстильном машиностроении, также в судо-, котло-, вагоно- и дизелестроении. Детали, изготовленные из ковкого чугуна имеют высокую прочность, могут работать в тяжелых условиях износа и способны воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки.

2.5. Некоторые металлы (свойства металлов см. приложение 1)

Вольфрам – тяжелый, твердый металл серого цвета, получают из руд различного состава; промежуточным продуктом является вольфрамовая кислота H_2WO_4 , из которой восстановлением водородом при нагреве до $900^\circ C$ получается металлический вольфрам в виде мелкого порошка. Из этого порошка при высоком давлении прессуют стержни, которые подвергают сложной термической обработке в атмосфере водорода (во избежание окисления), ковке и волочению в проволоку диаметром до 0,01 мм, прокатке в листы и т.п. Для вольфрама характерна слабая связанность отдельных кристаллов, что объясняет хрупкость изделий из него. При механической обработке ковкой и волочением вольфрам приобретает волокнистую структуру; этим объясняется гибкость тонких вольфрамовых проволок.

Вольфрам является одним из важнейших металлических материалов электронно-вакуумной техники. Применение вольфрама для изготовления нитей лампы накаливания было впервые предложено русским изобретателем А.Н Лодыгиным в 1890 г.

Вольфрам может работать при высокой температуре (более $2000^\circ C$), но в глубоком вакууме или в среде инертных газов (аргоне, азоте и др.).

Вольфрам применяют для изготовления контактов. Для контактов на большие значения разрываемой мощности используют металлокерамические материалы. Заготовку прессуют из порошка вольфрама под большим давлением, спекают в атмосфере водорода; получается достаточно прочная, но пористая основа, которую затем пропитывают расплавленным серебром или медью для увеличения проводимости.

Этот металл, обладая минимальным температурным коэффициентом линейного расширения, применяется при изготовлении термически согласованных сплавов вольфрама с тугоплавкими стеклами.

Молибден - близкий по свойствам к вольфраму, но в два раза его легче; широко применяется в электровакуумной технике, но при более низких температурах, чем вольфрам. В электровакуумной технике наиболее рас-

пространены марки молибдена МЧ (молибден чистый), МК (молибден с присадкой кремния).

МК обладает повышенной механической прочностью при высоких температурах. Применяется молибден также для изготовления разрывных контактов. В паре с вольфрамом молибден используют для изготовления термопар (до 2000°C), работающих в инертных средах, в вакууме.

Золото - металл желтого цвета, обладающий высокой пластичностью (предел прочности при растяжении 150 МПа, относительное удлинение перед разрывом 40%). В электротехнике золото используется как контактный материал для коррозионно-стойких покрытий, электродов фотоэлементов и др. целей.

Серебро - белый, блестящий металл, стойкий против окисления при нормальной температуре. Обладает наименьшим удельным сопротивлением среди металлов. Механические свойства серебряной проволоки: предел прочности на разрыв $\sigma_p \cong 200$ МПа, $\Delta l/l$ примерно 50%. Такая проволока идет для изготовления контактов, рассчитанных на небольшие токи. Серебро применяют также для нанесения на диэлектрики в качестве электродов при производстве керамических и слюдяных конденсаторов. Химическая стойкость серебра по сравнению с другими благородными металлами пониженная.

Платина - металл, не соединяющийся с кислородом и весьма стойкий к химическим реагентам; прекрасно поддается механической обработке, вытягивается в очень тонкие нити и ленты. После отжига платины $\sigma_p \cong 150$ МПа, а $\Delta l/l = 30...35\%$. Особо тонкие нити из платины (диаметром около 1 мкм) для подвесок подвижных систем различных приборов получают многократным волочением биметаллической проволоки платина-серебро с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте (на платину азотная кислота не действует).

Из-за малой твердости платина в чистом виде применяется редко, но служит основой для контактных сплавов. Особо ответственные контакты делают из сплава платины с иридием, очень стойкого к окислению и износу.

Никель - серебристо-белый металл, широко применяемый в электровакуумной технике; достаточно легко получаемый в чистом виде (99,99 Ni); иногда в него вводят легирующие элементы (Si, Mn). Получаемый из руд подвергают электролитическому рафинированию. Очень чистый никель можно получить путем термического разложения пентакарбонила никеля $Ni(CO)_5$ при 220°C. Выпускается в виде полос, пластин, лент, трубок, стержней и проволоки. Имеет достаточно высокую механическую прочность после отжига ($\sigma_p = 400...600$ МПа при $\Delta l/l \cong 35...50$). Никель хорошо поддается механической обработке (ковке, прессовке, прокату, штамповке, волочению) даже в холодном состоянии

Никель используют также в качестве компонента ряда магнитных и проводниковых сплавов, а также для защиты и декоративных покрытий

изделий из железа и т.п.

Кобальт - получают металлургическим путем с последующей очисткой или восстановлением оксида кобальта водородом. В отожженном состоянии кобальт имеет $\sigma_p = \text{МПа}$ при $\Delta l/l > 50\%$. Химически мало активен. Применяется в качестве составной части многих магнитных и жаростойких сплавов, а также сплавов с небольшими температурными коэффициентами линейного расширения.

Свинец - металл сероватого цвета, дающий на свежем срезе сильный металлический блеск, быстро тускнеющий вследствие окисления. Имеет крупнокристаллическое строение. Свинец - мягкий, пластичный, мало-прочный металл: $\sigma_b \approx 15 \text{ МПа}$ при $\Delta l/l$ более 55%. Имеет высокое удельное сопротивление, обладает высокой коррозионной стойкостью; устойчив к действию воды, серной и соляной кислот (при низких температурах) и других реагентов; однако азотная и уксусная кислоты, органические вещества, известь разрушают свинец.

Широко применяют в качестве материала, поглощающего рентгеновские лучи. Рентгеновские установки с напряжением 200-300 кВ в целях безопасности должны иметь свинцовую защитную оболочку толщиной соответственно 4 и 9 мм.

Свинец используют для изготовления плавких предохранителей, пластин аккумуляторов, защитных оболочек кабелей. Свинец и его соединения ядовиты.

Олово – серебристо-белый металл с ярко выраженным кристаллическим строением. При изгибе прутка олова слышен треск, вызываемый трением кристаллов друг о друга. Олово мягкий, тягучий металл, позволяющий получать путем прокатки фольгу. Предел прочности белого олова от 16 до 38 МПа.

Кроме белого олова, имеющего тетрагональную кристаллическую решетку, существует серое олово, порошкообразное. При нагреве серое олово переходит в белое. При нагреве выше 160°C олово переходит в третью модификацию (ромбическую) и становится хрупким.

Олово используют в качестве защитных покрытий металлов (лужение); оно входит в состав бронз, припоев. Тонкая оловянная фольга (6...8 мкм) применяется в конденсаторах и имеет присадки: до 15% свинца и до 1% сурьмы - для облегчения прокатки и улучшения механической прочности. Оловянно-свинцовую фольгу толщиной 20...40 мкм применяют в качестве электродов в слюдяных конденсаторах.

Цинк – светлый металл, получаемый металлургическим методом и очищаемый электролитическим. Высокоочищенный цинк марки ЦВ содержит цинка не менее 99,99% и не более 0,01 примесей (РЬ, Fe, Cd, Cu). При комнатной температуре - хрупок; при нагреве до 100°C он становится тягучим и пластичным, а при дальнейшем нагреве (> 200° С) снова хрупким. Цинк применяется в качестве защитных покрытий, составной части

латуни. Из него делают электроды гальванических элементов. Используется в фотоэлементах.

Кадмий - серебристо-белый металл, являющийся постоянным спутником цинка в его рудах и добывается как побочный продукт при выплавке цинка; подвергается электролитической очистке. В зависимости от чистоты выпускается нескольких марок. Применяется при изготовлении фотоэлементов. Входит также в состав припоев, бронз, используется в качестве замедлителя в атомных реакторах.

Индий - используется в качестве акцепторной примеси в полупроводниковой технике и контактного материала при производстве транзисторов и диодов.

Галлий - как и индий, применяется в полупроводниковой технике в качестве легирующей примеси для германия и кремния.

Ртуть - единственный металл, находящийся в жидком состоянии при нормальной температуре. Ее добывают из киновари HgS путем термического разложения при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем многократно очищают. Пары ртути имеют низкий потенциал ионизации по сравнению с инертными газами, поэтому ртуть и применяется в газоразрядных лампах. Ртуть применяется также для контактов в реле и т.п. Ртуть и ее соединения ядовиты.

2.6. Сплавы на основе цветных металлов

2.6.1. Сплавы на основе меди

Марки меди:

МОО (99,99% Cu)

МО (99,95% Cu)

М1 (99,9%)

М2 (99,7%)

М3 (99,5%)

М4 (99,0%)

Получение меди

Чаще всего путем переработки сульфидных руд. После нескольких плавок руды и обжигов с интенсивным дутьем медь для электротехники подвергается процессу электролитической очистки. Полученная после электролиза медь переплавляется в болванки массой 80-90 кг, которые прокатываются и протягиваются в необходимые изделия.

Постоянные примеси меди: As, Fe, Si, P, Pb. Кислород в виде Cu_2O , который располагается по границам зерен; из-за этого хрупкость.

Недостатки меди:

→ высокая плотность;

→ плохая обрабатываемость резанием;

→ низкая жидкотекучесть.

Латуни

Сплавы меди с цинком. Бывают простые (Л 96 - содержит 96% меди) и легированные (ЛАН 59-3-2 - содержат 59% меди, 3% алюминия, 2% никеля, остальное цинк).

Выпускают: ленты, трубы, полосы, прутки, проволоки.

Al - повышает твердость, прочность, коррозионную стойкость – до 4%.

Олово - повышает коррозионную стойкость в морской воде (применяется в судостроении) Л070-1, Л062-1.

Кремний - повышает коррозионную стойкость и технологические свойства латуни, улучшает жидкотекучесть, свариваемость, штамповку.

Никель - улучшает механические свойства и коррозионную стойкость. ЛН65-5 - в морском судостроении.

Оловянистые бронзы

Из диаграммы состояния сплава CuSn следует, что предельная растворимость олова в меди – 15,8 %. Практически бронзы имеют до 14 % Sn.

Оловянистые бронзы легируют: Zn, Pb, Ni, P. Для экономии олова в бронзы добавляют от 2 до 15 % цинка.

Обладают высокой коррозионной стойкостью, химической стойкостью.

Применяют для пароводяной арматуры, работающей под давлением. Отливки могут работать до 300 атмосфер. Хорошо обрабатываются резанием, паяются, хуже свариваются. Из них делают сложные фасонные отливки, так как оловянистые бронзы имеют низкую линейную усадку (~1%). В целях удешевления оловянистых бронз содержание олова в литейных образцах не более 3 - 6 % Sn. Хорошая электрическая проводимость, коррозионная стойкость, антифрикционность дают возможность изготавливать пружинящие детали в электротехнике.

Алюминиевые бронзы имеют высокие механические свойства, антикоррозионность, антифрикционные свойства. Легируют Fe, Ni, Mn. Изготавливают детали, работающие на износ (шестерни, втулки, зубчатые колеса, червячные передачи, водяная арматура).

После закалки (480⁰ С) и старения (400⁰ С) твердость значительно увеличивается. Изготавливают детали, работающие в тяжелых условиях износа при повышенных температурах (400-500⁰С): седла клапанов, части насосов, турбин, шестерни.

Бериллиевые бронзы

Имеют чрезвычайно высокие пределы упругости, прочности, твердости, коррозионностойкости, повышенное сопротивление усталости, ползучести и износу. Прочность резко увеличивается при содержании Be 1,5... 2 %. Наибольшей пластичностью обладают после закалки (780⁰ С) и старения (320⁰ С). $\sigma_b = 125 \text{ кг/мм}^2$.

Выпускают: полосы, ленты, проволоки, качественные фасонные отливки.

Изготавливают:

- упругие элементы точных приборов (пружины, пружинные контакты, шестерни, червячные передачи);

- инструмент, не дающий искры.

Высокая стоимость. Легирование Mn, Ni, Ti, Co позволяет уменьшить содержание бериллия до 1,7...1,9 % без заметного снижения свойств.

Кремнистые бронзы

Имеют хорошие механические свойства, антифрикционные, коррозионностойкие. Используют как заменители дорогостоящих оловянных и бериллиевых бронз. Из них делают ленты, полосы, прутки, проволоку.

Свинцовые бронзы

обладают антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью. Делают ответственные высоконагруженные подшипники, работающие при больших скоростях (авиационные двигатели, дизели, мощные турбины и др.).

Наибольшее применение при содержании РЬ - 25...30 %. При легировании свинцовых бронз Sn, Mn, Ni образуют с медью твердые растворы, улучшающие твердость и прочность.

Марганцевые бронзы - коррозионностойки, с повышенной жаропрочностью. Содержат 5...12% Mn; наиболее применяемые - 5% Mn (до 400⁰С фасонные отливки) легируют со свинцом. Для повышения механических свойств легируют Ni, литейных свойств - Si, Al.

2.6.1. Сплавы на основе алюминия

Al - металл серебристо-белого цвета, кристаллизуется в решетку гранцентрированного куба. Имеет малую плотность, хорошую тепло- и электропроводность, пластичен, коррозионностоек. Легко окисляется на воздухе, образуя плотную пленку окисла Al₂O₃. Стоек в концентрированной азотной кислоте и некоторых органических кислотах (лимонной, уксусной и других). Многие минеральные кислоты (соляная, плавиковая и др.), щелочи разрушают Al. Хорошо обрабатывается давлением, сваривается газовой и контактной сваркой. Постоянные примеси Al: Fe, Si, Cu, Zn, Ti.

По чистоте алюминий подразделяется на:

-особо чистый А999 (0,001 % примесей);

-высокой чистоты А995...А95:

-технически чистый А85, А8 и др. (0,15...1 % примесей).

Имеет низкую прочность. Идет на изготовление ненагруженных деталей и элементов конструкций, когда требуется легкость, свариваемость, пластичность, коррозионностойкость (рамы, двери, трубопроводы, фольга).

Основные легирующие элементы Al сплавов: Cu, Mg, iSi, Mn, Zn, реже Li, Ni, Ti, Be, Zr.

Разнообразии Al сплавов отражено на рис. 2.8.

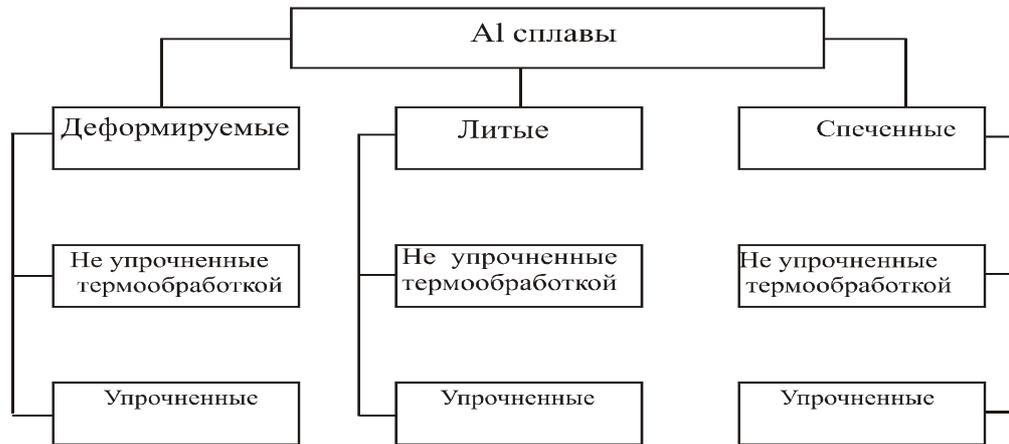
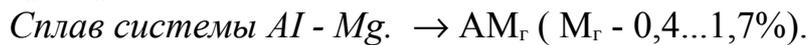


Рис. 2.8. Классификация алюминиевых сплавов

Деформируемые Al сплавы не упрочненные термической обработкой.



Сплав системы Al - Mn состоит из α -твердого раствора и вторичных выделений фазы MnAl₃, переходящих в твердый раствор при повышении температуры.



AM_ц и AM_г - применяются для изделий, получаемых глубокой вытяжкой, сваркой, для них требуется высокая коррозионная стойкость. Из сплавов Al - Mg делают:

- трубопроводы для бензина, масла;
- сварные баки;
- заклепки.

Деформируемые Al сплавы, упрочненные термической обработкой.

Типичные представители этой группы дюралюмины.

	Cu	Mg	Mn
Д1	3,8...4,8	0,4...0,8	0,4...0,8
Д16	3,8...4,9	1,2...1,8	0,3...0,9
Д18	2,2...3,0	0,2...0,5	

Марганец вводят для повышения коррозионной стойкости и устранения вредного влияния Fe; он связывает железо в нерастворимую Al фазу α . Повышенное содержание магния приводит к увеличению прочности сплава (Д16). Слитки сплавов проходят обработку при температуре 480 – 500°C с последующей горячей пластической деформацией. Происходит упрочнение. При закалке Д1 и Д18 нагревают до 495 – 505°C (Д16 490 – 500°C) затем охлаждают в воде при температуре не выше 41°C. Дюралюмины обладают пониженной коррозионной стойкостью во влажном воздухе, речной и морской воде. Для защиты от коррозии их подвергают:

- *плакированию* - горячей прокатке слитка, обернутого чистым Al (А5, А6, А7), во время которой Al сваривается со сплавом. Толщина плакированного слоя 4 – 8% от толщины листа основного сплава или

- *анодной поляризацией*, которая проводится в 10% водном растворе H_2SO_4 (серная кислота), где анодом служит полуфабрикат из дюралюмина, катодом - свинцовые пластины. Выделяющийся на аноде кислород образует на поверхности дюралюмина тонкую окисную пленку, предохраняющую сплав от коррозии.

Из дюралюмина делают листы, трубы, профили (прессованные и канатные), детали самолетов, заклепки (после закалки и естественного старения) (Д18).

Высокопрочные сплавы (60 ... 70 кг/мм²).

Сплав системы Al - Zn - Mg - Cu с добавками хрома и марганца обозначается В95 (Cu - 1,4...2,0 %, Mn 0,2...0,6%. Cr 0,1...0,25%, Zn 5...7%) (95% Al).

Жаропрочные сплавы (АК4, АК4-1 и др.) работают при температурах до 300 °С. Легирование Fe, Ni, Cu.

Ковочные сплавы (Al - Cu - Mg).

АК6 средненагруженные детали, сложные (крыльчатки, крепеж).

АК18 рамы, стыковые узлы и др.

Литейные сплавы (силумины) - имеют отличные литейные свойства. Это сплавы системы: Al - Si, Al - Cu, Al - Mg.

Элементы Mg, Cu, Mn, Ti, растворяясь в Al способствует упрочнению при термической обработке (закалка и искусственное старение).

t закалки = 515...535°C (5 - 10 часов);

t старения = 150...180°C (10 - 12 часов).

Наиболее широко применяются в промышленности литейные сплавы:

АЛ2 (Si 10...13%) имеют отличные литейные свойства, но низкие механические (неответственные детали - корпуса приборов, детали авиационных колес, барабаны, кронштейны и др.).

АЛ9 (Si 6...8%; Mg 0,2...0,4%), из АЛ9 делают средненагруженные детали литые: фланцы, башмаки, поршни, головки цилиндров, картеры сцепления).

АЛ4 (Si 8...10,5%; Mg 0,17...0,3%; Mn 0,2...0,5%), идет для средних и крупных деталей ответственного назначения корпуса компрессоров, картеров, блоков и др.

АЛ32 литые под давлением (наличие Mn, Ti).

АЛ 7 средние нагрузки (t до 200°C).

АЛ 19 высокопрочный, жаропрочный.

Спеченные сплавы

Спеченные из Al пудры (САП) - для них характерна высокая прочность, жаропрочность, коррозионностойкость, термическая стабильность. Исходный материал - порошок, полученный путем распыления расплавленного Al (А97).

2.6.2. Антифрикционные сплавы

Антифрикционные сплавы на основе свинца или олова называются **баббитами**. Они имеют низкий коэффициент трения при работе в паре со сталью. Их применяют для заливки подшипников скольжения.

Марки:

Б83: Sb 10...12%; Cu 5...6%.

БКА: Ca ~ 1%, Na ~ 0,8%, Al ~ 0,2%.

Их преимущества: наилучшее сочетание антифрикционных и физико-механических свойств.

Применяют (из-за дорогого олова) для подшипников ответственных установок (паровые турбины, турбокомпрессоры, дизели, подшипники гребных винтов).

Оловянносвинцовые Б16, БС6, БН и др. с низким содержанием олова.

Баббит Б16 - для ответственных подшипников, БС6 - для спокойных условий работы без ударных нагрузок (моторно-осевые и опорные подшипники электровозов, гидротурбин и др.). Баббит БН легирован кадмием (Cd), мышьяком (As) и никелем (Ni).

Cd - повышенная коррозионная стойкость;

As - улучшенная жидкотекучесть и теплопроводность;

Ni - повышенная износостойкость, сопротивление окислению.

БН – (подшипники дизельных двигателей, компрессоры, подшипники двс, поршни турбин).

Свинцовые баббиты с Ca и Na самые дешевые; используют для подшипников городского и ж/д транспорта.

2.6.3. Сплавы на основе магния

Магниеые сплавы.

Магний - металл серебристо-белого цвета. Магний и его сплавы имеют низкую плотность, хорошую обрабатываемость. Магний обладает низкой коррозионной и химической стойкостью. Чистый магний применяется в пиротехнике, в химической промышленности для синтеза органических препаратов, в металлургии, как раскислитель, восстановитель и легирующий элемент.

Общая характеристика магниевых сплавов.

Высокая удельная прочность (35-40 кг/мм²) при плотности 2000 кг/м³.

Легирующие элементы: Mn – марганец, Al – алюминий, Zn – цинк, Ce – церий, Zr - цирконий, Nd – неодим.

Al, Zn, Zr, Ce - повышают механические свойства;

Zr, Mn - повышают коррозионную стойкость;

Nd, Zr - повышают жаропрочность.

По технологии изготовления делятся на:

⇒ деформируемые (МА).

МА1 (Mn 1,3...2,5%) относительно высокая коррозионная стойкость, хорошо сваривается (листы, профили, штамповочные заготовки и т.п., сварные маслобаки, бензобаки, арматура топливных и масляных систем).

МА11, МА13 - жаропрочные (в ракетной технике),

⇒ литейные

МЛ2 (Mn 1...2%) ненагруженные детали (арматура).

МЛ3 (Mn 0,15...0,5%, Zn 0,5...1,5%, Al 2,5...3%) средненагруженные детали простой формы (арматура, детали корпусов насосов).

МЛ5 (Mn 0,15...0,5%, Zn 2,0...3%, Al 5...7%) повышенное содержание алюминия, хорошая механическая прочность.

МЛ12 (Zn 4...5%, Zr 0,6...1,1%) применяются для высоко нагруженных деталей самолетов и авиадвигателей. Для защиты от коррозии магниевые сплавы подвергают оксидированию с последующей окраской. Применяют также оксидные пленки, силиконовые эмали.

2.6.4. Сплавы на основе титана

Титан - металл серого цвета, имеет примеси: Fe, Si, C, O, N, H и др. Промышленный способ получения титана состоит в обогащении и хлорировании титановой руды, с последующим восстановлением, 4^x хлористого титана металлическим магнием. Для получения монолитного титана, полученная титановая губка размалывается в порошок, прессуется и спекается или переплавляется в дуговых печах, в вакууме или атмосфере инертных газов. Титан обладает высокой прочностью. Сплавы титана по сравнению с техническим титаном имеют преимущества: более прочны, их отличает также:

⇒ лучшая жаропрочность;

⇒ лучшая жаростойкость;

⇒ хорошая пластичность;

⇒ высокая коррозионная стойкость.

Поэтому, титановые сплавы получили широкое применение в авиации, ракетной технике, судостроении, химической и др. отраслях промышленности (обшивка сверхзвуковых самолетов, детали ракетных двигателей, корпусов ракетных двигателей второй и третьей ступеней, баллонов сжиженных газов, обшивки судов, подводных лодок, торпед и т.д.).

По технологии изготовления:

⇒ деформируемые;

⇒ литейные.

По механическим свойствам:

⇒ нормальной прочности;

⇒ высокопрочные;

⇒ жаропрочные;

⇒ повышенной пластичности.

Таблица 2.6

Химический состав деформируемых сплавов

Сплав	Элемент			
	Al	Mn	Mo	Прочие
BT5	5	-	-	-
OT4	3	1,5	-	-
BT6	6	-	-	4V
BT8	6,5	-	3,5	0,2Si

Сплавы BT5, BT5-1 средней прочности при комнатной температуре и высокопрочные при криогенных температурах, коррозионностойкие, отлично свариваются (прочность сварного шва составляет 90% от прочности и основного сплава). Из них изготавливают детали, работающие до 400°C.

Литейные титановые сплавы обладают отличными литейными свойствами, но дорогостоящие. Самый дешевый из них ВТЛ5 (Al 5%) идет на изготовление труб, различных отливок.

2.7. Основы термической обработки металлов и сплавов

Технология металлов состоит из трех основных видов:

- 1) металлургии – получение металла заданного сплава;
- 2) механической технологии – получение из металла изделий заданной формы;
- 3) термической и термо-химической обработки – получение заданных свойств.

Термической обработкой называют технологические процессы, состоящие из нагрева и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств.

Основные виды термической обработки:

- отжиг;
- закалка;
- отпуск и старение.

Отжигом называется термическая обработка, заключающаяся в нагреве, выдержке и медленном охлаждении сплава с целью получения устойчивой (равновесной) и напряженной структуры.

Закалка – термическая операция, состоящая из нагрева до определенной для данного сплава температуры с последующим достаточно быстрым охлаждением с целью получения неустойчивых структур, повышения твердости и прочности.

Отпуском и старением называют вид термической обработки, в результате которого в предварительно закаленных сплавах происходят фазовые превращения, приближающие их структуру к равновесной. Термин «отпуск» используют обычно к сталям и другим сплавам, испытывающим

при закалке полиморфное превращение (Al бронзы, сплавы на основе титана).

Термин «старение» используют применительно к сплавам, не претерпевающим при закалке полиморфного превращения (сплавы на основе Al, аустенитные стали, никелевые сплавы и др.).

2.7.1. Термическая обработка стали

Основой для изучения термической обработки стали является диаграмма Fe-C (т.н. «стальной» ее участок), т.е. при содержании углерода до 2,14%. Участок диаграммы железо-углерод, который будем рассматривать, изображен на рис. 2.9.

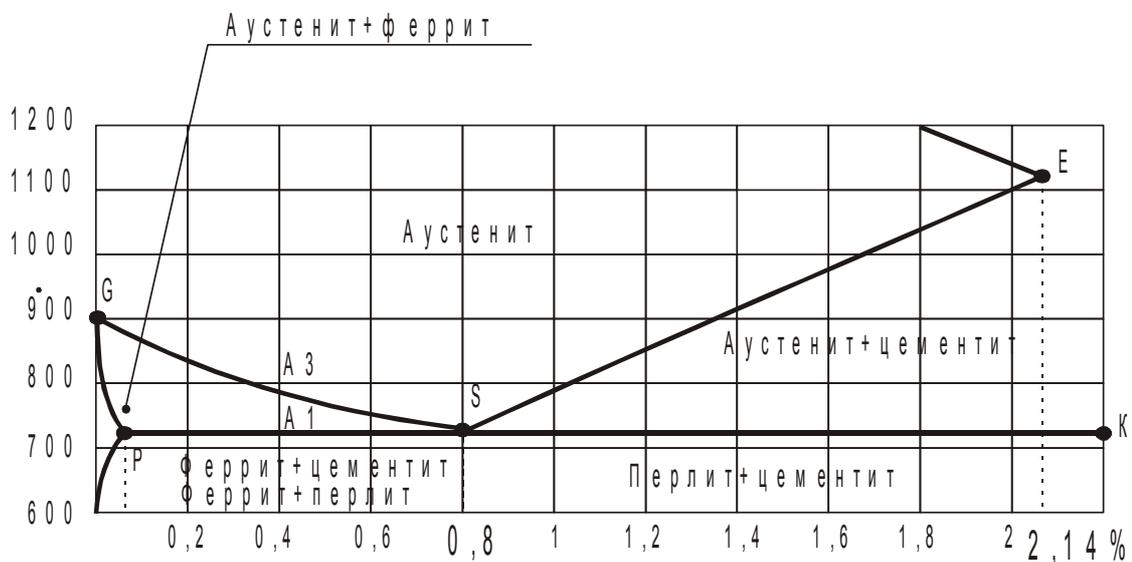


Рис. 2.9. «Стальной» участок диаграммы Fe-C

Нижняя критическая точка при термообработке лежит на линии PSK и обозначается A_1 , верхняя критическая точка лежит на линии GSE и обозначается A_3 . Чтобы отличить критическую точку температуры при нагреве ее обозначают A_{C1} (A_{C3}), при охлаждении – A_{C1} (A_{C3}).

Полный отжиг стали – фазовая перекристаллизация, заключающаяся в нагреве выше точки A_{C3} на 30-50⁰ С с последующим медленным охлаждением вместе с печью.

Неполный отжиг стали при нагреве ее выше точки A_{C1} , но ниже A_{C3} . Происходит неполная перекристаллизация. При отжиге состояние стали приближается к структурно-равновесному: структура стали после отжига перлит + феррит, или перлит + цементит.

Изотермический отжиг в основном применяют для легированных сталей. Он заключается в нагреве стали до аустенитного состояния и последующего охлаждения на 50...100⁰С ниже точки A_{C1} , выдержке при этой температуре до полного распада аустенита на ферритно-цементитную смесь и последующего охлаждения на воздухе.

Изотермический отжиг позволяет сокращать длительный процесс обычного отжига в 2-3 раза.

Кроме этого на практике применяется:

- диффузионный отжиг для устранения химической неоднородности (ликвации) сплава; такой отжиг ведут при $T = (0,8...0,9) T_{пл}$ и длительной выдержке;
- рекристаллизационный отжиг – для снятия в изделиях наклепа и внутренних напряжений после холодной обработки давлением; нагрев производят до температуры фазовых превращений $(0,4 T_{пл})$;
- отжиг для снятия напряжений, возникающих при ковке, литье, сварке; проводят при нагреве деталей до $400-600^{\circ}C$.

Закалка

Закалкой стали называют термическую обработку, заключающуюся в нагреве ее на $30...50^{\circ}C$ выше линии GSK (рис. 2.7), выдержке и быстром охлаждении с целью повышения прочности и твердости. Различают неполную закалку, при которой нагрев ведут выше точки $A_{с1}$, т.е. до аустенитно-ферритной структуры доэвтектоидных и аустенитно-цементитной - в эвтектоидных. И полную закалку, при которой сталь нагревают до аустенитного состояния, т.е. выше точки $A_{с3}$.

При закалке скорость охлаждения стали должна быть выше критической (т. е. такой минимальной скорости охлаждения, при которой происходит превращение переохлажденного аустенита в **мартенсит**). При такой скорости углерод не успевает выделиться из кристаллической решетки, в результате образуется перенасыщенный твердый раствор углерода в α -железе, т.е. мартенсит. Сталь приобретает высокую твердость, но ее пластичность при этом падает.

Охлаждающие среды при закалке: вода, водные растворы солей, щелочей, кислот; масло.

Закаливаются углеродистые стали, содержащие углерода $> 0,3\%$. При меньшем содержании углерода эти стали практически не закаливаются.

Масло охлаждает металл медленнее, чем вода и в нем закаливают обычно высокоуглеродистые и легированные стали, которые имеют небольшую критическую скорость закалки.

На практике применяют следующие способы закалки, отличающиеся друг от друга процессом охлаждения:

- закалка в одном охладителе;
- закалка в двух средах (прерывистая закалка);
- закалка с самоотпуском;
- ступенчатая закалка;
- изотермическая закалка.

С целью упрочнения поверхности детали применяют поверхностную закалку. При такой закалке наружный слой нагревается выше критической точки $A_{с3}$. При последующем охлаждении водой поверхностный слой де-

тали приобретает мартенситную структуру, а сердцевина остается незакаленной.

В практике поверхностная закалка проводится токами высокой частоты (ТВЧ). Нагрев детали производится в индукторе вихревыми токами. Толщина нагреваемого слоя зависит от частоты тока, магнитной проницаемости и удельного сопротивления нагреваемого металла.

Так, для получения закаленного слоя толщиной 1,0 мм оптимальная частота тока должна быть ~ 60000 Гц, для слоя 2 мм ~ 15000 Гц, для 4 мм ~ 4000 Гц.

Для получения ТВЧ применяют машинные и ламповые генераторы. Индукторы изготавливают из медных трубок, которые охлаждаются водой. Форма индуктора должна соответствовать форме нагреваемой детали. Время нагрева от 3 до 5 с.

Преимущества закалки ТВЧ:

- высокая производительность;
- отсутствие заметного обезуглероживания и окисления;
- минимальные коробления;
- возможность регулирования глубины закаленного слоя и полной автоматизации процесса.

Отпуск закаленной стали

Для закаленной стали на мартенсит при высокой ее твердости характерны низкие: ударная вязкость, пластичность, предел упругости.

Ввиду указанных недостатков такая сталь малоприспособна для использования.

При отпуске: изменяется структура закалки стали и ее свойства; повышаются ударная вязкость, предел упругости, прочность. Снижаются также внутренние напряжения, отпущенная сталь менее хрупка.

В зависимости от температуры нагрева отпуск бывает:

- Низкий отпуск - нагрев до 150 ... 200°C.

Твердость и износостойкость практически остаются такими же, как и после закалки, но снижается остаточное напряжение. Повышается удельная вязкость и пластичность. В процессе низкого отпуска атомы углерода диффундируют из решетки тетрагонального мартенсита и образуют карбид железа. Концентрация углерода в решетке мартенсита снижается. Образуется отпущенный мартенсит.

Низкому отпуску подвергают режущий и измерительный инструмент, детали машин поверхностно-закаленные и закаленные после цементации и азотирования.

- Средний отпуск.

Нагрев до 350...500°C. При этом завершается диффузионное превращение остаточного аустенита в отпущенный мартенсит. Карбиды полностью обособляются от решетки мартенсита, укрупняется карбидно-ферритная смесь и наблюдается дальнейшее снижение твердости и уменьшается остаточное напряжение. Подвергают среднему отпуску пружины, рессоры, ударный инструмент, штампы и др.

- Высокий отпуск.

Нагрев до 550...650°C. Сопровождается укрупнением и округлением цементитных частиц в ферритной основе. В результате образуется структура, называемая сорбитом отпуска.

Высокому отпуску подвергаются шатуны двигателей, полуоси, оси автомобилей, болты, пальцы, валы и др. детали.

Закалку с последующим отпуском называют улучшением стали.

2.8. Химико-термическая обработка стали и сплавов

Химико-термической обработкой называются технологические процессы, приводящие к насыщению поверхностного слоя изделий каким либо химическим элементом путем диффузии его из внешней среды.

Цели химико-термической обработки:

- повышение износостойкости и усталостной прочности;
- повышение сопротивления химической или газовой коррозии.

Изменение поверхностного слоя идет в несколько стадий:

1) Адсорбция, т.е. примыкание подаваемых к изделию атомов к металлической поверхности. Возрастает с повышением температуры.

2) Растворение адсорбированных атомов в металле. В результате изменяется химический состав поверхностного слоя.

3) Диффузия растворенного вещества внутрь изделия. Скорость диффузии возрастает с повышением температуры и с увеличением концентрации по параболическому закону.

Цементация сталей

Цементацией называется процесс диффузионного насыщения углеродом поверхностных слоев стальных изделий.

После цементации: закалка, низкий отпуск.

Цементация применяется главным образом для повышения износостойкости трущихся деталей машин: зубчатых колес, пальцев, кулачковых валов, толкателей клапанов, червяков и т.п.

Если изделие цементируется не по всей поверхности, то участки не подлежащие цементации, защищаются гальваническим омеднением.

Среда, поставляющая углерод к поверхности цементируемых изделий называется:

карбюризатором



твердый (смесь древесного угля с углекислыми солями, углекислым барием).

Пример: 20...25% BaCO_3 , 2,5...3% CaCO_3 , 0,06% S, до 0,06% SiO_2 , остальное уголь, влажность до 5 %.

газовый (газ, содержащий предельные углеводороды плюс CO). Газовая цементация наиболее совершенная.

Углерод при цементации проникает на глубину от 0,5 до 3,4 мм. Содержание углерода в поверхностном слое - 0,8...1,1% (при большем содержании С - возрастает хрупкость слоя). При $T = 900...930^{\circ}\text{C}$ за 2 часа цементуемый слой достигает 1 мм, за 6 - часов - 2...3 мм.

Азотирование сталей

Азотированием называют процесс диффузионного насыщения азотом поверхностного слоя стальных деталей.

При этом повышаются износостойкость, усталостная прочность деталей.

Азотирование используют реже, чем цементацию, т.к. процесс очень длительный и толщина упрочненного слоя мала. Но зато деталь сохраняет прочность при $t = 500...600^{\circ}\text{C}$. Азотирование проводят в среде аммиака (NH_3) при температуре $500...600^{\circ}\text{C}$. При нагреве выделяется атомарный азот (N), который сначала адсорбируется, а потом растворяется в стали на глубину 0,4...0,6 мм. До азотирования изделие подвергают закалке и высокому отпуску.

Азотирование металла должно быть 2^x ступенчатое (для ускорения процесса):

- первая ступень проводится при $T = 500...520^{\circ}\text{C}$
- вторая ступень - при $T = 560...600^{\circ}\text{C}$.

Если азотирование проводят с целью увеличения коррозионной стойкости, процесс ведут при $t = 600...700^{\circ}\text{C}$. В течение 1...3 часов.

Азотирование в тлеющем разряде (600...800 В) сокращает время и получается менее хрупкий слой.

Цианирование

Цианированием называют процесс одновременного насыщения поверхности стали углеродом и азотом с целью повышения твердости, износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости.

Цианирование бывает высокотемпературным (при $800...950^{\circ}\text{C}$) и низкотемпературным (при $540...560^{\circ}\text{C}$).

В первом случае поверхность насыщается до 1,2% С и 0,3% N на глубину 1...2 мм за 5...6 часов; во втором – на глубину до 0,03 мм за 1 час.

Диффузионная металлизация – процесс насыщения поверхностного слоя стали различными металлами с целью повышения износостойкости, коррозионной стойкости и жаростойкости изделия. Практическое применение нашли: алитирование (насыщение алюминием), барирование (повышение бором), силицирование (насыщение кремнием), хромирование (насыщение хромом) и сульфидирование (образование тонкой пленки сульфида железа).

3. Магнитные материалы

3.1. Общие сведения о магнетизме

Первопричиной магнитных свойств вещества являются движущиеся электроны. Магнитный момент электрона имеет две составляющие:

- орбитальный магнитный момент, образующийся при движении электрона вокруг ядра атома;
- спиновой магнитный момент – результат вращения электрона вокруг собственной оси.

Исследования квантовой природы атома доказывают, что степень заполнения электронных оболочек атомов веществ влияет на величину их результирующих моментов.

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает некоторый магнитный момент M . Магнитный момент, отнесенный к единице объема вещества называется **намагниченностью**, J_m :

$$\bar{J}_m = \bar{M} / V$$

где J_m – векторная величина.

В пространстве, окружающем движущиеся электрические заряды (электрический ток), возникает магнитное поле.

Доля намагничивающей силы (МДС), приходящаяся на единицу длины магнитной силовой линии, называется **напряженностью** магнитного поля, H :

$$\bar{H} = F/l, \text{ A/M}$$

где H – векторная величина.

Намагниченность вещества связана с напряженностью магнитного поля отношением:

$$\bar{J}_m = K_m \cdot \bar{H}$$

где K_m – безразмерная величина, характеризующая способность данного вещества намагничиваться в магнитном поле и называется **магнитной восприимчивостью**.

Интенсивность поля в каждой его точке с учетом влияния среды характеризуется магнитной индукцией B , т.е. магнитная индукция – силовая характеристика магнитного поля.

Вещество, находящееся во внешнем магнитном поле, создает собственное магнитное поле. Поэтому суммарная магнитная индукция в веществе определяется суммой внешнего и собственного полей:

$$B = B_0 + B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot J_m$$

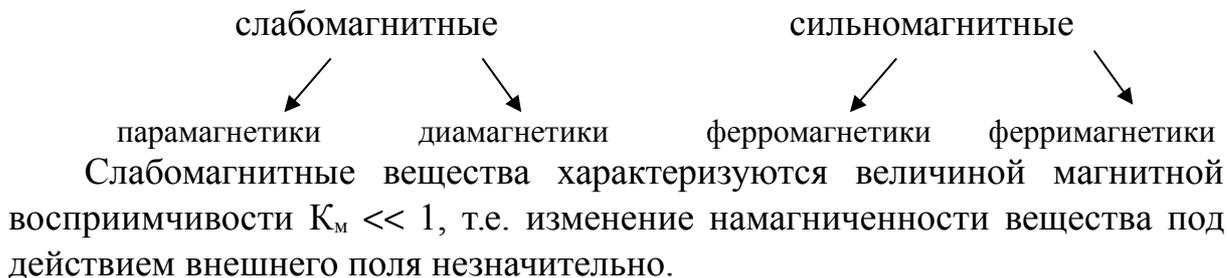
где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная в системе СИ.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J_m = \mu_0 H + \mu_0 K_m H = \mu_0 H \cdot (1 + K_m) = \mu_0 \cdot \mu \cdot H$$

где $\mu = 1 + K_m$ – относительная магнитная проницаемость, показывающая во сколько раз магнитная индукция B поля в данной среде больше, чем магнитная индукция B_0 в вакууме.

3.2. Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешнее магнитное поле все вещества можно подразделить на:



Парамагнетики – вещества, помещенные в магнитное поле вызывают некоторое усиление его ($K_m > 0$). К парамагнетикам относятся натрий, олово, магний, алюминий, марганец, палладий, титан, молибден, тантал, вольфрам.

Диамагнетики – характеризуются тем, что ослабляют внутри себя внешнее магнитное поле. Это происходит потому, что их намагниченность направлена против внешнего поля ($K_m < 0$). К диамагнетикам относятся ртуть, галлий, индий, висмут, кадмий, свинец, серебро, золото, медь, бериллий.

3.3. Общие сведения о магнитных материалах

Наибольший интерес с точки зрения технического применения представляют сильномагнитные вещества ($K_m \gg 1$), к которым относятся ферромагнетики и ферримагнетики.

Ферромагнетики – вещества, способные к сильному намагничиванию даже в слабых магнитных полях ($K_m = 10^3 \dots 10^5$). Вторая особенность этих веществ состоит в том, что выше определенной температуры, называемой **температурой Кюри**, ферромагнитное состояние вещества переходит в парамагнитное, т.е. магнитная восприимчивость снижается на три-четыре порядка. К ферромагнитным материалам относятся железо, никель, кобальт и их сплавы. К ферромагнетикам относятся также сплавы хрома и марганца. Явление ферромагнетизма связано с образованием внутри вещества магнитных доменов. Внутри каждого домена при отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов расположены параллельно друг другу в направлении легчайшего намагничивания кристалла. Однако, хотя в ферромагнетике и образуются самопроизвольно намагниченные области, но направления магнитных моментов отдельных доменов получаются самыми различными. Магнитный поток такого вещества во внешнем пространстве будет равен нулю. Возможные размеры доменов составляют около $0,001 \dots 10 \text{ мм}^3$ при толщине пограничных слоев между ними в несколько десятков, сотен атомных расстояний.

Монокристаллы ферромагнитных веществ характеризуются магнитной анизотропией, выражающейся в том, что их способность к намагничиванию различна и зависит от направления внешнего поля.

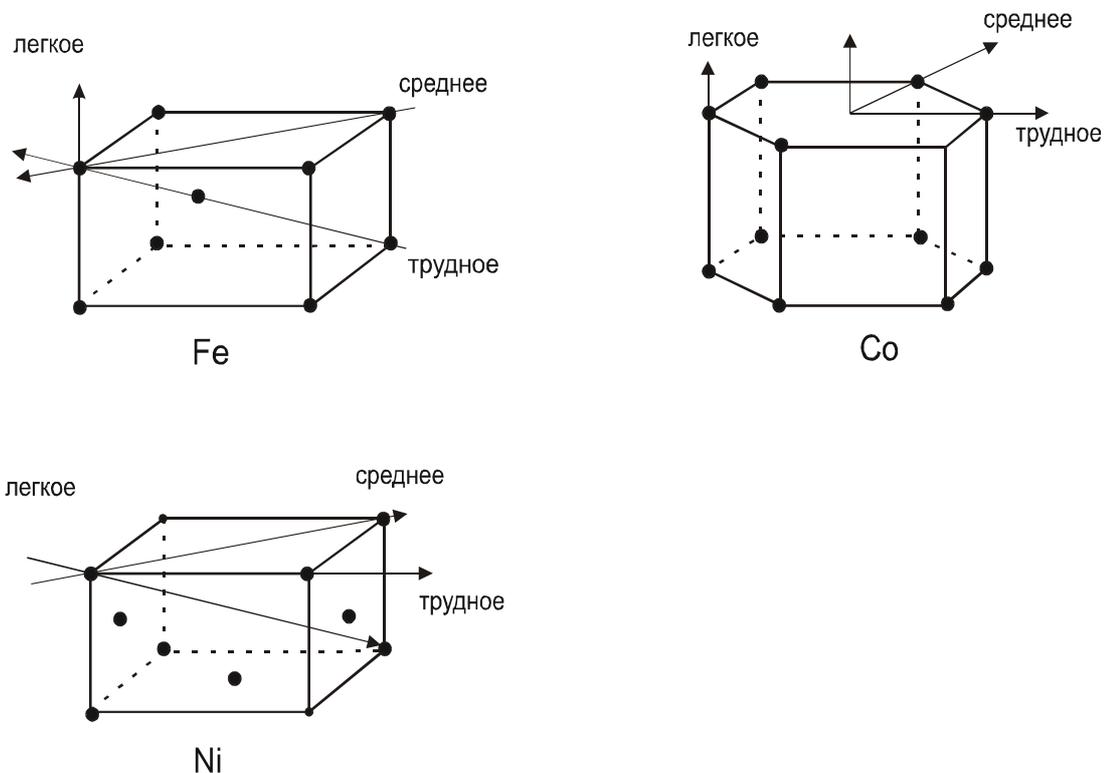


Рис. 3.1. Направления различного намагничивания железа, никеля и кобальта

Из рисунка видно, что направление легкого намагничивания для монокристалла железа будет ребро куба, а наиболее трудное – диагональ. Для никеля – направление вдоль ребра куба соответствует направлению наиболее трудного намагничивания. В тех случаях, когда анизотропия в поликристаллических магнетиках выражена достаточно резко, принято говорить, что ферромагнетик обладает магнитной текстурой. Получение заданной магнитной текстуры имеет большое значение и используется в технике для создания повышенных магнитных характеристик материала в определенном направлении.

При намагничивании ферромагнитных материалов происходит изменение их линейных размеров. Это явление получило название **магнито-стрикции**. Магнито-стрикционная деформация может быть положительной (расширение в направлении поля) и отрицательной. Из трех основных ферромагнитных элементов (Fe, Ni, Co), наибольшей магнито-стрикцией обладает никель.

3.4. Процесс намагничивания ферромагнитных материалов

Зависимость магнитной индукции ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля называют кривой намагничивания.

Для получения кривой намагничивания образца материала, необходимо этот образец размагнитить, если он имеет какое-то первоначальное значение намагниченности. Для размагничивания образца материала на него воздействуют переменным магнитным полем, амплитуду напряженности которого уменьшают до нуля. Характерная кривая намагничивания ферромагнетика изображена на рисунке 3.2.

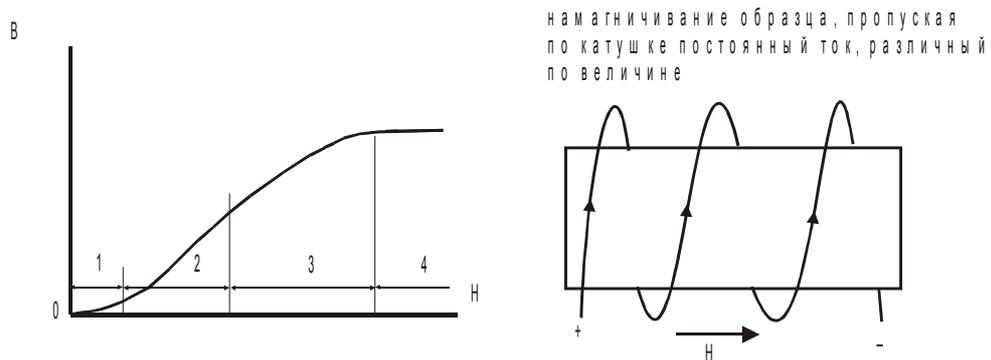


Рис. 3.2. Зависимость магнитной индукции B ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля H .

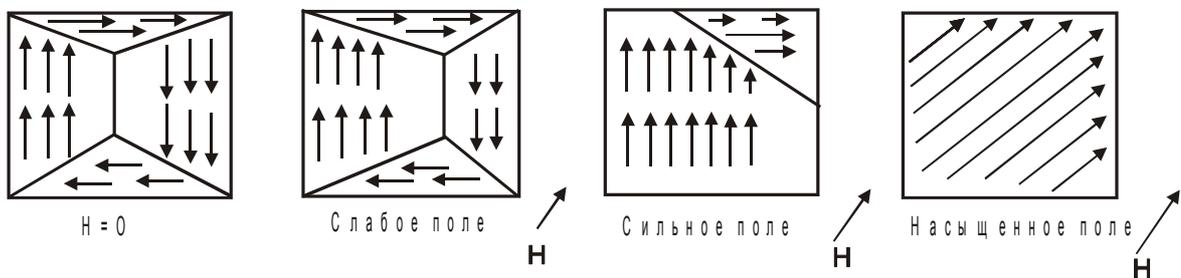


Рис. 3.3. Схема ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика

Намагничивание образца ферромагнитного материала обусловлено двумя основными процессами:

- 1) смещением доменных границ;
- 2) поворотом магнитных моментов доменов.

При отсутствии внешнего поля (см. рис. 3.2 $H = 0$) результирующий магнитный момент доменов равен нулю (образец не проявляет магнитных свойств).

Начальному участку кривой намагничивания 1 соответствует обратимое (упругое) смещение доменных границ (рис. 3.2 - слабое поле). При этом происходит увеличение тех доменов, магнитные моменты которых образуют наименьший угол с направлением внешнего поля. После исчез-

новения тока в катушке ($H = 0$) на этом участке кривой доменные границы возвращаются в первоначальное состояние, т.е. остаточной намагниченности образца не возникает.

Участок кривой 2 соответствует необратимому смещению доменных границ (рис. 3.2 - сильное поле). На этом участке кривая намагничивания имеет наибольшую крутизну.

Участок кривой 3 отражает дальнейшее увеличение напряженности, при котором магнитные моменты доменов постепенно поворачиваются по направлению поля.

На участке кривой 4 все магнитные моменты доменов ориентируются по направлению поля – наступает насыщение намагниченности и дальнейшее увеличение напряженности не приводит к увеличению магнитной индукции.

Зависимость магнитной индукции предварительно размагниченого ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля (при плавном увеличении H) называют **начальной кривой намагничивания**.

При проведении данного эксперимента значение напряженности (H) и намагниченности образца (B) контролируются соответствующими измерительными приборами.

3.5. Магнитный гистерезис

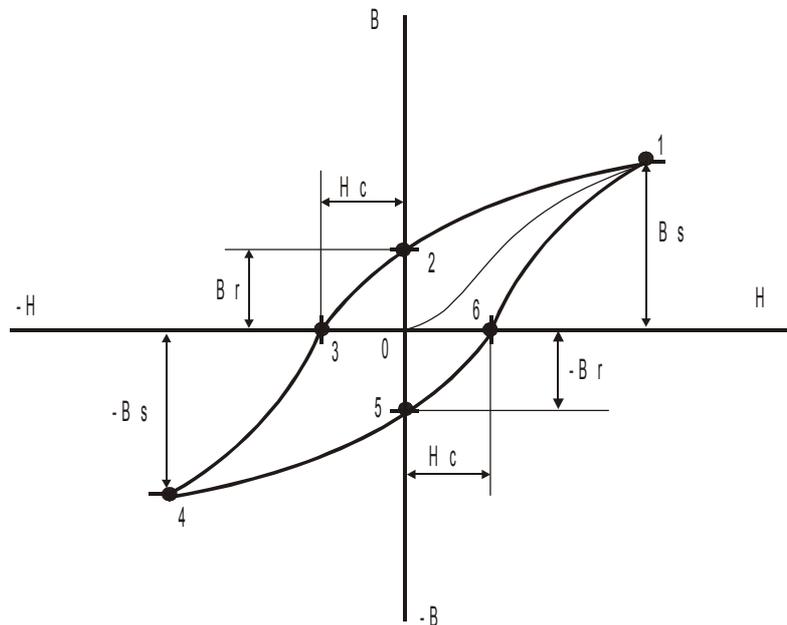


Рис. 3.4. График, отображающий процесс перемагничивания образца

Если образец ферромагнетика намагнитить до предельного значения B_s (рис. 3.4), т.е. до насыщения (кривая 0-1), а затем постепенно уменьшить напряженность поля до нуля, получится кривая 1-2. Индукция не снизится до нуля, а примет значение в точке 2- B_r , называемое остаточной индукцией. Чтобы размагнитить образец необходимо приложить магнитное поле противоположного направления (участок кривой 2-3).

Напряженность поля H_c - необходимая для размагничивания образца называется **коэрцитивной силой**.

Дальнейшее увеличение напряженности поля этого же направления вызывает перемагничивание образца до насыщения ($-B_s$, точка 4). При снижении напряженности до нуля получим участок кривой 4-5. Изменив направление поля (поменяв полярность намагничивающей катушки), получаем участок кривой 5-6 (образец в т. 6 полностью размагничен). Дальнейшее его намагничивание происходит по кривой 6-1.

Цикл перемагничивания заканчивается. Таким образом, получилась замкнутая кривая, представляющая собой петлю гистерезисного цикла перемагничивания образца ферромагнитного материала. Изменение магнитного состояния ферромагнетика при его циклическом перемагничивании характеризуется явлением **гистерезиса**, т.е. отставанием магнитной индукции образца от напряженности внешнего магнитного поля.

Материалы с малым значением коэрцитивной силы (H_c) и большой магнитной проницаемостью называются **магнитомягкими**.

Материалы с большой коэрцитивной силой и сравнительно малой проницаемостью называются **магнитотвердыми**.

3.6. Магнитная проницаемость

Магнитная проницаемость определяется по основной кривой намагничивания, как отношение магнитной индукции B к напряженности магнитного поля H в данной точке кривой намагничивания с учетом магнитной постоянной $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м:

$$\mu = B/(\mu_0 \cdot H).$$

Магнитную проницаемость при $H \approx 0$ называют **начальной проницаемостью** (μ_n).

Определяют ее при очень слабых полях (при $H \cong 0,1$ А/м). Наибольшее значение магнитной проницаемости носит наименование **максимальной проницаемости** (μ_{max}).

Характеристикой ферромагнетиков в переменных магнитных полях является **динамическая магнитная проницаемость** (μ_g), представляющая собой отношение наибольшего значения индукции к наибольшему значению напряженности магнитного поля. С увеличением частоты магнитного поля динамическая магнитная проницаемость уменьшается из-за инерционных магнитных процессов.

Магнитная проницаемость ферромагнетиков зависит от температуры, переходя через максимум при температурах близких к температуре (точке) Кюри. Так для чистого железа точка Кюри составляет 768°C , для никеля 358°C , для кобальта 1131°C . При температурах выше точки Кюри области спонтанного намагничивания нарушаются тепловым движением и материал перестает быть магнитным.

Величины начальной и максимальной проницаемости материала наряду с величинами B_r , B_s , H_c являются важнейшими его параметрами (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Магнитные характеристики ферромагнитных материалов

металл	H_c , А/м	B_r , Тл	B_s , Тл	μ_n	μ_{max}
железо	4,0	1,3	2,15	10000	200000
никель	56,0	0,4	0,61	110	600
кобальт	800	0,49	1,7	70	250

3.7. Ферромагнетики в переменных магнитных полях

Перемагничивание ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях определенной частоты сопровождается потерями энергии, которые вызывают нагрев материала.

Потери, которые неизбежно сопровождают процесс перемагничивания имеют две составляющие:

- 1) потери на гистерезиса;
- 2) потери на вихревые токи.

Потери на гистерезис вызваны инерционностью процессов смещения доменных границ и необратимыми процессами вращения векторов намагниченности отдельных доменов. Численно энергия, выделяющаяся в единице объема ферромагнитного материала за один цикл перемагничивания равна площади предельной петли гистерезиса ($\oint HdB$).

Из расчета на единицу объема материала потери на гистерезис можно определить по эмпирической формуле:

$$P_r = (k \cdot f \cdot B_{max}^2)/D$$

где P_r - потери на гистерезисе Вт/кг;

k - коэффициент, зависящий от магнитных свойств материала;

f - частота магнитного поля;

B_{max} - максимальная величина магнитной индукции в цикле перемагничивания;

D - плотность материала, кг/м³.

Экспериментально установлено, что мощность потерь, отнесенную к 1 кг электротехнической стали, можно вычислить из следующего выражения:

$$p = \frac{f}{100} \cdot [a \cdot B_{max} + b(B_{max})^2], \text{ Вт/кг}$$

где f - число полных циклов перемагничивания в секунду;

B_{max} - максимальная магнитная индукция, Тл;

a , b - постоянные, выраженные в Вт/кг (см. табл. 3.2).

Таблица 3.2

Сорт стали	Толщина листов, мм	a , Вт/кг	b , Вт/кг
------------	--------------------	-------------	-------------

электротехническая с содержанием кремния от 2 до 4%	0,35	0,3	2,1
	0,5	0,4	2,6

Пример: Определить мощность потерь на гистерезис в стальном сердечнике трансформатора весом 500 кг, изготовленном из электротехнической стали толщиной 0,5 мм при $f = 50$ Гц и $B_{\max} = 1,5$ Тл.

Решение: 1) находим удельные потери:

$$p = 50/100[0,4 \cdot 1,5 + 2,6(1,5)^2] = 3,23 \text{ Вт/кг}$$

2) общие потери на гистерезис в стальном сердечнике:

$$P_r = p \cdot 500 = 1615 \text{ Вт}$$

3.8. Потери на вихревые токи

При воздействии на ферромагнитный материал переменным магнитным полем возникает Э.Д.С. самоиндукции, пропорциональная частоте изменения поля.

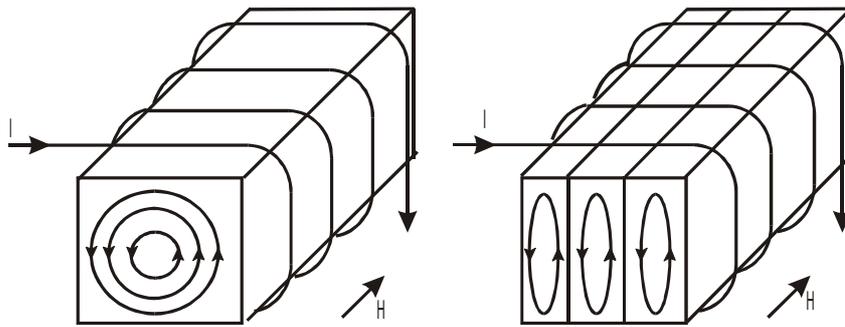


Рис. 3.5.

$$E \approx f \cdot B_m$$

Под воздействием э.д.с. самоиндукции в ферромагнитном сердечнике образуются вихревые токи (рис.3.5). Для уменьшения величины вихревых токов есть два пути:

1) Необходимо использовать магнитный материал с повышенным удельным сопротивлением.

2) Сердечник выполнить из отдельных листов.

Активная мощность, выделяемая в контуре с вихревыми токами определяется выражением:

$$P_{\text{в.т.}} = \gamma \cdot E^2 \approx \gamma \cdot f^2 \cdot B_m,$$

где $P_{\text{в.т.}}$ - мощность потерь на вихревые токи, Вт;

γ - удельная проводимость материала;

f - частота поля, Гц;

B_m - максимальная магнитная индукция, Тл.

Исследования материалов с целью определения потерь на вихревые токи позволили вывести эмпирическую формулу:

$$P_{\text{в.т.}} = K'(f/100 \cdot B_m \cdot d)^2, \text{ Вт/кг}$$

где $P_{\text{в.т.}}$ - потери на вихревые токи материала, отнесенные к 1 кг его веса;

K' - коэффициент, зависящий от свойств материала (для электротехнической стали с содержанием Si от 2 до 4% и толщине листа 0,5 мм, $K' = 4,8$);

f - частота поля, Гц;

B_m - максимальная индукция, Тл;

d - толщина листа.

Пример: Определить мощность потерь на вихревые токи в стальном сердечнике весом 500 кг, если $f = 50$ Гц, а $B_m = 1,5$ Тл.

Решение: 1) удельная мощность на вихревые токи:

$$p = 4,8 \cdot (50/100 \cdot 1,5 \cdot 0,5)^2 = 0,67 \text{ Вт/кг};$$

2) общие потери на вихревые токи:

$$P_{\text{в.т.}} = p \cdot 500 = 0,67 \cdot 500 = 335 \text{ Вт.}$$

3.9. Магнитомягкие материалы для постоянного и низкочастотного магнитных полей (см. табл. 3.3)

Магнитомягкие материалы, обладая высокой магнитной проницаемостью, небольшой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис, используются в качестве сердечников трансформаторов, электрических машин, электромагнитов, в измерительных приборах.

Таблица 3.3

Некоторые свойства магнитомягких ферромагнитных материалов

материал	магнитная проницаемость		коэрцитивная сила, А/м	индукция насыщения, Тл B_s	удельное сопротивление
	начальная, μ_n	максимальная, μ_m			
технически чистое железо	250...400	3500...4500	50...100	2,18	0,1
электролитическое железо	600	15000	30	2,18	0,1
карбонильное железо	2000...3000	20000...21500	6,4	2,18	0,1
монокристалл чистейшего железа	>20000	1430000	0,8	-	0,097
электротехническая сталь	200...600	3000...8000	10...65	1,95...2,02	0,25...0,6
низконикелевые пермаллои	1500...4000	15000...60000	5...32	1,0...1,6	0,45...0,9
высоконикелевые пермаллои	7000 100000	50000 300000	0,65...5	0,65...1,05	0,16...0,85
супермаллои 79% Ni, 5% Mo, 15% Fe, 0,5% Mn	100000	до 1500000	0,3	0,8	0,6

3.9.1. Технически чистое железо

Получают рафинированием чугуна в мартеновских печах или конвекторах, имеет суммарное содержание примесей до 0,008...0,1%. Благодаря сравнительно низкому удельному электрическому сопротивлению используется довольно редко, в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока.

3.9.2. Низкоуглеродистая листовая сталь

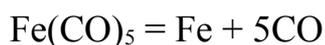
Одна из разновидностей технически чистого железа, выпускается в виде листов толщиной 0,2...4 мм, содержит не более 0,04 % углерода и не более 0,6% других примесей (серы, марганца, кремния и других элементов). Максимальное значение магнитной проницаемости для различных марок от 3500 до 4500, коэрцитивная сила не более 100...65А/м.

3.9.3. Электролитическое железо

Получают электролизом раствора сернокислого или хлористого железа, при этом анодом служит чистое железо, катодом - пластина мягкой стали. Осажденное на катоде железо (толщиной 4...6 мм) снимают и измельчают в порошок в шаровых мельницах, после чего производят вакуумный отжиг и переплавку в вакууме.

3.9.4. Карбонильное железо

Получают термическим разложением пентакарбонила железа согласно уравнению:



$\text{Fe}(\text{CO})_5$ - жидкость, получаемая воздействием оксида углерода на железо при температуре около 200 °С и давлении около 15 МПа. Карбонильное железо - порошкообразное вещество, что делает его удобным для изготовления прессованных высокочастотных магнитных сердечников. В карбонильном железе отсутствуют кремний, фосфор и сера, но содержится углерод.

3.9.5. Кремнистая электротехническая сталь

Является основным магнитомягким материалом массового потребления (см. табл. 3.4, 3.5, 3.6).

Легирование стали кремнием увеличивает ее удельное сопротивление, что вызывает снижение потерь энергии на вихревые токи, способствует выделению углерода в виде графита и полному раскислению. Это приводит к увеличению начальной магнитной проницаемости (μ_n), уменьшению коэрцитивной силы (H_c) и снижению потерь на гистерезисе. Сталь, содержащая до 4% кремния, обладает удовлетворительными механическими свойствами. При большем содержании кремния она становится хрупкой.

Таблица 3.4

Плотность и удельное сопротивление электротехнической стали в зависимости от содержания кремния

степень легирования стали кремний	вторая цифра марки стали	плотность, кг/м ³	удельное сопротивление, мкОм·м
нелегированная	0	7850	0,14
слаболегированная	1	7820	0,17
нижесреднелегированная	2	7800	0,25
среднелегированная	3	7750	0,40
повышеннолегированная	4	7650	0,50
высоколегированная	5	7550	0,60

При введении кремния в сталь несколько уменьшается индукция насыщения (примерно 0,05 Тл на 1% Si), так как кремний является немагнитным компонентом. Одновременно наблюдается понижение точки Кюри. Например, у стали, содержащей от 4% Si, $T_k = 740^\circ\text{C}$, против 768°C у чистого железа.

Но легирование кремнием повышает стабильность магнитных свойств во времени. Кремнистая сталь обладает магнитной анизотропией, подобной анизотропии чистого железа, т.е. направление легкого намагничивания ее совпадает с кристаллографическим направлением [100], а наиболее трудное совпадает с пространственной диагональю.

Холодная прокатка стальных листов вызывает сильное обжатие материала, возникающие при этом деформации вызывают преимущественную ориентацию кристаллических зерен. Дальнейший отжиг при температуре $900\text{...}1000^\circ\text{C}$ не только снижает внутренние механические напряжения, но и сопровождается интенсивной рекристаллизацией (укрупнение зерен), в результате которой кристаллические зерна осями легкого намагничивания располагаются вдоль направления проката. Получается так называемая ребровая текстура. Текстурированная сталь анизотропная по свойствам: вдоль направления прокатки наблюдается более высокая магнитная проницаемость и меньшие потери на гистерезис.

Электротехническую сталь маркируют четырьмя цифрами по следующим признакам:

- по структурному состоянию и виду прокатки (первая цифра марки):
 - 1 - горячекатаная изотропная;
 - 2 - холоднокатаная изотропная;
 - 3 - холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой.
- по содержанию кремния (вторая цифра марки):
 - 0 - содержание Si до 0,4% (нелегированная);
 - 1 - Si от 0,8 до 1,8%;
 - 3 - Si от 1,8 до 2,8%;
 - 4 - Si от 2,8 до 3,8 %;

- 5 - Si от 3,8 до 4,8 %;
- по основной нормируемой характеристике (третья цифра в марке):
- 0 - удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$);
- 1 - при 1,5 Тл и 50 Гц ($P_{1,5/50}$);
- 2 - при 1 Тл и 400 Гц ($P_{1/400}$);
- 6 - магнитная индукция в слабых ($B_{0,4}$) магнитных полях при напряженности;
- 7 - магнитная индукция в средних магнитных полях при $H = 10$ А/м (B_{10}).

Первые три цифры в марке стали означают тип стали, четвертая - порядковый номер типа стали.

Таблица 3.5

Предельное значение удельных потерь и магнитной индукции электротехнической стали класса 2

марка стали	толщина, мм	удельные потери, Вт/кг		магнитная индукция, Тл при напряженности магнитного поля, А/м		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	5000	30000
2013	0,65	3,1	7,0	1,53	1,74	2,05
	0,50	2,50	5,6	1,54	1,75	2,05
2112	0,65	3,50	8,0	1,46	1,67	2,02
	0,50	2,60	6,0	1,46	1,68	2,02
2212	0,65	2,60	6,3	1,42	1,67	2,00
	0,50	2,20	5,0	1,42	1,68	2,00
2312	0,65	2,40	5,6	1,38	1,64	1,96
	0,50	1,75	4,0	1,40	1,66	1,96
2412	0,65 0,30	1,30	3,1	1,35	1,60	1,95
		1,15	2,5	1,35	1,60	1,95

Таблица 3.6

Предельное значение удельных потерь и магнитной индукции электротехнической стали класса 3

марка стали	толщина, мм	удельные потери, Вт/кг			магнитная индукция, Тл при H , А/м		
		$P_{1/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500
3411	0,5	1,10	2,45	3,20	-	-	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	-	-	1,75
3414	0,5	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,90

Электротехническая сталь выпускается в виде рулонов и листов. Она может иметь электроизоляционное покрытие в виде оксидной пленки. Толщина стали от 0,1 до 1мм. Сталь различных классов используется для изготовления магнитопроводов аппаратов, трансформаторов, электриче-

ских машин, приборов. Применение текстурованной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20...25%, а в радиотрансформаторах - на 40%.

Предельные значения удельных потерь и индукции для стали класса 2 и 3 приведены в таблицах 3.5 и 3.6.

3.9.6. Пермаллои (см. табл. 3.3)

Это сплавы железа с никелем, они обладают большой магнитной проницаемостью в области слабых магнитных полей. Такие сплавы характеризуются тем, что у них практически отсутствует магнитная анизотропия и магнитострикция, поэтому они очень легко намагничиваются. Они подразделяются на высоконикелевые с содержанием никеля 72...80% и низконикелевые - 40...50% никеля.

Для придания этим сплавам необходимых свойств в их состав вводят дополнительные элементы (производят легирование). Молибден и хром повышают удельное сопротивление и начальную магнитную проницаемость пермаллоев и уменьшают чувствительность их к деформациям. Но при этом снижается индукция насыщения.

Медь увеличивает постоянство μ , повышает температурную стабильность и удельное сопротивление, а также делает сплавы легко поддающимися механической обработке.

Кремний и марганец, в основном, увеличивают удельное сопротивление пермаллоев. В марках пермаллоев буква Н означает никель, К - кобальт, М - марганец, Х - хром, С - кремний, Д - медь, П - с прямоугольной петлей гистерезиса.

Пермаллои 45Н и 50Н (соответственно имеющие 45% и 50% никеля) применяют для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле.

Из сплава 50 НХС (50% Ni), легированного хромом и кремнием, выполняют сердечники импульсных трансформаторов и аппаратуры связи звуковых и высоких частот. Сплавы 79 НМ, 80НХС, 76 НХД используют для изготовления сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов, при толщине 0,02 мм - сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей и бесконтактных реле.

Тонкие ленты из пермаллоев различных марок применяют в качестве материала для ячеек памяти в устройствах вычислительной техники.

3.9.7. Альсиферы

Это сплавы железа с кремнием и алюминием. Оптимальный состав таких сплавов: 9,5% Si, 5,6% Al, остальное железо. Свойства альсифера: $\mu_n = 35400$, $\mu_{max} = 11700$, $H_c = 1,8$ А/м, $\rho = 0,8$ мкОм·м, т.е. не уступает свойствам высоконикелевых пермаллоев. Из альсифера делают магнитные

экраны, корпуса приборов и другие изделия методом литья с толщиной стенок не менее 2...3 мм ввиду хрупкости сплава. Порошкообразный альсифер может быть использован наряду с карбонильным железом для изготовления высокочастотных прессованных сердечников.

3.9.8. Материалы специального назначения

3.9.8.1. Специальные ферромагнетики

К таким материалам относятся:

1. сплавы, имеющие стабильную магнитную проницаемость;
2. сплавы с магнитной проницаемостью, зависящей от температуры;
3. сплавы с высокой магнитострикцией;
4. сплавы с особо высокой индукцией насыщения.

К первым относится сплав – перминвар, содержащий 29,4 Fe, 45% Ni, 25% Co и 0,6% Mn, имеет малую коэрцитивную силу, сохраняет постоянную магнитную проницаемость при индукции 0,1 Тл.

Еще большую стабильность проявляет сплав изоперм, содержащий железо, никель, алюминий и медь.

Ко вторым относятся термомагнитные сплавы на основе Ni-Cu, Fe-Ni, Fe-Ni-Cr.

К третьим относятся сплавы Fe-Pt, Fe-Co, Fe-Al. Явление магнитострикции (изменение линейного размера) используется в генераторах ультразвуковых колебаний, используемых в установках по обработке ультразвуком твердых материалов, в устройствах преобразования механических колебаний в электрические и др.

К четвертым относятся сплавы Fe-Co (железо-кобальтовые), обладающие индукцией насыщения до 2,4 Тл (большей, чем у всех ферромагнетиков). Применяют в радиоаппаратуре, осциллографах и др.

3.9.8.2. Ферриты

Они представляют собой магнитную керамику с очень большим удельным сопротивлением и малыми потерями энергии на гистерезис и вихревые токи даже в области высоких частот. Ферриты – системы из оксидов железа и оксидов двухвалентных (реже одновалентных) металлов, соответствующих общей формуле $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me - символ 2^х валентного металла. Имеют кубическую кристаллическую решетку. Технология изготовления ферритов: тонко измельченный порошок предварительно отожженных оксидов тщательно перемешивают, добавляют пластификатор (раствор поливинилового спирта), прессуют под большим давлением изделие требуемой формы. Затем изделие подвергают обжигу при температуре 1100...1400°C.

Ферриты – это твердые и хрупкие материалы.

Большое количество марок выпускаемых ферритов обуславливается разнообразием устройств, требующих сугубо определенных магнитных характеристик. Так в качестве магнитомягких материалов используют следующие группы смешанных ферритов: марганец-цинковые ($MnO-ZnO-Fe_2O_3$), никель-цинковые ($NiO-ZnO-Fe_2O_3$) и литий-цинковые ($LiO-ZnO-Fe_2O_3$). Кроме магнитомягких находят также широкое применение ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (для запоминающих устройств), магнестрикционные ферриты для высоких частот и ферриты для сверхвысоких частот. Для СВЧ применяют ферриты: никелевые, магниевые, иттриевые и др.

3.10. Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы, в отличие от магнитомягких обладают большой коэрцитивной силой, то есть площадь гистерезисной петли у них значительно больше, чем у магнитомягких.

По применению магнитотвердые материалы подразделяются на:

- материалы для постоянных магнитов;
- материалы для записи и длительного хранения звука, изображения.

По составу и способу получения:

- легированные мартенситные стали;
- литые магнитотвердые сплавы;
- магниты из порошков;
- магнитотвердые ферриты;
- деформируемые сплавы и магнитные ленты.

3.10.1. Легированные мартенситные стали – наиболее доступный и простой материал для изготовления постоянных магнитов. Такие стали легируют хромом, вольфрамом, кобальтом и молибденом. В настоящее время имеют ограниченное применение в виду недостаточно хороших магнитных свойств.

3.10.2. Литые магнитотвердые стали системы Al-Ni-Fe, называемые альни имеют хорошие магнитные свойства. Более лучшие показатели имеют сплавы альни с добавкой кобальта (альнико) или кремния (альниси). Улучшение магнитных свойств этих сплавов достигается не только их составом, но и специальной обработкой – охлаждением магнитов после отливки в сильном магнитном поле. Недостатком этих сплавов является трудность их обработки вследствие твердости и хрупкости.

3.10.3. Магниты из порошков получают методами порошковой металлургии. При этом различают металлокерамические магниты, получаемые прессованием порошка магнитотвердых сплавов и его обжига с получением изделий не требующих обработки и металлопластические магниты. Металлопластические магниты состоят из зерен порошка магнитотвердых сплавов, скрепленных связующим веществом. Такие магниты обладают

пониженные магнитными свойствами, т.к. в их составе до 30% составляют немагнитные связующие вещества.

3.10.4. Из магнитотвердых ферритов нашел наибольшее применение **бариевый феррит** ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). Изготавливают в виде тонких дисков. Этот феррит может быть использован при высоких частотах. Достаточно дешев. Но обладает низкой механической прочностью, большой хрупкостью и сильной зависимостью магнитных свойств от температуры.

Лучшей температурной стабильностью обладают кобальтовые магниты, чем бариевые, хотя они и более дорогие.

3.10.5. Магнитные ленты.

К числу магнитотвердых материалов относятся и магнитные ленты для видео- и звукозаписи, а также для записи, хранения и ввода информации в ЭВМ. Ленты могут быть из нержавеющей сплавов (металлические) и на пластмассовой основе с рабочим слоем из порошка.

Основное применение в технике магнитной записи имеют ленты на полимерной основе. Такие ленты изготавливают нанесением магнитного лака на тонкую полимерную пленку. Большинство магнитных лент изготавливают на основе полиэтилентерефталата (лавсана), обладающего высокой механической прочностью.

Магнитный лак состоит из магнитного порошка, связующего вещества и др. компонентов. Содержание магнетика 30...40% (по объему). Магнитный компонент – порошок Fe_2O_3 коричневого цвета получают окислением магнетика Fe_3O_4 при нагревании его на воздухе до температуры около 250°C .

Лучшие по качеству магнитные ленты получают с использованием в качестве рабочего слоя на основе диоксида хрома – CrO_2 . Дальнейшее улучшение качества лент идет на основе применения более совершенных по своим магнитным свойствам материалов.

4. Проводниковые материалы

4.1. Классификация



Рис. 4.1. Классификация проводниковых материалов

Металлы высокой проводимости, имеющие удельное сопротивление при нормальной температуре не более $0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, используются для проводов, жил кабелей, обмоток электрических машин, трансформаторов и т.д. Сплавы высокого сопротивления, не менее $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, применяются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т.д.

Жидкие проводники (проводники второго рода) - электролиты; это водные растворы кислот и щелочей.

Газы при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Но если напряженность поля превысит некоторое критическое значение, обеспечивающее процессы ударной и фотонной ионизации, то газ становится проводником с электронной и фотонной электропроводностью.

Ниже будут рассмотрены вопросы, относящиеся к твердым проводниковым материалам.

4.2. Электропроводность металлов

Электронная теория металлов представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из свободных электронов. В свободное состояние от каждого атома переходит один-два электрона. Свободные электроны под действием электрического поля приходят в движение. Это движение, электрический ток, подчиняется известному закону Ома.

При столкновении движущихся электронов с узлами кристаллической решетки их энергия передается металлической основе проводника, в результате проводник нагревается. Выделение энергии в виде тепловой, подчиняется закону Джоуля-Ленца.

Таким образом, электронная теория металлов позволила аналитически объяснить найденные опытным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах.

4.3. Свойства проводников (см. Приложение 1)

К важнейшим параметрам, характеризующим свойства проводниковых материалов относятся:

- удельное сопротивление ρ (удельная проводимость γ);
- температурный коэффициент удельного сопротивления $Tk_p(\alpha_p)$;
- коэффициент теплопроводности ν_t ;
- контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термо - ЭДС);
- работа выхода электронов из металла;
- предел прочности при растяжении σ_p и относительное удлинение перед разрывом $\delta l/l$.

Удельное сопротивление.

Величина ρ , обратная удельной проводимости называется удельным сопротивлением.

Для проводника, имеющего сопротивление R , длину l и постоянное поперечное сечение S :

$$\rho = R \cdot S / l$$

Измеряется Ом·метрах (Ом·м); разрешается пользоваться внесистемной единицей Ом·мм²/м. Вместо единицы Ом·мм²/м и желательно применять равную ей по размеру единицу СИ - мк Ом·м. Связь между названными единицами удельного сопротивления:

$$1 \text{ Ом}\cdot\text{м} = 10^6 \text{ мкОм}\cdot\text{м} = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$$

Диапазон удельного сопротивления металлических проводников довольно узок: от 0,016 мкОм·м для серебра и до 10 мкОм·м для железо-хромалюминиевых сплавов.

Значение удельного сопротивления в основном зависит от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике, которое определя-

ется структурой проводникового материала. Чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ .

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов

Концентрация свободных электронов в металлическом проводнике при повышении температуры практически остается неизменной. Однако вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется больше препятствий на пути направленного движения электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшается средняя длина свободного пробега электрона. Уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металла и возрастает его удельное сопротивление.

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов (кельвин в минус первой степени):

$$\text{Тк}_\rho = \alpha_\rho = \rho^{-1} \cdot d\rho / dT$$

При изменении температуры в узких диапазонах на практике пользуются следующей зависимостью:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot [1 + \alpha_\rho \cdot (t_2 - t_1)],$$

где ρ_2 и ρ_1 - удельное сопротивление при температурах t_2 и t_1 (при этом $t_2 > t_1$;

α_ρ - температурный коэффициент удельного сопротивления данного материала.

Теплопроводность металлов.

Передача тепла через металл в основном осуществляется свободными электронами, поэтому коэффициент теплопроводности металлов γ_t намного больше, чем у диэлектриков. При прочих равных условиях, чем больше проводимость металла, тем больше его коэффициент теплопроводности.

Термоэлектродвижущая сила.

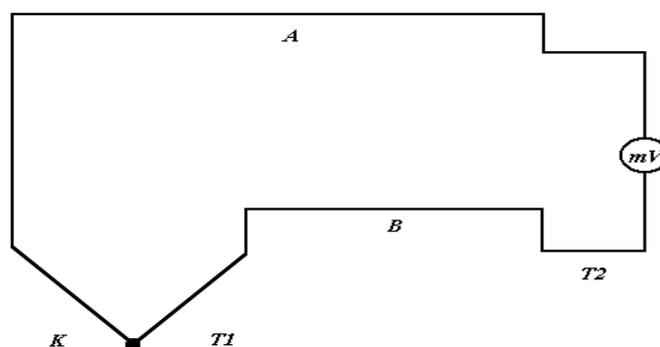


Рис. 4.2. Схема термопары

При соединении двух разнородных проводников А и В (точка К) между ними возникает контактная разность потенциалов, если температура T_1 будет больше T_2 это можно представить в виде уравнения:

$$U = \Psi \cdot (T_1 - T_2)$$

где Ψ - постоянный для этой пары проводников коэффициент термо-ЭДС.

Причина появления термо-ЭДС заключается в различии значений работы выхода электронов из различных металлов, а также в том, что концентрация электронов у разных металлов неодинакова.

4.4. Материалы высокой проводимости

В качестве материалов с высокой проводимостью наиболее широкое применение нашли медь и алюминий.

4.4.1. Медь (см. табл. 4.1)

Имеет следующие преимущества как проводниковый материал:

- малое удельное сопротивление;
- высокая механическая прочность;
- удовлетворительная коррозионная стойкость;
- хорошая обрабатываемость (прокатывают листы, ленты, протягивают в проволоку);
- относительная легкость пайки и сварки.

Получение.

Медь получают путем переработки сульфидных руд. После нескольких плавок и обжигов с интенсивным дутьем медь, предназначенную для электротехники, обязательно подвергают электролитической очистке. Полученные после электролиза катодные пластины меди переплавляют в болванки весом 80...90 кг, которые прокатывают и протягивают в изделия определенного сечения.

Для получения проволоки различного диаметра, медные болванки сначала подвергают горячей прокатке в катанку диаметром 6...7 мм. Затем катанку протравливают слабым раствором серной кислоты для удаления с ее поверхности оксида меди (CuO), образующегося при нагреве. После этого катанку протягивают без подогрева в проволоку нужного диаметра.

Марки меди.

В качестве проводникового материала применяется медь марок М1 и М0. Медь марки М1 имеет примесей около 0,1%, при этом кислорода должно быть не более 0,08%. Наличие кислорода в меди ухудшает ее механические свойства.

Лучшими механическими свойствами обладает медь марки М0, в которой примесей не более 0,05%, в том числе кислорода не выше 0,02%. Для изготовления тонкой проволоки используется медь марки М0.

При холодной прокатке получается твердая (твердотянутая) медь (МТ), которая благодаря наклепу имеет высокий предел прочности при растяжении, а также обладает упругостью при изгибе.

Если медь подвергнуть отжигу, то есть нагреву до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, то получится мягкая (отожженная) медь (ММ), которая пластична, имеет малую твердость. Процесс отжига производится в специальных печах без доступа воздуха, чтобы избежать окисления.

Мягкая медь при 20°C имеет удельное сопротивление $\rho = 0,017241$ мкОм·м (то есть проводимость 58 Мсм/м).

Твердую медь применяют там, где надо обеспечить высокую механическую прочность, твердость и сопротивляемость истиранию (для контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин и прочее).

Мягкую медь в виде проволок круглого и прямоугольного сечения применяют в качестве токопроводящих жил кабелей, проводов, где важна пластичность и гибкость.

Сплавы меди.

Бронзы - сплавы меди с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, кадмием. Они имеют более высокие, чем чистая медь механические свойства. Так, кадмиевую бронзу применяют для изготовления контактных проводов и коллекторных пластин особо ответственных электрических машин.

Латунь - сплав меди с цинком обладает высоким относительным удлинением перед разрывом при повышенном по сравнению с чистой медью пределе прочности при растяжении. Поэтому латунь хорошо обрабатывается штамповкой, глубокой вытяжкой и т.п. Применяется в электротехнике для изготовления различных токопроводящих деталей.

4.4.2. Алюминий (см. табл. 4.1)

Примерно в 3,5 раза легче меди. По сравнению с медью обладает пониженными механическими и электротехническими свойствами. При одинаковом сечении и длине алюминиевого провода, он имеет сопротивление больше, чем медного в 1,63 раза ($0,028:0,0172 = 1,63$).

Следовательно, чтобы получить алюминиевый провод одинаковый по сопротивлению с медным, то его сечение нужно выбрать в 1,63 раза большим.

В электротехнике используют алюминий марки А1, содержащий примесей не более 0,5%. Более чистый алюминий марки АВ00 (примесей не более 0,03%) применяют для изготовления фольги, электродов. Алюминий наивысшей чистоты АВ000 имеет примесей не более 0,004%.

Разные примеси в различной степени увеличивают удельное сопротивление алюминия. Так добавки никеля, кремния, цинка или железа увеличивают ρ на 2...3%. Примеси меди, магния, серебра увеличивают ρ алюми-

ния на 5...10%. Еще более сильней увеличивает ρ алюминия титан, марганец.

Подобно меди, алюминий подвергают тем же операциям - прокатке, протяжке и отжигу. Из алюминия может прокатываться тонкая фольга (6...7 мкм), применяемая в качестве электродов бумажных и пленочных конденсаторов.

Таблица 4.1

Свойства медной и алюминиевой проволоки

Параметры	Медь		Алюминий	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа не менее	360...390	260...280	160...170	80
Относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$ не менее	0,5...2,5	18...35	1,5...2,0	10...18
Удельное сопротивление ρ мкОм·м, не более	0,0179-0,0182	0,01734	0,0295	0,290

Алюминий при окислении покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Эта пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов и делает невозможной пайку алюминия обычными методами. Для пайки алюминия используют специальные припои. В местах контакта алюминия и меди возможна гальваническая коррозия. Если такой компакт увлажнить, то возникает местная гальваническая пара с довольно высокой ЭДС, под действием которой течет ток от алюминия к меди и алюминиевый проводник разрушается.

Алюминиевые сплавы обладают повышенной механической прочностью. Примером такого сплава является АЛЬДРЕЙ, содержащий 0,3...0,5% магния, 0,4...0,7% кремния, 0,2...0,3% железа (остальное - алюминий). Высокие механические свойства альдрей приобретает при закалке и охлаждении его в воде при температуре 510...550°C, волочении и последующей выдержке при температуре около 150° С. В альдрее образуется соединение Mg_2Si , которое и придает сплаву высокие механические свойства. Альдрей в виде проволоки имеет плотность 2,700 кг/м³, $\rho = 0,0317$ мкОм·м, $\Delta l/l = 6,5\%$, $\sigma_p = 350$ Мпа, $\alpha_p = 0,0036$ К⁻¹. Таким образом, альдрей, сохраняя легкость Al и близкое к нему удельное сопротивление, по механической прочности приближается к твердой меди. Разработаны алюминиевые сплавы типа альдрей, не требующие термической обработки.

Биметалл. Для уменьшения расхода меди в некоторых проводниковых конструкциях целесообразно применять так называемый проводниковый биметалл. Это сталь, покрытая снаружи слоем меди. Для изготовления биметалла применяют два способа:

- горячий (стальную болванку ставят в форму, а промежуток между сталью и стенками формы заливают расплавленной медью. После охлаждения биметаллическую болванку подвергают прокатке и протяжке);

- холодный или электролитический: медь осаждают электролитически на стальную проволоку, пропускаемую через ванну с раствором медного купороса. Холодный способ обеспечивает равномерность толщины медного покрытия, но требует значительного расхода электроэнергии; при холодном способе сцепление слоя меди со сталью менее прочное, чем при горячем способе.

Прочность биметалла больше, чем меди, но электрическая проводимость меньше. Медь защищает сталь от коррозии. Биметаллическая проволока выпускается диаметром от 1 до 4 мм. Сопротивление 1 км биметаллической проволоки постоянному току при 20°C от 60 Ом/км (при $d = 1$ мм) до 4 Ом/км (при $d = 4$ мм). Такую проволоку применяют для линий связи, электролиний.

Из проводникового биметалла изготавливают шины распределительных устройств, полосы для рубильников, различные токоведущие детали электрических аппаратов.

4.5. Сплавы высокого сопротивления

Эти сплавы применяют для электроизмерительных приборов, образцовых резисторов и нагревательных приборов.

Кроме высокого удельного сопротивления такие сплавы должны обладать высокой стабильностью параметров во времени, иметь малый температурный коэффициент удельного сопротивления α_p , малый коэффициент термо-ЭДС в паре сплава с медью. Сплавы для электронагревательных элементов должны длительно работать на воздухе при высоких температурах (иногда до 1000°C и даже выше). Во многих случаях требуется возможность изготовления из сплавов гибкой проволоки. Желательно, чтобы сплавы, используемые для приборов, производимых в больших количествах, - реостатов, электроплиток, электрических чайников, паяльников, - были более дешевыми и по возможности не содержали дефицитных компонентов.

Манганин - сплав, широко применяемый для изготовления образцовых резисторов. Примерный его состав: Cu - 85%, Mn - 12%, Ni - 3%. Для манганина - $\rho = 0,42...0,48$ мкОм·м, α_p весьма мал ($5...30$)·10⁻⁶ К⁻¹, коэффициент термо-ЭДС в паре с медью всего лишь 1...2 мкВ/К. Манганин может вытягиваться в тонкую проволоку (диаметром до 0,02 мм). Для обеспечения малого значения α_p стабильности ρ во времени манганиновая проволока подвергается специальной термообработке: отжигу при температуре 550...600°C с последующим медленным охлаждением. Предельно допустимая рабочая температура сплавов манганина не более 220°C; механические свойства: $\sigma_p = 450...600$ МПа, $\Delta l/l = 15...30\%$, плотность 8400 кг/м³.

Константан - сплав, содержащий около 60% меди и 40% никеля. Обладает значительным постоянством ρ при изменении температуры.

Сплавы константа имеют: $\rho = 0,48...0,52$ мкОм·м, $\sigma_p = 400...500$ МПа, $\Delta l/l = 20...40\%$, плотность 8900 кг/м³. Нагревостойкость выше, чем у манганина: константан можно применять для изготовления реостатов и электронагревательных элементов, длительно работающих при температуре 450 °С. По сравнению с манганином, константан имеет значительно большую термо-ЭДС, которая составляет $45 \dots 55$ мкВ/К. Это является недостатком при использовании константановых резисторов в измерительных схемах. При наличии разности температур в местах контактов проводников из константана с медными возникает термо-ЭДС, которая может явиться причиной ошибок, особенно при мостовых и потенциометрических методах измерений. Зато константан может быть использован для изготовления термопар. Из-за большого содержания дорогого и дефицитного никеля, сплавы константана ограничены в применении.

Сплавы на основе железа (нихромы) (см. табл. 4.2.)

Эти сплавы в основном применяются для электронагревательных элементов. Высокая нагревостойкость этих сплавов объясняется введением в них металлов, имеющих высокое значение объемного коэффициента **оксидации**; при нагреве эти металлы образуют сплошную защитную оксидную пленку. Такими металлами являются никель, хром, алюминий. Длительность работы электронагревательных элементов из нихрома и аналогичных сплавов может быть во много раз увеличена при исключении доступа кислорода к поверхности проволоки. В трубчатых электронагревательных элементах спираль из сплава высокого сопротивления помещается в магнезию (MgO), поэтому они могут работать весьма длительное время без повреждений.

Таблица 4.2

Свойства сплавов типа нихром

Марка сплава	Состав % по массе *			Плотность, кг/м ³	ρ , мкОм·м	α_p , К ⁻¹	Макс.раб. температура, °С
	Cr	Ni	Mn				
X15H60	15-18	55-61	1,5	8300	1,1 - 1,2	100-200	1000
X20H80	20-23	75-78	1,5	8500	1,0 - 1,1	100-200	1100

* - остальное Fe.

Хромо-алюминиевые сплавы (фехраль, хромаль) намного дешевле нихромов. Однако эти сплавы менее технологичны, более тверды и хрупки. Поэтому эти сплавы в основном используются для электронагревательных устройств большой мощности и промышленных электрических печей (см. табл. 4.3).

Таблица 4.3

Свойства хромо-алюминиевых сплавов.

Марка сплава	Состав %, по массе *				Плотность кг / м ³	ρ мкОм·м	Мак.раб. температура °С	σ_p МПа
	Mn	Ni	Cr	Al				

X13Ю4	0,7	0,6	12-15	1,5-5,5	7300	1,2 - 1,35	100 - 200	700
X23Ю5	0,7	0,6	22-25	4,5-5,5	7300	1,3 - 1,5	65	800

4.6. Сплавы для термопар

Для изготовления термопар применяются следующие сплавы:

- хромель (90% Ni, 10 % Cr)
- копель (56% Cu, 44 % Ni)
- алюмель (95 % Ni, остальное Al, Si, Mg)
- платинородий (90 % Pt, 10 % Rh).

Термопары применяются для измерения следующих температур:

- до 1600⁰С - платинородий - платина;
- до 900 – 1000⁰С - хромель - алюмель;
- до 600⁰С - хромель - копель, железо - копель, железо - константан;
- до 350⁰С - медь - константан, медь - копель.

Наибольшую термо-Эдс при данной разности температур дает термопара хромель - копель.

Весьма значительным коэффициентом термо-ЭДС обладают некоторые полупроводниковые материалы.

Тензометрические сплавы - применяются в преобразователях деформации под действием механических усилий (обычно растягивающих). Действие таких преобразователей основано на изменении сопротивления тензометрического элемента.

Коэффициент тензочувствительности:

$$d = (\Delta R/R) / (\Delta l/l)$$

где ΔR - изменение сопротивления R при изменении длины элемента Δl , l - длина элемента.

Значение d определяется выражением:

$$d = 1 + (\Delta \rho/\rho) \cdot (E \cdot S/F) \cdot 2 \mu$$

где $\Delta \rho$ - изменение удельного сопротивления материала тензопреобразователя под влиянием механической нагрузки F ;

S - площадь поперечного сечения преобразователя;

E - модуль Юнга;

μ - коэффициент Пуассона материала проволоки.

Основным материалом для тензопреобразователей, работающих при сравнительно невысоких температурах, является константан.

4.7. Контактные материалы

Наиболее ответственными узлами в электроустановках являются контактные соединения, служащие для периодического замыкания и размыкания электрических цепей.

Материалы для разрывных контактов должны обладать малым переходным электрическим сопротивлением контакта в замкнутом состоянии при больших силах тока и напряжениях. Они должны также обеспечивать высокую надежность контактного соединения (исключение возможности обгорания контактирующих поверхностей, а также приваривания друг к другу под действием электрической дуги).

В качестве материалов для разрывных контактов применяются тугоплавкие металлы, а также различные сплавы и металлокерамические композиции. Широко применяется материал системы Ag-CdO при содержании оксида кадмия 12 ... 20 % по массе. Для разрывных контактов в установках большой мощности применяют композиции Ag с Co, Cr, W, Mo, Ta, Nv; меди с W и Mo; золота с W и Mo. Материалы для скользящих контактов должны обладать высокой стойкостью к истиранию. Для таких контактов применяют холоднотянутую (твердую) медь, бериллиевую бронзу, а также материалы системы Ag -CdO.

4.8. Припой (см. табл. 4.4.)

Это специальные сплавы, применяемые при пайке. Припой при плавлении смачивает металл и заполняет зазоры между соединяемыми деталями. Пайка применяется для создания механически твердого шва.

Таблица 4.4

Состав и свойства припоев

Тип припоя	Марка припоя	Основные компоненты	Свойства		Материалы для пайки
			σ_p , МПа	t плавл., °С	
Оловянно-свинцовые	От ПОС -18 до ПОС - 90	Sn 18-90% Sb 0,15-2,5% Pb остальное	28-43	190-277	Медь, ее сплавы, оцинкованное железо
Оловянно-свинцово-кадмиевые	ПОСК-47	Sn 47-50% Pb 32-36% Cd 17-18	---	145 - 180	Медь, ее сплавы, серебро
Оловянно-свинцово-серебряно-кадмиевые	ПСрК	Sn 30% Pb 63% Cd 5% Ag 2%	---	225	То же
Медно-цинковые	ПМЦ - 36 ПМЦ - 54	Cu 40-50% Zn - остальное	220	825 - 860	Медь, ее сплавы, сталь
Медно-серебряно-цинковые	От ПСР - 25 до ПСР - 70	Cu 26-40% Zn 4-35% Ag 25-70%	200 - 350	720 - 765	Медь, ее сплавы, сталь, платина, вольфрам, серебро
Оловянно-кадмиево-цинковый	ПКЦ-50	Sn 40-55% Cd 20% Zn 25% Al 15%	---	200 - 250	Алюминий и его сплавы

4.9. Флюсы

Это вспомогательные материалы для получения надежной пайки.

Их назначение:

- растворять и удалять оксиды с поверхности спаиваемых металлов;
- защищать в процессе пайки поверхность металла, а также расплавленный припой от окисления.

По действию, оказываемому на металл, подвергающийся пайке, флюсы бывают: *активные или кислотные*. Их изготавливают из соляной кислоты, хлористых и фтористых соединений металлов. Применение таких флюсов при пайке требуют тщательной промывки и полного удаления их остатков.

Бескислотные - канифоль и флюсы, приготовленные на основе канифоли с добавлением неактивных веществ (спирта, глицерина).

Активированные - флюсы, приготовленные на ее основе с добавлением активаторов - небольших количеств солянокислого или фосфорнокислого анилина, салициловой кислоты, солянокислого диэтиламина и т.п.

Антикоррозийные - это флюсы на основе фосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений, а также флюсы на основе органических кислот. Остатки их не вызывают коррозии.

4.10 Неметаллические проводники

Электроугольные изделия (см. табл. 4.5; 4.6).

Из числа твердых неметаллических проводниковых материалов наибольшее применение получили материалы на основе углерода (электротехнические угольные изделия или сокращенно электроугольные изделия). Из угля изготавливают щетки для электрических машин, электроды для прожекторов, электроды для дуговых электрических печей и электролитических ванн, аноды гальванических элементов. Угольные порошки используют для создания сопротивления, изменяющегося от звукового давления. Из угля делают высокоомные резисторы, разрядники для телефонных сетей.

В качестве сырья для производства электроугольных изделий можно использовать сажу, графит или антрацит.

В качестве связующих веществ для получения стержневых электродов применяются каменноугольная смола или жидкое стекло. Изделия более сложных форм получают в соответствующих пресс-формах; угольные заготовки подвергаются процессу обжига, который определяет форму углерода. При высоких температурах достигается перевод углерода в графит; такой процесс обжига носит название *графитирования*.

Обжиг обычных щеток для электрических машин ведут при температуре около 800⁰С; графитированные щетки при обжиге нагревают до 2200⁰С.

Угольные электроды, предназначенные для работы при высоких температурах обжигают, вплоть до 3000⁰С.

Щетки служат для образования скользящего контакта между неподвижной и вращающейся частями электрической машины, т.е. для подвода (или отвода) тока к коллектору или контактными кольцам.

Щетки выпускают различных размеров - от 4x4 до 35x35 мм при высоте от 12 до 70 мм. Существуют несколько марок щеток, имеющих определенное значение удельного сопротивления, допустимой плотности тока, линейной скорости на коллекторе, коэффициента трения, твердости и т.д.:

- угольно-графитные (УГ);
- графитные (Г);
- электрографитированные (ЭГ);
- медно-графитные (МГ).

Таблица 4.5

Тип электродов	Удельное сопротивление, мкОм·м	Плотность, кг/м ³	Предельная прочность σ_p , МПа при растяж.	Предельная прочность σ_p , МПа при сжатии
Угольные	50	1500	700...1100	2300...4100
Графитированные	15	2000	600...700	200...500

Таблица 4.6

Типы щеток	Удельное сопротивление, мкОм·м	Плотность тока, до q МА/м ²	Допустимая линейная скорость, м/с
Г и УГ	18...60	6...8	10...15
Г	10...46	7...11	12...25
ЭГ	10...45	9...11	25...45
М и МГ	0,05...1,2	12...20	12...25

Пиролитический углерод (см. табл. 4.7) получают путем пиролиза (термического разложения без доступа кислорода) газообразных углеводородов в камере, где помещены керамические или стеклянные основания заготовок для резисторов. Схема реакции пиролиза углеводородов общего состава C_mH_n :



Особенностью структуры пиролитического углерода является отсутствие строгой периодичности в расположении слоев (в отличие от графита) при сохранении их параллельности.

Таблица 4.7

Материал	Удельное сопротивление, мкОм·м	Плотность, кг/м ³	Температ. коэффиц. линейн. сопротивления, $\alpha_1 \cdot 10^{-4}$, K ⁻¹	Температ. коэффиц. линейн. расширения, $\alpha_1 \cdot 10^{-6}$, K ⁻¹
Поликристал. графит	8	2,26	-10	7,5

Монокристалл графита				
- вдоль базисных плоскостей	0,4	2,24	-9	6,6
- поперек базисных плоскостей	100	2,24	-400	2,6
Пиролитический углерод	10...50	2,10	-2	6,5...7,0

4.11. Проводниковые материалы особо высокой нагревостойкости

Для нагревательных элементов высокотемпературных электрических печей требуются проводниковые материалы, надежно работающие при температурах 1500...2000⁰С. Эта проблема еще полностью не решена, но среди особо нагревостойких материалов следует отметить некоторые оксиды - прежде всего керамика диоксида циркония ZrO₂, стабилизированная добавкой оксида иттрия, керамика диоксида церия CeO₂, некоторые хромиты.

4.12. Сверхпроводники

У многих металлов и сплавов при температурах, близких к абсолютному нулю, наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления. Это явление получило название сверхпроводимости, а температуру T_c, при которой происходит переход вещества в сверхпроводящее состояние, называют критической температурой перехода. Впервые сверхпроводимость была обнаружена в 1911 году у ртути (T_c = 4,2 К).

Переход вещества в сверхпроводящее состояние является обратимым; при повышении температуры оно переходит в нормальное состояние.

В настоящее время известно 35 сверхпроводниковых металлов и более тысячи сверхпроводниковых сплавов и химических соединений различных элементов. В то же время такие металлы, как серебро, медь, золото, платина и др. перевести в сверхпроводящее состояние не удалось даже при температурах около милликельвина.

Каждый сверхпроводник имеет свое значение критической температуры перехода (T_c). Так у иридия T_c = 0,14 К (самая низкая), у алюминия - 1,2 К, у ниобия - 9,4 К.

Сверхпроводящие элементы и устройства находят все большее применение. Так для создания сверхсильных магнитных полей в настоящее время производятся в большом количестве сверхпроводниковые электромагниты. Обмотки таких электромагнитов выполняют из сплавов систем ниобий-цирконий, ниобий-титан и др.

5. Полупроводниковые материалы

5.1. Классификация полупроводниковых материалов

Полупроводники - это материалы, обладающие способностью изменять свои электрические свойства под влиянием внешних энергетических воздействий.

Классификация полупроводников по их составу и свойствам представлена на Рис. 5.1.



Рис. 5.1. Классификация полупроводников

5.2. Общие сведения о полупроводниках

Многочисленная группа веществ, обладающих электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре больше, чем у проводников и меньше, чем у диэлектриков, относятся к полупроводникам (см. табл. 5.1, 5.2).

Таблица 5.1

Класс материалов	Удельное сопротивление ρ , Ом·м	Тип электропроводности
Проводники	$10^{-8} \dots 10^{-5}$	Электронная
Полупроводники	$10^{-6} \dots 10^8$	Электронная
Диэлектрики	$10^7 \dots 10^{16}$	Ионная и электронная

Основу современной электроники составляют неорганические кристаллические полупроводники. Полупроводниковыми свойствами обладают 12 химических элементов, имеющие разные значения ширины запрещенной зоны.

Таблица 5.2

Простые полупроводники

Элемент	Группа в таблице Менделеева	Ширина запрещ. зоны, эВ	Элемент	Группа в таблице Менделеева	Ширина запрещ. зоны, эВ
Бор	3	1,1	Мышьяк	5	1,2
Углерод (алмаз)	4	5,6	Сурьма	5	0,12
Кремний	4	1,12	Сера	6	2,5
Олово	4	0,08	Селен	6	1,8
Германий	4	0,065	Теллур	6	0,36
Фосфор	5	1,5	Йод	7	1,25

Углерод существует в двух формах - алмаз и графит. Графит близок к полупроводникам, а чистый алмаз - диэлектрик. Но искусственные алмазы за счет вводимых примесей проявляют свойства полупроводников. Олово в нормальных условиях - проводник, но при температуре ниже 13,2⁰С оно переходит в α - модификацию (серое олово); практического применения не нашло.

Из простых проводников наибольшее применение в практике изготовления полупроводниковых приборов нашли кремний и германий.

Сложные полупроводники представляют собой химические соединения двух или большего числа химических элементов. При изготовлении полупроводниковых приборов используют как монокристаллы, так и поликристаллические материалы. Поликристаллическая структура вещества характерна наличием в его объеме большого числа мелких кристаллических зерен, ориентированных относительно друг друга хаотически.

Вещества монокристаллическом состоянии отличаются высокой степенью чистоты и минимальными структурными несовершенствами. Применение германия и кремния в виде монокристаллов позволяет в полной мере использовать их полупроводниковые свойства и свести к минимуму неконтролируемые изменения электрических свойств.

Монокристаллы можно получить при условии образования такой структуры из единого центра кристаллизации. Приборы, изготовленные из полупроводниковых материалов, обладают рядом преимуществ: большим сроком службы, малыми габаритами, надежностью конструкции, экономичностью.

Углубленное изучение свойств полупроводников позволило перейти от дискретных полупроводниковых приборов к созданию и серийному производству интегральных микросхем - основы сложнейших кибернетических систем для использования их в народном хозяйстве, для освоения космоса, для исследований в области биологии и медицины. Дальнейшее развитие

микроэлектроники идет по пути сокращения массы и размеров электронной аппаратуры, увеличения плотности монтажа, повышения надежности, сокращения потребности в материалах.

Полупроводники применяют:

- для получения и генерации электрических сигналов (транзисторы, диоды, интегральные схемы);
- в качестве источников тепловой энергии (терморезисторы, нагревательные элементы);
- в качестве преобразователей и источников оптических сигналов (фоторезисторы, светодиоды, лазеры);
- для преобразования механических колебаний (тензорезисторы, пьезодатчики).

Производство полупроводниковых материалов расширяется по мере ускорения развития электроники и микроэлектроники.

Особая роль принадлежит полупроводникам при создании быстродействующих ЭВМ.

5.3. Электропроводимость полупроводников

5.3.1. Собственные полупроводники

Собственный полупроводник - полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводимость. Что же обеспечивает электропроводимость собственного полупроводника? Для ответа на этот вопрос обратимся к примеру полупроводников - элементов 4 группы таблицы Д.М. Менделеева: кремния и германия. Эти элементы содержат на внешней оболочке атома по четыре электрона. Кристаллическая структура их сформирована при кристаллизации в виде гранецентрированной кубической решетки. Каждый атом, занимающий место в узле решетки, объединяется с соседними атомами ковалентными связями.

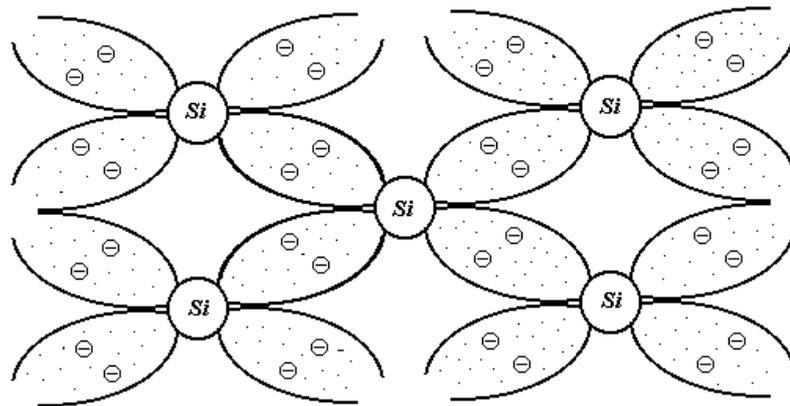


Рис 5.2. Упрощенная (плоскостная) модель кристаллической решетки кремния

Таким образом, каждый внешний электрон принадлежит сразу двум атомам, поэтому внешние оболочки атомов достраиваются до восьми электронов. Все электроны атомов собственного полупроводника участвуют в образовании ковалентных связей; свободных зарядов, обеспечивающих электропроводность, нет. Для того, чтобы свободные заряды появились, необходимо разорвать ковалентную связь, а для этого нужно придать электрону дополнительную энергию активации W_a , равную энергии разрыва ковалентной связи. Освободившийся электрон приходит в движение за счет тепловой энергии.

Внешнее электрическое поле заставит двигаться свободный электрон в противоположном полю направлению со скоростью V . Отношение средней скорости движения (дрейфа) электрона к напряженности поля называется подвижностью электрона - μ_n :

$$\mu_n = V/E, \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$$

На месте, с которого оторвался электрон образуется незаполненная связь, заряд которой положительный, а по величине равен заряду электрона, т.е. *дырка проводимости*.

Таким образом, разрыв одной ковалентной связи является причиной возникновения двух зарядов: отрицательного (электрон) и положительного (дырка). Такой процесс возникновения зарядов в полупроводнике получил название *генерации электронно-дырочных пар*. При этом концентрация свободных электронов (n) в единице объема вещества равна концентрации дырок (p), т.е. $n = p$.

Полупроводник, в котором электропроводность возникает в результате разрыва ковалентных связей, называется собственным.

Ввиду различий в механизмах движения свободных электронов и электронов, перемещающихся по освобожденным связям, т.е. дырки, их подвижность различна. Так для кремния:

- подвижность электронов $\mu_n = 0,145 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$;
- подвижность дырок $\mu_p = 0,045 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Собственная проводимость полупроводника (γ) складывается из электронной электропроводности (γ_n) и дырочной проводимости (γ_p):

$$\gamma = \gamma_n + \gamma_p = e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p.$$

Явление электропроводности объясняет зонная теория твердого тела. Запрещенная зона ΔW для полупроводников колеблется от 0,1 до 3 ЭВ. Энергия активации, необходимая для перевода из валентной зоны W_v в свободную (зону проводимости) W_c равна ширине запрещенной зоны ΔW :

$$W_a = \Delta W = W_c - W_v$$

Одновременно с генерацией электронно-дырочных пар происходит и обратный процесс: электроны переходят из зоны проводимости в валентную зону, заполняя дырки, выделяя энергию ΔW . Этот процесс называют *рекомбинацией* носителей заряда.

Между процессами генерации и рекомбинации устанавливается динамическое равновесие.

5.3.2. Примесные полупроводники

При изготовлении большинства полупроводниковых приборов применяют так называемые примесные полупроводниковые материалы.

Чем же отличаются примесный полупроводник от собственного?

В примесном полупроводнике электропроводность в рабочем интервале температур создается за счет свободных носителей заряда примесей. В качестве примесей для германия и кремния применяют элементы 3 и 5 групп таблицы Менделеева.

Если атомы примеси занимают место в узлах кристаллической решетки полупроводника, то их называют *примесями замещения*, а если в междоузлии - *примесями внедрения*. Роль примесей, которые вводятся в объем полупроводника чрезвычайно важна, так как они обеспечивают *примесную электропроводность*. Изменять эту электропроводность можно в широком диапазоне достаточно легко, а это как раз и требуется для обеспечения нормальной работы полупроводникового прибора.

Процесс введения в полупроводник дозированного количества примесей называется легированием.

5.3.3. Доноры и акцепторы

Донором (донорной примесью) - называется примесь способная доставлять электроны в зону проводимости полупроводника.

Акцептором (акцепторной примесью) - называется примесь, способная принимать электроны с уровней валентной зоны полупроводника.

Роль доноров и акцепторов для обеспечения электропроводности полупроводника легче понять, обратившись к рисунку 5.3.

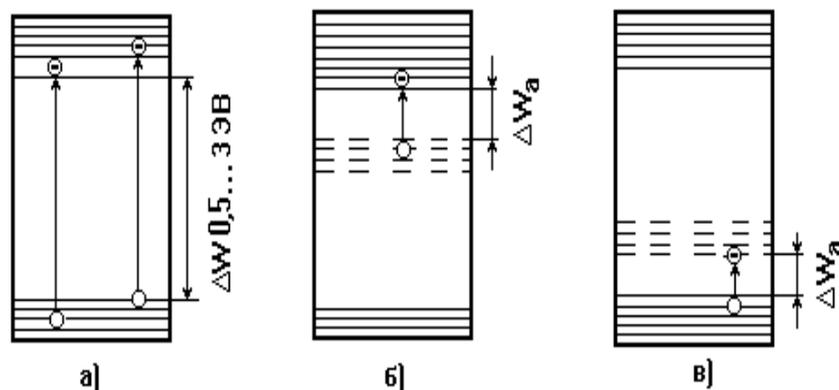


Рис. 5.3. Влияние примесей на энергетическую диаграмму полупроводника: а) - собственный полупроводник; б) - полупроводник с донорной примесью, электропроводность электронная (n - типа); в) - полупроводник с акцепторной примесью, электропроводность дырочная (p - типа).

Энергетические уровни донорной примеси располагаются в запрещенной зоне около “дна” зоны проводимости (рис. 5.3). Энергия активных атомов примеси значительно меньше, чем ширина запрещенного слоя собственного полупроводника. Продолжительные заряды примесных атомов,

возникающие при переходе электронов этих атомов в зону проводимости, не могут блуждать по кристаллу и участвовать в электропроводности. Ввиду этого, проводник с донорной примесью имеет концентрацию электронов, большую, чем концентрацию дырок, появившихся за счет перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Полупроводник, легированный донорной примесью, называется полупроводником “n” - типа (n - negative, т.е. отрицательный) и имеет преимущественно электронную проводимость.

Акцепторные примеси (элементы 3^{ей} группы) имеют свободные электроны зоны атомов, расположенные вблизи “потолка” валентной зоны. Электроны полупроводника, получив извне энергию, большую энергии активации ΔW_a , переходят из валентной зоны на свободные энергетические зоны атомов акцепторной примеси. Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, называют **акцепторами**.

Ввиду разбросности атомов примеси они не участвуют в создании проводимости полупроводника. Полупроводник, легированный акцепторной примесью называется полупроводником “p” - типа (p - positive, т.е. положительный). Такой полупроводник будет иметь концентрацию дырок, большую, чем концентрация электронов, перешедших из валентной зоны в зону проводимости.

Рассмотрим кристаллическую решетку кремния, легированного фосфором (5 группы) (см. рис. 5.4).

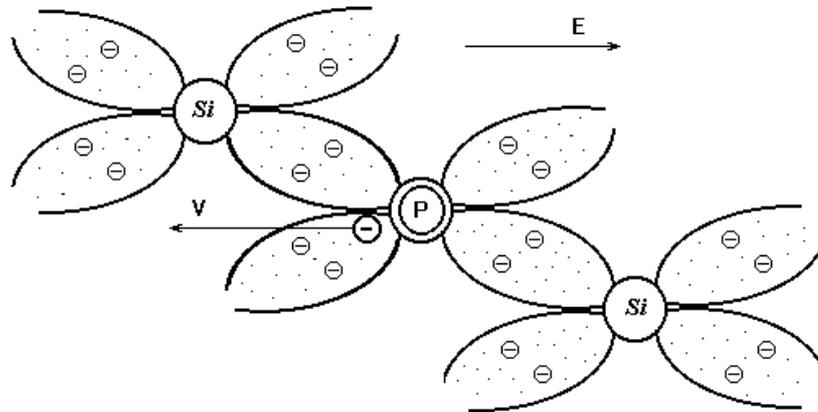


Рис. 5.4. Модель кристаллической решетки кремния “n” - типа.

На внешней орбите фосфора пять электронов; четыре из них участвуют в образовании ковалентных связей с соседними атомами кремния, а пятый будет связан только со своим атомом. Прочность такой связи значительно меньше прочности ковалентной связи. Энергия активации для фосфора $W_a = 0,044$ эВ, а ширина запрещенной зоны кремния $\Delta W = 1,12$ эВ. Следовательно, достаточно небольшого внешнего электрического воздействия для того, чтобы пятый электрон фосфора оторвался от его атома и под действием электрического поля с напряженностью E начала движение со скоростью V . Так обеспечивается электронная проводимость полупроводника “n” - типа. На месте оторвавшегося электрона образуется дырка, которая не

может являться причиной “р” - проводимости кремния, ввиду малой концентрации атомов фосфора, удаленных друг от друга на значительном расстоянии. Теперь рассмотрим случай замещения атомов кремния атомами бора (В) - трехвалентного элемента (см. рис. 5.5).

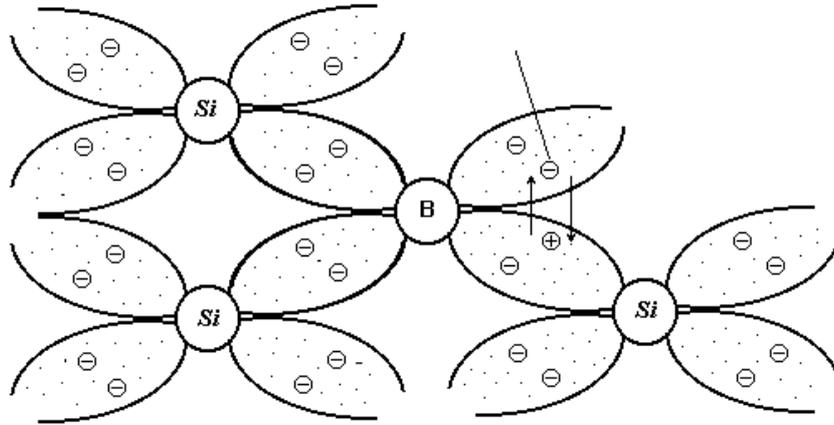


Рис. 5.5. Модель кристаллической решетки кремния “р” - типа

Все три его валентных электрона участвуют в образовании ковалентных связей с атомами кремния, но одна связь остается незаполненной, т.е. образуется дырка. Эту дырку может заполнить электрон соседнего атома кремния, причем для этого потребуется сравнительно малая энергия активации (для бора $\Delta W_a = 0,044$ ЭВ). Приняв на свою орбиту четвертый электрон, атом бора становится отрицательным ионом, а атом кремния, отдавший электрон, положительным ионом. Образовавшиеся ионы связаны кристаллической решеткой и остаются неподвижными. Носителем заряда в данном случае является дырка, а электропроводность полупроводника, легированного акцепторной примесью носит дырочный характер (“р” - типа).

Выводы.

1. Введение примесей приводит к возникновению в полупроводнике *примесной проводимости* за счет ионизации атомов примеси.
2. В отличие от собственной, примесная электропроводность обеспечивается носителями заряда только одного знака (электроны в полупроводнике “п” - типа и дырки в полупроводнике “р” - типа).
3. Возможность управления величиной и характером электропроводности за счет контролируемого процесса легирования необходимых примесей лежит в основе создания всех полупроводниковых приборов.

5.4. Простые полупроводники (см. приложение 2)

5.4.1. Кремний

В свободном состоянии кремний не встречается. Многочисленные соединения кремния входят в большинство горных пород и минералов. Земная кора в своем составе содержит по массе 29,5% кремния. Наиболее распространенным соединением этого элемента является двуокись кремния SiO_2 . В чистом виде кремний впервые был получен в 1811 г. Однако как материал полупроводниковой электроники нашел широкое применение лишь во 2-ой половине XX столетия, после разработки эффективных методов его очистки.

На внешней валентной оболочке кремния находится четыре электрона. Ширина запрещенной зоны для кремния при 20°C составляет 1,12 эВ. Это позволяет создать полупроводниковые приборы на основе кремния с достаточно высокой рабочей температурой - до 125°C . Подвижность носителей заряда μ в слаболегированном кремнии составляет: для электронов - $0,145 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$; для дырок - $0,045 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Кремний темно-серый материал с металлическим блеском, твердый, хрупкий, плотность - 2320 кг/м^3 , температура плавления 1414°C . Легко растворяется в смеси азотной и плавиковой кислот, а также в щелочах. При температурах выше 200°C соединяется с галогенами, образуются галогениды (SiCl_4 , SiJ_4 и др.). При температурах выше 900°C окисляется до оксида кремния SiO_2 . При температурах $1100 \dots 1300^\circ\text{C}$ взаимодействует с азотом и углеродом, образуя нитрид кремния Si_3N_4 и карбид кремния SiC . При температурах выше 2000°C взаимодействует с водородом, образуя соединения под названием силаны (общая формула силанов - $\text{Si}_{2n}\text{H}_{2n+2}$). Кремний хорошо растворяется в расплавленных металлах (алюминии, кальции, олове, золоте, серебре и др.). С рядом металлов образует устойчивые соединения - силициды (молибден, железо, медь, магний и др.). Кремний является основным материалом для изготовления полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, фотоэлементов, тензопреобразователей, интегральных микросхем.

5.4.2. Соединения кремния

Некоторые соединения кремния находят применение при создании полупроводниковых приборов.

Тетрахлорид кремния SiCl_4 - прозрачная бесцветная жидкость - используется в качестве промежуточного продукта при получении поликристаллического кремния. Для получения чистого кремния используют *моносилан кремния* SiH_4 (газ) и *трихлорсилан* SiHCl_3 (бесцветная жидкость).

Двуокись кремния SiO_2 имеет очень низкую химическую активность, температура плавления 1723°C ; растворяется только в плавиковой кислоте и щелочах. В полупроводниковом производстве двуокись кремния применяется в виде тонких пленок на поверхности кремниевых пластин для защиты от воздуха, различных газов, влаги и т.п. Эти пленки выполняют роль диэлектрика для изоляции элементов интегральных микросхем.

Моноокись кремния SiO используют в производстве микросхем в качестве защитного покрытия. Используют ее также в микропленочных конденсаторах.

Нитрид кремния Si_3N_4 - применяется в микроэлектронике в виде защитных пленок. Обладает высокой химической стойкостью. Пленки нитрида по своим свойствам превосходят пленки из двуокиси кремния.

5.4.3. Получение кремния

Исходным сырьем при получении кремния является двуокись кремния SiO_2 - кварцевый песок (кремнезем). Обработывая двуокись кремния углеродсодержащим материалом в электрических печах получают технический кремний семи марок КП-1, ..., КП-7 (кремний поликристаллический, цифры указывают на количество примесей в %). Такой кремний (технический) имеет мелкокристаллическую структуру, содержит от 1 до 5% примесей.

В полупроводниковом производстве преимущественное применение нашел метод водородного восстановления трихлорсилана SiHCl_3 , который получают путем обработки измельченного технического кремния сухим хлористым водородом при температуре 300...400°C:



Трихлорсилан - жидкость с температурой кипения 32°C, которая подвергается тщательной очистке методами экстракции, адсорбции и ректификации.

На рисунке 5.6 изображена схема установки водородного восстановления поликристаллического кремния.

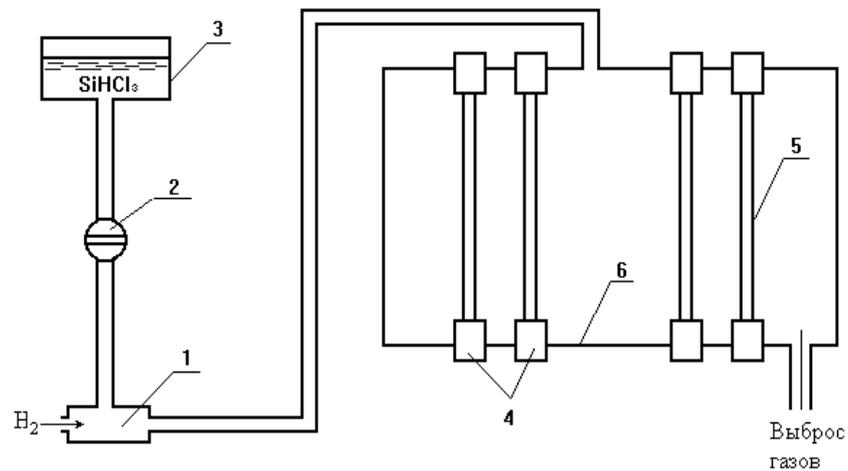


Рис. 5.6. Схема установки для получения кремния:

1 – испаритель-смеситель; 2 - дозатор; 3 - емкость с очищенным трихлорсиланом; 4 - токоподводы, охлаждаемые водой; 5 - кремниевые стержни-затравки; 6 - камера восстановления кремния.

Работа установки:

Пары очищенного хлорсилана через испаритель-смеситель 1 водородом вносятся в камеру восстановления 6. В камере восстановления располагаются тонкие стержни-затравки, нагретые электрическим током до температуры 1250°C . На этих стержнях и идет процесс осаждения чистого поликристаллического кремния в виде стержней диаметром до 100 и более мм.

5.4.4. Очистка кремния

Наличие примесей в техническом кремнии, как уже отмечалось, составляет от 1% до 5%. Наличие примесей резко снижает его удельное сопротивление (см. рис. 5.7).

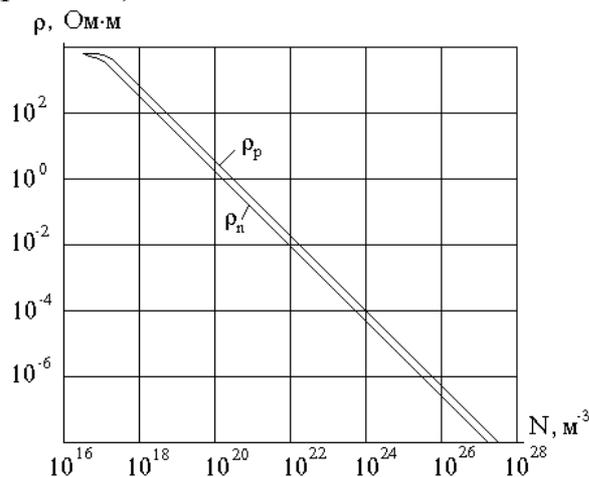


Рис. 5.7. График зависимости удельного сопротивления кремния от концентрации в нем примесей (N - количество атомов примесей в 1 м^3 , ρ_n - удельное сопротивление кремния “n” - типа, ρ_p - удельное сопротивление “p” - типа)

Из этого графика видно, что для получения кремния с удельной проводимостью, близкой к собственной, необходимо снизить содержание примесей в нем до $10^{19} \dots 10^{18}$ атомов на кубический метр.

Очистка кремния успешно решается методом *зонной плавки*. Смысл этого метода в следующем: почти все примеси (за исключением бора) значительно лучше растворяются в жидкой фазе кремния, чем в твердой. Схема установки для очистки кремния от примесей показана на рисунке 5.8.

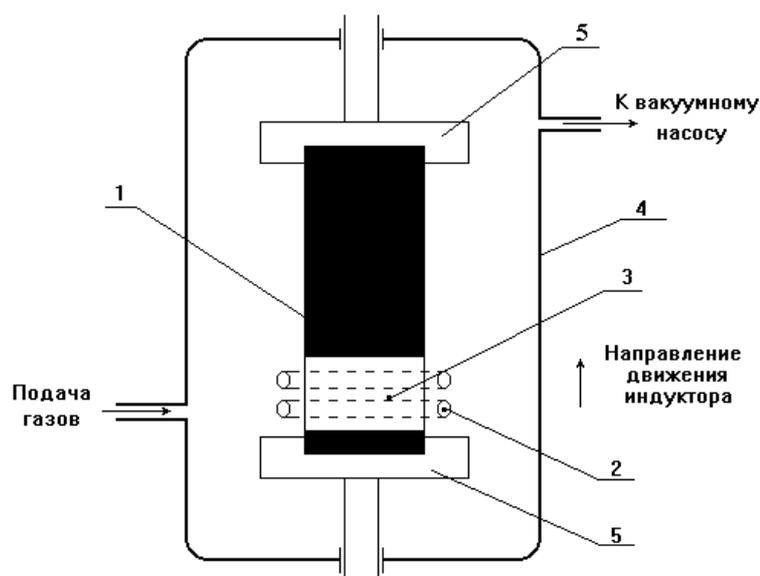


Рис. 5.8. Схема установки для бестигельной зонной плавки:
1 - слиток кремния; 2 - высокочастотный индуктор; 3 - расплавленная зона кремния; 4 - кварцевый корпус; 5 - держатели.

Устройство и работа установки:

Слиток кремния укрепляется в двух держателях (5). Процесс очистки ведется в вакууме, который создается вакуум - насосом, т.к. расплавленный кремний химически очень активен. Корпус (4) выполнен из чистого кварца. Индуктор (2), по которому течет ток высокой частоты, обеспечивает возникновение расплавленной зоны слитка (3). В первый момент начала работы установки индуктор находится в самом нижнем положении. После расплавления слитка в зоне (3), индуктор начинает автоматически двигаться вверх. Следом за индуктором медленно движется и расплавленная зона слитка. При этом нижняя и верхняя части слитка удерживаются от разрыва силами поверхностного натяжения. По мере движения индуктора, расплавленная зона слитка постепенно все в большей степени насыщается примесями. Дойдя до верхнего положения, индуктор останавливается, затем быстро занимает самое нижнее положение. После 15...20 проходов индуктора примеси концентрируются в верхней части слитка, а удельное сопротивление кремния удается довести до 20...30 Ом·м, что соответствует содержанию примесей порядка $10^{19} \dots 10^{20}$ атомов в 1 м^3 . Для очистки от бора зонную плавку ведут в среде водорода, содержащем пары воды, что позволяет еще

на порядок снизить содержание примесей и довести удельное сопротивление кремния до $1,6 \cdot 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Очищенный таким образом поликристаллический кремний служит сырьем для выращивания монокристаллов и эпитаксиальных слоев кремния, а также используется для изготовления некоторых типов полупроводниковых приборов (в том числе и солнечных батарей).

5.4.5. Получение монокристаллического кремния

При получении монокристаллов кремния применяют три метода:

- рассмотренный выше метод бестигельной зонной плавки;
- метод вытягивания из расплава;
- метод гарниссажной плавки.

Выращивание монокристаллов кремния методом *зонной плавки* заключается в следующем.

По окончании процесса очистки слитка кремния перед последним проходом высокочастотного индуктора в нижнюю расплавленную часть слитка автоматически вводят кусок монокристаллического кремния - затравку. По мере подъема индуктора расплавленная зона, сливаясь с затравкой после остывания, кристаллизуясь, повторяет структуру затравки. Таким образом, весь слиток (его очищенная часть) будет иметь монокристаллическую структуру. Монокристаллические слитки кремния, полученные таким образом, имеют диаметр до 100 мм с удельным сопротивлением от 0,001 до 30 Ом·м.

Метод вытягивания из расплава (по фамилии ученого получил название “метод Чохральского”). Суть метода можно понять, обратившись к рисунку 5.9).

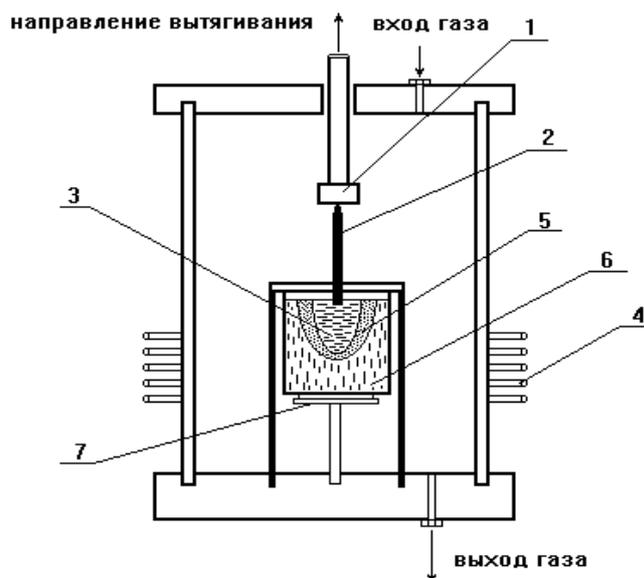


Рис 5.9 Схема установки для выращивания монокристаллов кремния по методу Чохральского: 1 – затравка; 2 – монокристалл; 3 - расплавленный кремний; 4 - высокочастотный индуктор; 5 - тигель из плавленого кварца; 6 - графитовая оболочка; 7 - тепловой экран

Работа установки.

Очищенный поликристаллический кремний за счет высокочастотного индуктора (4) доводится до расплавленного состояния 3 в тигле из особо чистого кварца (5). На штоке в расплав опускают затравку (1) монокристаллического кремния. После оплавления затравки, ее начинают медленно поднимать, одновременно вращая для выравнивания температуры. За затравкой тянется столбик расплава, удерживаемый силами поверхностного натяжения. По мере подъема столбик расплава остывает и кристаллизуется, повторяя структуру затравки. Этот метод позволяет получить монокристаллические слитки кремния диаметром до 150 мм с удельным сопротивлением от $5 \cdot 10^{-5}$ до 0,5 Ом·м.

5.4.6 Метод гарнисажной плавки (см. рис. 5.10)

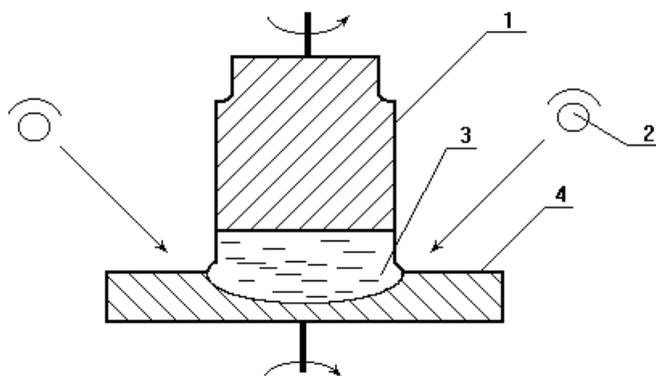


Рис 5.10. Схема установки для выращивания монокристаллов методом гарнисажной плавки: 1 – монокристалл; 2 – электронно-лучевой нагреватель; 3 – расплав; 4 – слиток поликристаллического кремния (очищенного).

При этом методе расплавленную зону кремния создают за счет электронно-лучевого нагревателя. Главное преимущество получения монокристаллического кремния этим методом – большая однородность полученных сплавов, при малом содержании кислорода.

5.5. Германий

Этот элемент открыт немецким физиком К. Винклером в 1886 г. Существование и основные свойства германия предсказал в 1870 Д.И. Менделеев, назвав его экасилицием.

Основные свойства и соединения.

Германий – элемент 4 группы, кристаллизуется в виде кубической решетки с постоянной $a = 0,566$ Нм; количество атомов в единицу объема составляет $4,45 \cdot 10^{28}$ м⁻³. Ширина запрещенной зоны $\Delta W = 0,75$ эВ, поэтому рабочая температура приборов на основе германия не превышает 80°С. Концентрация собственных носителей заряда $-2,5 \cdot 10^{28}$ м⁻³, собственное удельное сопротивление 0,86 Ом·м. Кристаллический германий – твердый

и хрупкий материал с металлическим блеском. Температура плавления - 937°C . Устойчив до $t = 600^{\circ}\text{C}$, выше которой окисляется до двуокиси германия GeO_2 . Хорошо растворяется в смеси соляной и азотной кислот (царской водке), перекиси водорода, в кипящих щелочах. Преимущество германия перед кремнием состоит в том, что даже в расплавленном состоянии он не взаимодействует с углеродом и кварцем. Поэтому тигли для расплавленного германия могут быть изготовлены из этих материалов.

Из соединений практический интерес представляют: двуокись германия (GeO_2), тетрахлорид германия (GeCl_4), тетраиодид германия (GeI_4).

Двуокись германия - порошок белого цвета, используемый в качестве промежуточного продукта при получении германия. В отличие от двуокиси кремния, двуокись германия слабо устойчивое соединение, способное растворяться даже в воде, поэтому его нельзя использовать в качестве защитной пленки. Ввиду этого германий непригоден для производства интегральных микросхем по планарной технологии.

Тетрахлорид германия используется для получения поликристаллического германия и эпитаксиальных слоев. Это соединение представляет собой прозрачную легкоподвижную жидкость с температурой кипения 83°C .

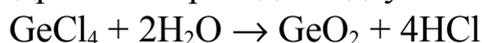
Тетраиодид германия - это вещество желтого цвета, применяется для получения эпитаксиальных слоев.

5.5.1. Получение германия

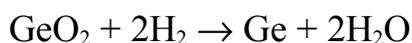
Содержание германия в различных соединениях в земной коре составляет около $7 \cdot 10^{-4}\%$, что примерно равно природным запасам олова и свинца. Получение германия в элементарном виде представляет большие затруднения.

Основными источниками получения германия на промышленной основе являются побочные продукты цинкового производства, коксования угля, а также германиевые концентраты, получаемые из медносвинцовоцинковых руд.

Исходное сырье подвергают химической переработке, в результате которой получают тетрахлорид германия. Эту жидкость тщательно очищают, применяя методы экстракции и ректификации. Очищенный тетрахлорид германия путем гидролиза переводят в двуокись согласно реакции:



Затем двуокись, восстанавливают водородом до получения элементарного германия:



Процесс восстановления ведут в электрических печах в графитовых тиглях при температуре $650 \dots 750^{\circ}\text{C}$. В результате получается порошкообразный германий, после расплавления которого и кристаллизации при остывании, образуется поликристаллический германий.

5.5.2. Очистка германия

Полученный поликристаллический германий имеет слишком большое количество примесей, что делает его непригодным для использования в полупроводниковом производстве. Для получения чистого германия (с проводимостью близкой к собственной) необходимо снизить содержание примесей в нем до 10^{-19} м^{-3} (т.е. 1 атом примесей на миллиард атомов германия). Для очистки германия успешно используют метод зонной плавки. Только в отличие от кремния процесс очистки германия ведут в графитовых тиглях (лодочках). Для получения монокристаллического германия применяют те же методы, что и для кремния: метод зонной плавки и метод Чохральского. Для получения эпитаксиальных германиевых пленок широко используют восстановление тетрахлорида германия водородом. В качестве акцепторов в германии используют галлий, индий, алюминий, в качестве доноров - мышьяк, сурьму, висмут, фосфор.

Промышленность выпускает много марок германия с электронным и дырочным типом электропроводимости, легированных различными примесями с величиной удельного сопротивления в пределах $0,0001 \dots 45 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

5.5.3. Применение германия

На основе германия производится широкая номенклатура полупроводниковых приборов самого различного назначения. В первую очередь следует к ним отнести диоды и транзисторы. Особенно широкое распространение получили выпрямительные плоскостные диоды, рассчитанные на токи от 0,3 до 1000 А и сплавные биполярные транзисторы. Германиевые транзисторы могут быть низкочастотными и высокочастотными, мощными и маломощными.

Использование пленочной изоляции из SiO_2 позволяет изготавливать германиевые транзисторы по планарной технологии.

Германий используют для изготовления лавинно-пролетных и туннельных диодов, варикапов, точечных высокочастотных, импульсных и СВЧ-диодов.

Благодаря относительно высокой подвижности носителей заряда германий применяют для изготовления датчиков Холла и других магниточувствительных приборов. Оптические свойства германия позволяют использовать его для изготовления фототранзисторов, фотодиодов, оптических линз для инфракрасного излучения, оптических фильтров, счетчиков ядерных частиц.

Существенным недостатком германиевых приборов является невысокий верхний предел рабочей температуры 70°C .

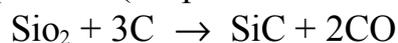
5.6. Сложные полупроводниковые материалы (см. приложение 3)

Бурное развитие электроники вызвало к жизни создание многочисленного класса химических соединений, обладающих свойствами полупроводников и имеющих очень широкий диапазон электрофизических свойств при этом. Наиболее распространенные полупроводниковые соединения приводятся ниже.

5.6.1. Карбид кремния

Это соединения типа A^4B^4 , т.е. соединение двух полупроводниковых элементов 4 группы: кремния и углерода - SiC. По типу химической связи карбид кремния относится к ковалентным кристаллам.

Технический карбид кремния получают в электрических печах при восстановлении двуокиси кремния (кварцевого песка) углеродом:



При температуре до 2000°C - образуется кубическая кристаллическая решетка этого соединения, а при температуре больше 2000°C - гексагональная. Кристаллы SiC полупроводниковой чистоты получают при $t = 2400 \dots 2600^\circ\text{C}$ в атмосфере аргона.

После окончания процесса и остывания печи из нее извлекают сросшиеся пакеты кристаллов SiC, называемые **друзами**. Некоторые из кристаллов достигают размеров $1,5 \dots 2 \text{ см}^3$. Друзы подвергают размолу на специальных мельницах, после чего размеры зерен колеблются от 40 до 300 мкм. Тип электропроводности и окраска кристаллов SiC зависят от процентного соотношения кремния и углерода в соединении, а также от нахождения в нем примесей.

Электропроводность карбида кремния зависит от размера зерен, степени сжатия зерен, напряженности электрического поля, температуры.

Из зерен карбида кремния делают нелинейные резисторы - **варисторы**. В качестве связующих веществ, которые служат для скрепления зерен SiC используют глину, фарфоровую массу, жидкое стекло, кремнийорганические лаки и др. Материал на основе SiC с глиняной связкой получил название - **тирит**, со связкой из жидкого стекла - **вилит**. Варисторы нашли широкое применение в автоматике, вычислительной технике, электроприборостроении. В качестве примеров использования карбида кремния рассмотрим применение его при изготовлении вентильных разрядников и в качестве нагревателей в электрических печах.

Вентильный разрядник - устройство, предназначенное для защиты электроустановок от атмосферных перенапряжений (см. рис. 5.11.).

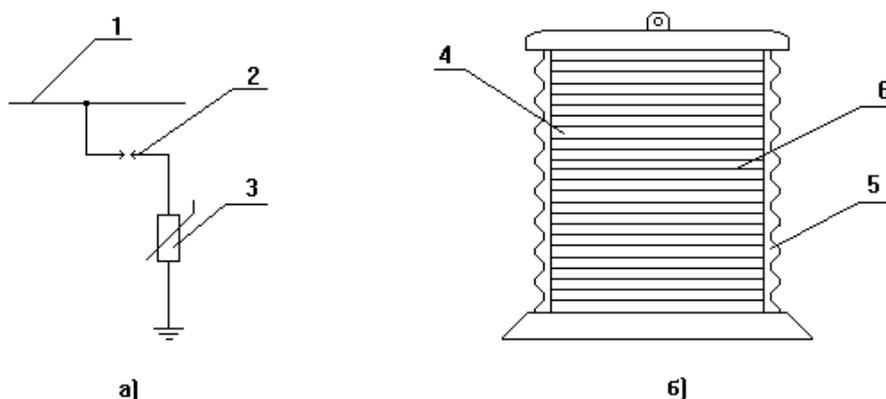


Рис. 5.11. Принципиальная схема (а) и внешний вид вентильного разрядника (б): 1 - защищаемый объект; 2 - внешний искровой промежуток; 3 - разрядник; 4 - внутренний искровой промежуток; 5 - фарфоровый корпус; 6 - вилитовые диски.

Работа разрядника: при перенапряжении на защищаемом объекте (ЛЭП, трансформаторных станциях) пробивается внешний, а затем внутренний искровые промежутки; диски из вилита под действием высокого напряжения уменьшают свое сопротивление. Через разрядник течет импульсный ток в течение доли микросекунд. Напряжения на разряднике резко падает, после чего вилитовые диски восстанавливают свое сопротивление. Установка остается под рабочим напряжением.

Нагреватели для электрических печей изготавливают в виде силитовых стержней, которые представляют собой материал на основе карбида кремния, кристаллического кремния и углерода. Плотность силита - 3200 кг/м^3 , он имеет очень незначительный коэффициент линейного расширения. Для нагревателей выпускают силит с удельным сопротивлением от 0,001 до 0,1 Ом·м. Силитовые стержни при прохождении по ним электрического тока нагреваются до температуры порядка 1500°C . Срок службы таких нагревателей от сотни до тысячи часов.

Примеси элементов пятой группы N, P, As, Sb, Bi, Fe в карбиде дают зеленую окраску и электропроводность “n”-типа. Элементы второй группы (Ca, Mg) и третьей группы (B, Al, Ga, In) - голубую и фиолетовую окраску и электропроводимость “p”-типа.

Особенностью карбида кремния является его способность к *люминесценции*. Изменяя состав примесей, в нем можно получить свечение любой цветности излучения - от красного до фиолетового. Это свойство карбида кремния используется при создании на его основе светодиодов. Однако из SiC - светодиоды обладают низкой эффективностью преобразования электрической энергии в световую, но зато они имеют стабильные характеристики. Последнее обстоятельство позволяет использовать SiC - светодиоды в качестве световых эталонов и опорных источников света.

Кроме указанных выше вариантов применения карбида кремния, он также используется для изготовления: мощных выпрямительных диодов,

высокотемпературных тензорезисторов, счетчиков ядерных частиц для агрессивных сред, полевых транзисторов, СВЧ - диодов.

5.6.2. Полупроводниковые соединения типа A^3B^5 (см. приложение 3)

Являясь ближайшими электронными аналогами кремния и германия, такие соединения образуются при соединении элементов 5 группы N, P, As, Sb, Bi с элементами 3 группы (B, Al, Ga, In). Классифицируют эти соединения по содержащему в них металлоидному элементу, поэтому существуют нитриды, фосфиды, арсениды, антимониды.

Для нитридов характерна кристаллическая решетка гексагонального типа. Все другие соединения A^3B^5 имеют кристаллы кубического типа. Основным методом получения соединений A^3B^5 - непосредственное взаимодействие элементов в вакууме или в среде инертного газа при температуре от 150 до 500°C.

Точки появления этих соединений лежат выше соответствующих температур отдельных элементов, за исключением антимонида индия, температура плавления которого 525°C. т.е. лежит между температурами плавления сурьмы (630°C) и индия (157°C).

С увеличением атомной массы соединения уменьшается ширина его запрещенной зоны, происходит так называемое "размыwanie электронных облаков" ковалентных связей, которые все более приближаются к металлическим связям.

С уменьшением ширины запрещенной зоны в пределах каждой группы соединений, наблюдается закономерный рост подвижности носителей зарядов, более значительный для электронов чем для дырок.

Для соединений A^3B^5 характерен особый вид химической связи, называемой *донорно-акцепторной*. Из четырех ковалентных связей каждого атома кристаллической решетки, три образуются за счет обобществления валентных электронов атомов A^3 и B^5 , а четвертая связь образуется двумя валентными электронами атомов элементов 5 группы (B^5).

Широкое практическое применение в полупроводниковой технике из соединений A^3B^5 нашли антимонид индия, арсенид галлия, фосфид галлия.

Антимонид индия - InSb получают методом сплавления высокочистых индия и сурьмы. Полученный материал подвергают очистке зонной плавкой, после чего монокристаллический антимонид индия выращивают по методу вытягивания из расплава. InSb имеет малую ширину запрещенной зоны, равную 0,18 эВ, поэтому даже при комнатной температуре проявляет собственную электропроводность. Его отличает очень высокая подвижность электронов ($10 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$), т.е. в десятки раз превосходит по этому показателю и германий и кремний.

Применяется для изготовления фотоэлементов высокой чувствительности, датчиков Холла, оптических фильтров.

Фосфид галлия - GaP обладает широкой запрещенной зоной (2,3 эВ). Используется для изготовления светодиодов с красным и зеленым свечением.

Арсенид галлия - GaAs является одним из самых перспективных полупроводниковых соединений. Ширина запрещенной зоны 1,43 эВ. Обладает большей подвижностью электронов, чем у кремния и германия. Донорными примесями для GaAs являются сера, селен, теллур, акцепторными - цинк, кадмий, медь.

Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия допускают рабочую температуру до 450 °С, т.е. превосходят кремниевые, а по частотным характеристикам превосходят германиевые.

Из арсенида галлия изготавливают фотоэлементы с КПД около 7%, дозиметры рентгеновского излучения, полупроводниковые лазеры, туннельные диоды.

Прогресс в технологии арсенида галлия открыл широкие перспективы применения его для создания полевых транзисторов и быстродействующих интегральных микросхем.

Полупроводниковые соединения типа A²B⁴

Наибольшее применение из этих соединений нашли сульфиды, селениды, теллуриды.

Являясь алмазоподобными полупроводниками, соединения типа A²B⁴ кристаллизуются в структуры кубического и гексагонального типа. В этих соединениях по сравнению с полупроводниками типа A³B⁵ сильнее выражена ионная составляющая химической связи. Это обстоятельство обуславливает большое значение ширины запрещенной зоны и снижение подвижности зарядов. При повышенных температурах все соединения этого типа разлагаются в соответствии с реакцией:



Многие из полупроводников типа A²B⁴ проявляют электропроводность одного типа. Так сульфиды и селениды цинка, кадмия и ртути всегда являются полупроводниками “n” - типа, теллурид цинка обладает только дырочной проводимостью. И только теллуриды кадмия и ртути могут иметь электропроводность как “n” - типа, так и “p” - типа.

Проводимость соединений A²B⁴ может быть значительно изменена (на несколько порядков) путем термообработки в парах собственных компонентов.

Из всех соединений типа A²B⁴ по масштабам применения следует выделить сульфид цинка и сульфид кадмия.

Сульфид цинка является основой для получения многих люминофоров. В зависимости от условий синтеза ZnS кристаллизуется в двух модификациях: кубической ($t < 1000^\circ\text{C}$) и гексагональной ($t > 1000^\circ\text{C}$). Люминофоры с кубической структурой имеют повышенную яркость свечения. Спектр излучения люминофоров определяется типом вводимых активаторов люминесценции. Наибольшее распространение получили электролюминофоры, активированные медью, излучающие в зеленой и голубой областях спектра.

Сульфид кадмия используется при изготовлении фоторезисторов, обладающих высокой чувствительностью в видимой части спектра.

Селениды - селенистый свинец (PbSe), селенистый висмут (Bi₂Se), селенистый кадмий (CdSe) - применяют для изготовления фоторезисторов,

полупроводниковых термоэлементов, лазеров (источников когерентного излучения).

Теллуриды - теллуристый свинец (PbTe), теллуристый висмут (BiTe), теллуристая ртуть (HgTe) так же, как сульфиды и селениды, находят применение в фоторезисторах, термоэлементах, излучательных приборах.

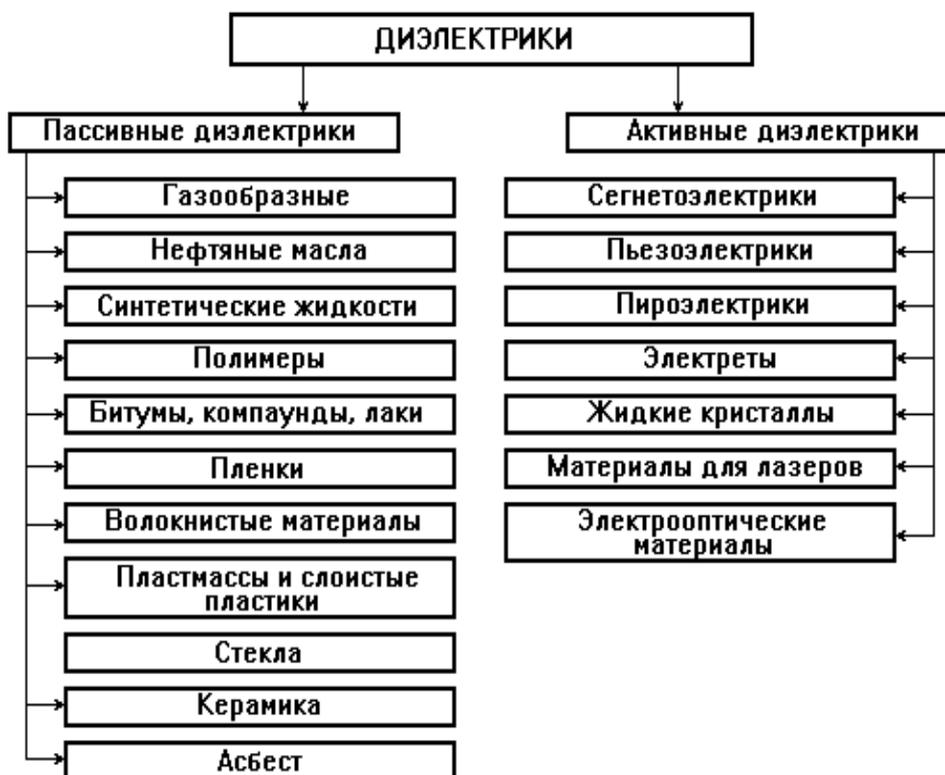
Итак, подводя итог разделу 5, следует указать на некоторые моменты, относящиеся к полупроводниковым материалам:

1. К полупроводникам относится большое количество веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых находится между значениями этого показателя проводников и диэлектриков.
2. Основная особенность полупроводников – способность их к изменению своих свойств под влиянием различных внешних воздействий (температуры, электрического и магнитного полей, давления и др.).
3. В отличие от металлов полупроводники имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления.
4. Свойства полупроводников очень сильно зависят от вводимых примесей, которые изменяют не только значение проводимости, но и характер ее температурной зависимости.
5. Сильная зависимость полупроводников от наличия в них примесей, жесткие требования чистоты и структурного совершенства кристаллов явились одной из главных причин того, что более 100 лет потенциальные возможности полупроводников не использовались.
6. Бурное развитие полупроводниковая электроника получила после изобретения транзистора в 1948 году.
7. Фундаментальные исследования в области физики полупроводников дали мощный импульс к массовому их применению и коренному преобразованию в радиотехнике, кибернетике, автоматике, телемеханике. Совершенствование полупроводниковых технологий позволило решить задачу микро миниатюризации электронной аппаратуры.
8. Состояние теории полупроводников в настоящее время достигло такого уровня, при котором появилась возможность целенаправленно управлять свойствами материалов и приборов на их основе.

6. Диэлектрические материалы

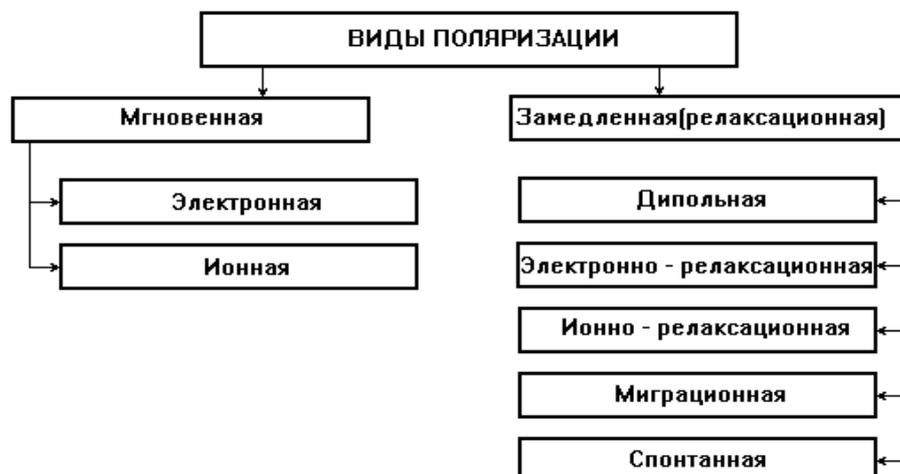
6.1. Классификация и физические процессы в диэлектриках

6.1.1. Классификация диэлектрических материалов (диэлектриков)



6.1.2. Поляризация диэлектриков

Поляризация - это процесс воздействия внешнего электрического поля на связанные заряды диэлектрика, в результате которого происходит смещение зарядов в направлении вектора напряженности поля E .



Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и представляет собой смещение центра заряда электронных оболочек атома относительно положительно заряженного его ядра под действием внешнего электрического поля.

Такая поляризация происходит практически мгновенно (около 10^{-15} с), не зависит от частоты поля, температуры и не связана с потерей энергии.

Ионная поляризация характерна для твердых диэлектриков с ионным строением и обусловлена смещением связанных ионов под действием внешнего электрического поля. Процесс смещения ионов происходит практически мгновенно (10^{-13} с), без затрат энергии. С повышением температуры интенсивность ионной поляризации увеличивается, вследствие ослабления сил связи между ионами.

Дипольная поляризация под действием внешнего электрического поля происходит у диэлектриков, состоящих из полярных (дипольных) молекул. Характерной особенностью для дипольной молекулы является смещение центров положительных и отрицательных зарядов в ней на некоторое расстояние (l) рис.6.1.

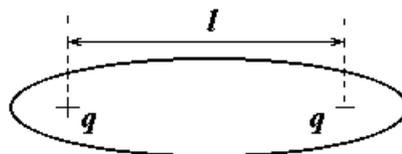


Рис. 6.1. Схема дипольной молекулы

Дипольный момент такой молекулы равен: $\mu = q \cdot l$, Кл·м

где q - значение заряда;

l - расстояние между зарядами.

Дипольные молекулы диэлектрика находятся в хаотическом тепловом движении. Дипольная поляризация происходит если силы межмолекулярных связей не препятствуют ориентации дипольных молекул (диполей) вдоль магнитных силовых линий поля.

Схематическое изображение дипольной поляризации приведено на рис. 6.2.

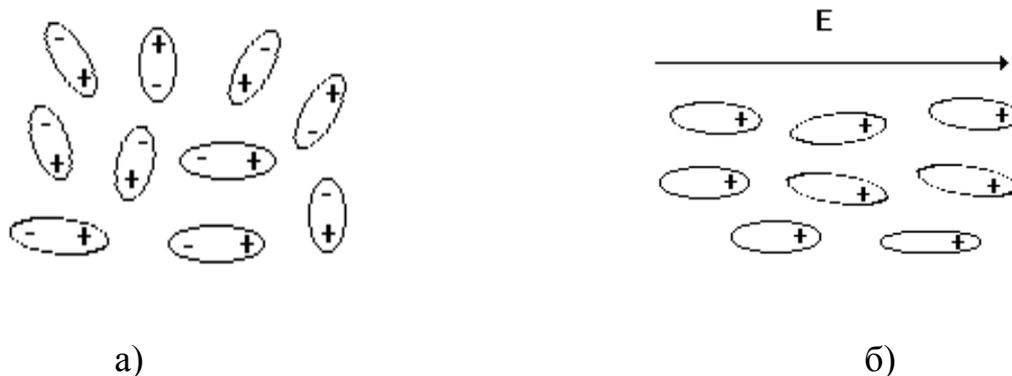


Рис. 6.2. Расположение дипольных молекул: а) при отсутствии электрического поля; б) при воздействии электрического поля.

Ориентация диполей в направлении поля требует затрат энергии на преодоление сопротивления среды. Этот вид поляризации характерен для полярных газов и жидкостей, а также для твердых полярных органических веществ. В твердых полярных диэлектриках поляризация обуславливается не поворотом самой молекулы, а поворотом имеющихся в ней радикалов по отношению к молекуле. Так поляризация целлюлозы объясняется наличием в ее молекулах гидроксильных групп ОН и кислорода. При исчезновении внешнего поля степень поляризованности вещества исчезает, но не мгновенно, а по экспоненциальному закону.

Промежуток времени, в течение которого поляризованность диэлектрика после исчезновения поля уменьшается вследствие теплового движения молекул в $\epsilon \approx 2,72$ раза от первоначальной, называется **временем релаксации**.

Для дипольной поляризации это время (t) лежит в пределах от 10^{-6} по 10^{-10} с, поэтому дипольная поляризация проявляется на частотах ниже $10^6 \dots 10^{10}$ Гц.

Электронно - релаксационная поляризация характерна для диэлектриков с электронной электропроводимостью и возникает за счет возбуждения тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок.

Ионно - релаксационная поляризация наблюдается в неорганических кристаллических диэлектриках с ионной структурой с неплотной упаковкой ионов. Этот вид поляризации обусловлен смещением слабо связанных ионов веществ под влиянием внешнего поля.

Миграционная поляризация проявляется в твердых диэлектриках неоднородной структуры на низких частотах и связана со значительными потерями электрической энергии. Причины проявления этой поляризации: наличие в диэлектриках проводящих и полупроводящих включений и слоев с различной проводимостью.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация существует у группы твердых диэлектриков, обладающих такими же особенностями поляризации, как и сегнетова соль ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Эта группа диэлектриков получила название сегнетоэлектриков. Сегнетоэлектрики имеют доменную структуру. Домены - макроскопические области, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией. Электрические моменты отдельных доменов имеют разную направленность, поэтому суммарная поляризованность образца диэлектрика равна нулю. Внешнее электрическое поле заставляет моменты доменов ориентироваться по направлению поля, что создает эффект сильной поляризации сегнетоэлектрика.

6.1.3. Классификация диэлектриков по виду поляризации

Все диэлектрики по виду поляризации подразделяются на четыре группы:

Первая - **неполярные** диэлектрики, обладающие преимущественно электронной поляризацией. К ним относятся полистирол, полиэтилен, политетрафторэтилен, неполярные и слабополярные жидкости и газы (бензол, водород, воздух).

Вторая - **полярные** (дипольные) органические, полужидкие и твердые материалы (поливинилхлорид, эпоксидные смолы, лавсан, оргстекло, масляно-канифольные компаунды и др.)

Третья - **твердые неорганические** диэлектрики, обладающие электронной, ионной и электронно-ионно-релаксационной поляризациями. В этой группе диэлектриков выделяют две подгруппы материалов, обладающих различными электрическими характеристиками:

- диэлектрики с электронной и ионной поляризациями (кварц, корунд (Al_2O_3), рутил (TiO_2) и др.)

- диэлектрики с электронной, ионной и релаксационными поляризациями (неорганические стекла, керамические материалы).

Четвертая - **сегнетоэлектрики**, обладающие спонтанной, электронной, ионной и электронно-ионно-релаксационной поляризациями (сегнетова соль, титанат бария и др.).

6.1.4. Электрические свойства диэлектриков

6.1.4.1. Диэлектрическая проницаемость

Любой диэлектрик, внесенный в зону действия электрического поля, может рассматриваться как конденсатор определенной емкости. При этом заряд такого конденсатора:

$$Q = Q_0 + Q_g \quad (6.1)$$

где Q_0 - заряд на электродах конденсатора, если электроды разделял бы вакуум;

Q_g - заряд, обусловленный процессом поляризации диэлектрика.

Одна из важнейших характеристик диэлектрика - **относительная диэлектрическая проницаемость** (в дальнейшем диэлектрическая проницаемость) ϵ_r - это отношение заряда Q при некотором напряжении на конденсаторе, изготовленном из данного диэлектрика к заряду Q_0 , который образуется в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами был вакуум:

$$\epsilon_r = Q/Q_0 = (Q_0 + Q_g)/Q_0 = 1 + Q_g/Q_0 \quad (6.2)$$

Из выражения (6.2) следует, что диэлектрическая проницаемость для вакуума равна единице, а для любого вещества - всегда больше единицы. Для газообразных диэлектриков, имеющих малые плотности и большие расстояния, диэлектрическая проницаемость близка к единице и зависит от радиуса молекулы (см. табл. 6.1).

Таблица 6.1

Газ	Размер молекулы, нм	Диэлектрическая проницаемость, ϵ
Водород	0,135	1,00027
Аргон	0,183	1,00056
Углекислый газ	0,230	1,00096
Этилен	0,278	1,00138

С увеличением давления газа, его диэлектрическая проницаемость несколько увеличивается, а при увеличении температуры - уменьшается.

Для неполярных жидких диэлектриков значение диэлектрической проницаемости не превышает 2,5. Для полярных жидкостей значение диэлектрической проницаемости лежит в пределах от 3 до 5,5.

6.1.4.2. Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость твердых материалов зависит от их структурных особенностей. Для неполярных твердых диэлектриков значение ϵ при $t = 20^\circ\text{C}$ колеблется от 2 до 6. Например, для парафина - 1,9...2,2, для полистирола - 2,4...2,6, для алмаза - 5,6...5,8. Для неорганических стекол ϵ изменяется в пределах от 4 до 20; для ионных кристаллов: каменной соли - 6, корунда - 10, рутила - 110, титаната кальция - 150.

6.1.4.3. Электропроводность диэлектриков. Основные понятия

Через диэлектрик, находящийся под напряжением течет ток, именуемый *током утечки*, который равен сумме абсорбционного тока и сквозного тока:

$$i_{\text{ут}} = i_{\text{абс}} + i_{\text{скв}} \quad (\text{см. рис. 6.3})$$

Абсорбционный ток ($i_{\text{абс}}$) (ток смещения) обусловлен поляризационными процессами, происходящими в объеме диэлектрика.

При постоянном напряжении абсорбционный ток течет через диэлектрик в периоды включения и отключения напряжения. При переменном напряжении абсорбционный ток имеет место в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Сквозной ток ($i_{\text{скв.}}$) вызван наличием в диэлектрике небольшого числа свободных зарядов.

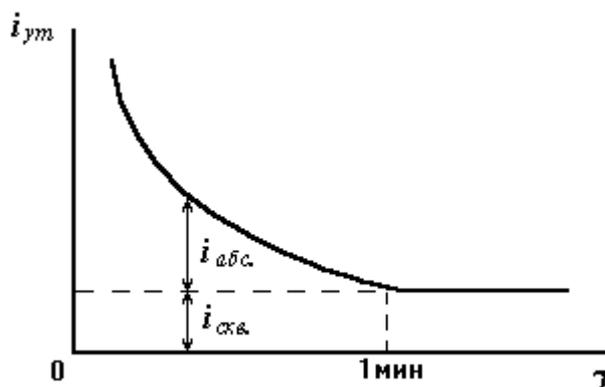


Рис. 6.3. Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени

Сопротивление изоляции материала определяется из выражения:

$$R_{\text{из.}} = U / (i_{\text{ут.}} - i_{\text{абс.}}) = U / i_{\text{скв.}}$$

При измерении сопротивления диэлектрика ($R_{\text{из.}}$) используют мегаомметр, снимая его показания через 1 мин. после подачи напряжения на измеряемый объект.

Для количественной оценки объемной и поверхностной проводимости диэлектрика вводятся понятия:

- удельного объемного сопротивления - ρ_v ;
- и удельного поверхностного сопротивления - ρ_s .

В системе СИ удельное объемное сопротивление (ρ_v) равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно выделенного из данного диэлектрика, если ток проходит сквозь объем куба от одной его грани к противоположной.

Для образца диэлектрика, находящегося в однородном поле, удельное объемное сопротивление:

$$\rho_v = R \cdot \frac{S}{h}, \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

где: R - объемное сопротивление образца материала, Ом;

S - площадь электрода, м^2 ;

h - расстояние между электродами (толщина образца), м.

Удельное поверхностное сопротивление диэлектрика (ρ_s) численно равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности данного диэлектрика при прохождении тока через квадрат от одной его стороны к противоположной (см. рис. 6.4).

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{d}{l}, \text{ Ом}$$

где R_s - поверхностное сопротивление образца материала между параллельными электродами шириной d , отстоящими друг от друга на расстоянии l .

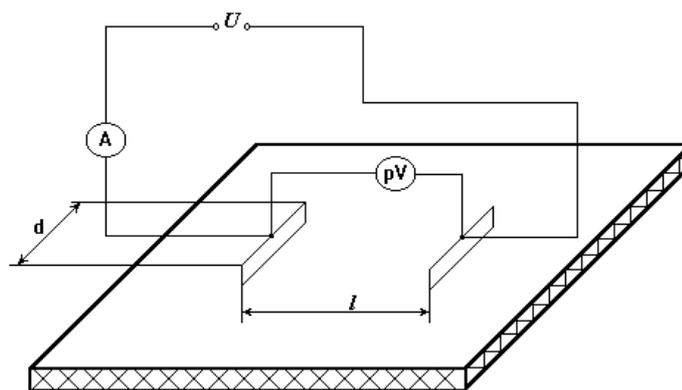


Рис. 6.4. Определение удельного поверхностного сопротивления диэлектрика

По удельному объемному сопротивлению можно определить удельную объемную проводимость:

$$\gamma_v = 1/\rho_v$$

и соответственно удельную поверхностную проводимость:

$$\gamma_s = 1/\rho_s$$

Полная проводимость твердого диэлектрика равна сумме объемной и поверхностной проводимостей и измеряется в сименсах $1\text{См} = 1/\text{Ом}$.

6.1.4.4. Электропроводность газов

При небольших значениях напряженности электрического поля газы обладают исключительно малой проводимостью. Возникновение тока в газе может произойти только при наличии в нем ионов или свободных электронов, т.е. при ионизации газа. Ионизация, т.е. процесс превращения нейтральных молекул газа в ионы (положительные или отрицательные) может произойти под влиянием внешних факторов.

Электропроводность газа, вызванная внешними факторами, называется **несамостоятельной**.

Образование ионов в газе может произойти в результате так называемой ударной ионизации, которая возникает в результате соударения электрона (движущегося под действием электрического поля) с нейтральной молекулой газа. При условии, когда кинетическая энергия движущегося электрона достаточно велика, чтобы расщепить нейтральную молекулу, образуются положительные и отрицательные ионы в объеме газа. Одновременно с ионизацией в газе идет процесс восстановления нейтральных молекул, т.е. идет **рекомбинация**.

Именно процесс рекомбинации препятствует неограниченному росту числа ионов в газе; благодаря чему устанавливается определенная концентрация ионов.

Электропроводность газа, вызванная ударной ионизацией, получила наименование самостоятельной.

На рис. 6.5 изображена характерная для газообразных диэлектриков зависимость тока от напряжения.

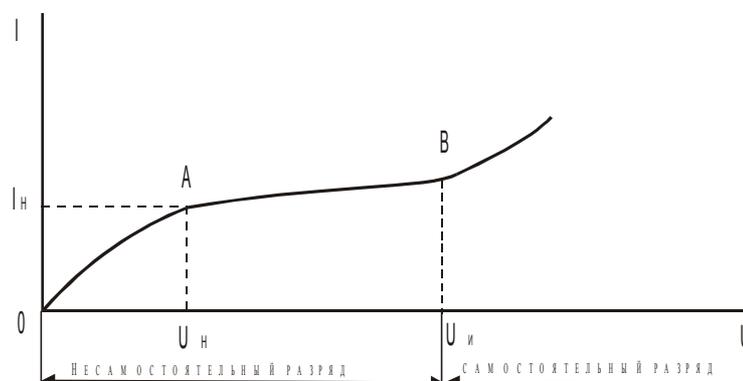


Рис. 6.5. Зависимость тока в газе от напряжения

На участке кривой OA ток растет пропорционально напряжению, согласно закону Ома. В районе точки A, соответствующем напряжению насыщения (U_n) все создаваемые в газовом промежутке ионы будут достигать электродов. При этом дальнейшее увеличение напряжения не вызовет увеличения тока в газе. Ток остается постоянным до возникновения ударной ионизации (т. B). При напряжении большем, чем U_n (напряжение ионизации) ток резко возрастает с увеличением напряжения (рис. 6.5).

Для воздуха напряженность поля, при которой начинается ионизация $E_n \approx 10^5 \dots 10^6$ В/м.

6.1.4.5. Электропроводность жидкостей

Ток в жидкости обуславливается движением ионов и заряженных коллоидных частиц. Невозможность полного удаления способных к диссоциации примесей из жидкого диэлектрика затрудняет получение электроизоляционных жидкостей с малым значением удельной проводимости.

Полярные жидкости всегда имеют повышенную проводимость по сравнению с неполярными, причем возрастание диэлектрической проницаемости приводит к росту проводимости.

Сильно полярные жидкости имеют настолько высокую проводимость, что рассматриваются уже как проводники с ионной электропроводностью.

Очистка жидких диэлектриков от примесей заметно повышает их удельное сопротивление.

С увеличением температуры возрастает подвижность электронов, увеличивается степень тепловой диссоциации, в результате чего проводимость повышается.

Температурная зависимость удельной проводимости жидких диэлектриков выражается следующей формулой:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \exp \alpha t$$

где: γ_0 - удельная проводимость при $t = 20^\circ\text{C}$;
 α - постоянная величина для данной жидкости;
 t - температура, $^\circ\text{C}$.

6.1.4.6. Электропроводность твердых диэлектриков

Электропроводность твердых диэлектрических материалов обуславливается передвижением:

- ⇒ ионов самого диэлектрика;
- ⇒ ионов примесей;
- наличием свободных электронов.

При низких температурах передвигаются слабозакрепленные ионы, в частности, ионы примесей. При высоких температурах освобождаются и некоторые ионы из узлов кристаллической решетки. В диэлектриках с атомной или молекулярной решетками удельная проводимость весьма мала; проводимость в таких диэлектриках связана с наличием примесей.

В материалах кристаллического строения с ионной решеткой, электропроводность связана с валентностью ионов: кристаллы с одновалентными ионами обладают большей проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. Так для кристалла NaCl проводимость значительно выше, чем для кристаллов MgO или Al₂O₃.

В кристаллах проводимость неодинакова по разным осям кристалла. Так, проводимость кварца в направлении, параллельном главной оси примерно в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном этой оси.

Удельная проводимость аморфных материалов одинакова во всех направлениях и обусловлена составом материала и наличием примесей. Органические неполярные аморфные диэлектрики, например полистирол, отличаются очень малой удельной проводимостью.

Электропроводность стекол связана с химическим составом. Кварцевое стекло и плавленый борный ангидрид обладают весьма малой удельной проводимостью; введение в состав стекол оксидов щелочных металлов первой группы сильно увеличивают удельную проводимость; введение тяжелых оксидов (оксидов бария или свинца) приводит к значительному снижению удельной проводимости.

Удельное объемное сопротивление ридиофарфора, содержащего оксид бария выше, чем у электротехнического фарфора.

Наличие влаги в твердых пористых диэлектриках резко увеличивает удельную проводимость.

При больших напряженностях электрического поля в кристаллических диэлектрических материалах появляется электронный ток, быстро возрастающий с увеличением напряженности поля. Это ведет к увеличению проводимости.

6.1.5. Пробой диэлектриков

*** Общая характеристика явления пробоя.**

Пробоем диэлектрика называется явление, приводящее к потере диэлектриком его электроизоляционных свойств.

Значения напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика называется **пробивным напряжением**, а соответствующее значение напряженности поля - **электрической прочностью** диэлектрика.

Электрическая прочность определяется пробивным напряжением, отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{пр.} = U_{пр.}/h, \quad \text{мВ/м} \quad (6.12)$$

где: h - толщина диэлектрика, м.

$$1 \frac{\text{мВ}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}} = 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Пробой газов обуславливается явлением ударной и фотонной ионизации.

Пробой жидких диэлектриков происходит в результате ионизационных и тепловых процессов.

Пробой твердых диэлектриков вызывается электрическими и тепловыми процессами, возникающими под действием электрического поля.

*** Пробой газов.**

Небольшое число положительных и отрицательных ионов и электронов, содержащихся в газообразном диэлектрике, а также нейтральные молекулы находятся в беспорядочном тепловом движении. При воздействии внешнего электрического поля на газ заряженные частицы начинают движение в направлении поля или противоположном в зависимости от знака заряда частицы. При этом заряженная частица приобретает дополнительную энергию:

$$W = q \cdot U_{\lambda} \quad (6.13)$$

где: q - величина заряда частицы;

U_{λ} - напряжение на длине свободного пробега λ .

При однородном поле можно принять:

$$U_{\lambda} = E \cdot \lambda \quad (6.14)$$

где: E - напряженность поля;

λ - длина свободного пробега.

Тогда:

$$W = E \cdot q \cdot \lambda \quad (6.15)$$

Эта энергия движущейся частицы сообщается молекулам газа. Если энергия W больше энергии ионизации молекулы $W_{и}$, то молекула ионизируется, т.е. расщепляется на электрон и положительный ион. Условием ионизации является неравенство: $W > W_{и}$.

Энергия ионизации газа характеризуется ионизационным потенциалом:

$$U_{и} = W_{и} / q \quad (6.16)$$

Ионизационный потенциал большинства газов составляет от 4 до 25 В, что соответствует энергии ионизации 4...25 эВ.

При данных значениях давления газа и температуры ударная ионизация начинается при определенной напряженности поля, т.к. q и λ постоянные величины для каждого газа. Напряженность поля, при которой начинается ионизация газа называется **начальной напряженностью**.

При ионизации воздуха образуются положительные ионы:



Скорость электрона (км/с), прошедшего без столкновения с молекулой разность потенциалов U (Вольт), определяется выражением: $v \approx 600 \cdot \sqrt{U}$.

Подставив в формулу значение ионизационного потенциала для различных газов убеждаемся в том, что электрон ионизирует (расщепляет) газовые молекулы при скорости его движения свыше 1000 км/с.

В некоторых случаях разогнанный полем электрон при столкновении не ионизирует молекулу, а приводит ее в т.н. возбужденное состояние. Такая возбужденная молекула отдает свою избыточную энергию в форме излучения - испускает фотон.

Фотон, поглощаемый другой молекулой, может ионизировать эту молекулу. Такая ионизация называется **фотонной**.

Обычно пробой газа происходит практически мгновенно: длительность подготовки пробоя при длине газового промежутка составляет $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с.

Насыщение электронами пространства, заполненного положительными зарядами, превращает эту область в проводящую газоразрядную плазму. По этому ионизированному каналу начинает течь электрический ток, т.е. происходит пробой газа.

Электрическая прочность газа зависит от нескольких факторов: расстояния между электродами, формы электродов, давления, температуры, химического состава газа.

Так для воздуха при нормальных условиях (давление 0,1 мПа, температура 20°C) при расстоянии между электродами 1 см она составляет около 3 мВ/м.

***Пробой жидких диэлектриков.**

Жидкие диэлектрики имеют более высокую электрическую прочность, чем газы в нормальных условиях, т.к. жидкости имеют гораздо меньшую длину свободного пробега электронов.

Явление пробоя жидких диэлектриков определяют в основном примеси: вода, газы и твердые частицы.

Пробой жидкостей, содержащих газовые включения, объясняют местным перегревом жидкости (за счет энергии, выделяющейся в относительно легко ионизирующихся пузырьках газа), который приводит к образованию ионизированного канала между электродами.

Под влиянием поля находящиеся в жидком диэлектрике капельки воды поляризуются, приобретая форму эллипсоидов, создают между электродами канал с повышенной проводимостью, по которому и происходит электрический пробой.

Очистка жидких диэлектриков, в частности масел, от примесей заметно повышает их электрическую прочность.

Так неочищенное трансформаторное масло имеет электрическую прочность $E_{пр} \approx 4$ кВ/мм; после тщательной очистки и сушки масла, его электрическая прочность повышается в 6...7 раз.

6.1.6. Пробой твердых диэлектриков

Для твердых диэлектриков рассматриваются четыре вида пробоя:

- пробой однородных диэлектриков;
- пробой неоднородных диэлектриков;
- тепловой пробой;
- электрохимический пробой.

6.1.6.1. Пробой однородных диэлектриков можно рассматривать как чисто электрический пробой без влияния нагрева материала, а также при отсутствии ионизации газовых включений. Такой пробой удается наблюдать у некоторых органических полимеров и монокристаллов щелочно-галогенидных соединений.

6.1.6.2. Пробой неоднородных диэлектриков (см. табл. 6.2) характерен для материалов, содержащих газовые включения. Электрическая прочность технических твердых диэлектриков практически не зависит от температуры.

Диэлектрики с открытой пористостью (бумага, дерево, пористая керамика) имеют низкую электрическую прочность.

Таблица 6.2

Электрическая прочность некоторых твердых диэлектриков

Материал	$E_{пр.}$, МВ/м	Особенности структуры
1	2	3
Стекло	100...300	Однородные, плотные диэлектрики
Слюда	100...250	
Пропитанная бумага	100...300	
Органические пленки	100...200	

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3
Керамика	10...30	Неоднородные с закрытыми порами
Пластмассы	8...15	
Пористая керамика	3...5	
Дерево	4...5	Диэлектрики с открытыми крупными порами
Непропитанная кабельная бумага	3...7	

Наличие газовых включений в твердой изоляции чревато пробоем особенно при высоких частотах. Диэлектрики с плотной структурой (сланца, стекла, бумага пропитанная жидким диэлектриком) имеют высокую электрическую прочность.

6.1.6.3. Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество теплоты, обусловленное диэлектрическими потерями превышает количество теплоты, выделяющееся в окружающую среду. Материал в этих условиях, разогреваясь, может достичь температуры плавления и обугливания. Пробивное напряжение, вызванное нагревом диэлектрика, зависит от частоты напряжения, условий охлаждения, температуры охлаждающей среды.

Электрическая прочность при тепловом пробое уменьшается с ростом температуры.

6.1.6.4. Электрохимический пробой

Этот вид пробоя происходит при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, когда в материале развиваются необратимые процессы (т.н. электрохимическое старение). Такой пробой может произойти и при высоких частотах. Электрохимический пробой развивается длительное время, поскольку он зависит от постепенно увеличивающейся электропроводности.

6.1.7. Физико-химические свойства диэлектриков

Влажностные свойства диэлектриков.

Гигроскопичность материала - это его способность впитывать в себя влагу из окружающей среды. Гигроскопичность зависит от строения и химической природы материала, наличия и размеров капиллярных промежутков внутри материала, в которые проникает влага.

Ориентировочные размеры пор (в нанометрах) в различных материалах составляют:

⇒ микропора в керамике $10^2 - 10^5$

⇒ капилляры в волокнах целлюлозы 100

⇒ поры в стенках волокна 1 - 10

⇒ межмолекулярные поры различных материалов 1 - 5

⇒ внутримолекулярные поры < 1 .

Эффективный диаметр молекулы воды равен примерно 0,27 нм, поэтому вода способна проникать даже во внутримолекулярные поры материалов.

Атмосферный воздух содержит определенное количество водяного пара.

Абсолютная влажность воздуха оценивается массой m водяного пара содержащейся в одном кубическом метре воздуха.

При $t = 20^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении 0,1 мПа максимально в 1 м^3 воздуха может содержаться 17,3 г.

При других условиях абсолютная влажность имеет другие значения.

Абсолютной влажности соответствуют различные значения относительной влажности, которая выражается в %:

$$\varphi = (m / m_{\text{нас}}) \cdot 100\%$$

где: φ - относительная влажность воздуха;

m - масса водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре;

$m_{\text{нас}}$ - максимальная масса водяного пара в 1 м^3 воздуха при данной температуре.

За нормальную влажность воздуха принята относительная влажность 65%. Тогда содержание водяных паров при $t = 20^\circ\text{C}$ будет:

$$m = \varphi \cdot m_{\text{нас}} = 0,65 \cdot 17,3 = 11,25 \text{ г/м}^3$$

Вода является сильно полярным диэлектриком с низким удельным сопротивлением, около $10^3 - 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, поэтому проникновение ее в поры твердых диэлектриков приводит к резкому снижению их изоляционных свойств.

Особенно заметно воздействие влажности при повышенных температурах ($30 - 40^\circ$) и высоких значениях φ , близких к 100%.

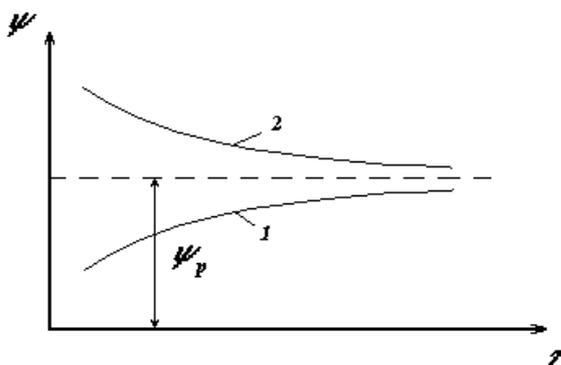


Рис. 6.6. Изменение влажности ψ образца при увлажнении его (кривая 1) и сушке (кривая 2).

Если сухой образец поместить во влажный воздух (с влажностью ϕ), то будет наблюдаться постепенное поглощение материалом влаги из воздуха. Влажность материала ψ , т.е. содержание влаги в единице массы материала, с течением времени τ будет повышаться, асимптотически приближаясь к значению равновесной влажности ψ_p .

Для уменьшения гигроскопичности пористых материалов, их подвергают пропитке жидкими диэлектриками.

Влагопроницаемость - способность материалов пропускать сквозь себя пары воды. Эта характеристика чрезвычайно важна для оценки качества материалов, применяемых для защитных покрытий (шланги кабелей, компаундные заливки, лаковые покрытия и т.п.)

Только для стекол, хорошо обожженной керамики и металлов влагопроницаемость практически равна нулю.

Количество влаги m , проходящее за время τ сквозь участок поверхности s слоя изоляционного материала толщиной h под действием разности давления водяных паров P_1 и P_2 с двух сторон слоя равно:

$$m = \frac{\Pi(P_1 - P_2) \cdot S}{h} \cdot \tau$$

где Π - коэффициент, характеризующий материал.

Для уменьшения влагопроницаемости материалов применяют их пропитку.

6.1.8. Тепловые свойства диэлектриков

К важнейшим тепловым свойствам диэлектриков относятся:

- нагревостойкость;
- холодостойкость;
- теплопроводность;
- тепловое расширение.

Нагревостойкость.

Это способность диэлектрика выдерживать воздействие повышенной температуры за время его эксплуатации, без ухудшения изоляционных свойств.

Нагревостойкость неорганических диэлектриков определяют по началу механических деформаций растяжения оси изгиба.

Наивысшая допустимая рабочая температура определяется на основании тщательного изучения кратковременной и длительной нагревостойкости материала с учетом коэффициента запаса.

Необратимое ухудшение качества изоляции при длительном воздействии повышенной температуры вследствие медленно протекающих химических процессов называется **тепловым старением**.

ГОСТ 8865-70 регламентирует семь классов нагревостойкости для электроизоляционных материалов.

класс	Y	A	E	B	F	H	C
допустимая рабочая							

температура, °C	90	105	120	130	155	180	>180
--------------------	----	-----	-----	-----	-----	-----	------

При указанных температурах обеспечиваются экономически целесообразные сроки службы электрооборудования.

К классу Y относятся волокнистые материалы на основе целлюлозы и шелка (пряжа, ткани, ленты, бумаги, картоны, древесина).

К классу A относятся волокнистые материалы, пропитанные лаками или компаундами; лакоткани на х/б или шелковой основе; полиамидные пленки, полиамидные смолы; масляно-смоляные и поливинилацеталевые лаки и т.п.

В класс E входят пластические массы с органическим наполнителем и терморезактивным связующим (гетинакс, текстолит), полиэтилентерефталатные пленки, эпоксидные, полиэфирные и полиуретановые смолы и компаунды.

В класс B входят материалы, содержащие неорганические компоненты: слюда, асбестовые и стекловолоконные материалы в сочетании с органическими связующими и пропитывающими материалами: миканиты, эпоксидные компаунды с неорганическими наполнителями.

К классу F относятся миканиты, изделия из стекловолокна без подложки или с неорганической подложкой с применением органических связующих повышенной нагревостойкости: эпоксидных, полиэфирных, кремнийорганических.

Материалы класса H получают на основе кремнийорганических смол особо высокой нагревостойкости.

К классу C относятся материалы чисто неорганические, не содержащие органических составов: слюда, стекло, стекловолоконные материалы, кварц, асбест, микалекс, непропитанный асбоцемент. Из всех органических только фторопласт-4 и материалы на основе полиимидов.

Холодостойкость - способность изоляции выдерживать воздействие низких температур.

Теплопроводность (см. табл. 6.3) - способность материала к переносу тепла от более нагретых частей к менее нагретым. Теплопроводность влияет на электрическую прочность при тепловом пробое и на стойкость материала к импульсным тепловым воздействиям.

Теплопроводность материала характеризуется **коэффициентом теплопроводности** ν_T входящим в уравнение Фурье:

$$\Delta P_T = \nu_T \cdot \frac{dT}{dl} \cdot \Delta S \quad (6.19)$$

где: ΔP_T - мощность теплового потока сквозь площадь ΔS , нормальную к потоку;

dT/dl - градиент температуры.

Значение ν_T электроизоляционных материалов, за исключением оксида бериллия, меньше, чем у большинства металлов.

Таблица 6.3

Значения коэффициента теплопроводности некоторых диэлектриков.

Материал	$\nu_t, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
Воздух	0,05
Битумы	0,07
Бумага	0,10
Лакоткань	0,13
Текстолит	0,25
Гетинакс	0,35
Вода	0,58
Плавленый кварц	1,25
Фарфор	1,6
Стеатит	2,2
Диоксид титана	6,5
Кристаллический кварц	12,5
Амоноксид	30,0
Оксид магния	36,0
Оксид бериллия	218,0

Тепловое расширение диэлектриков, как и других материалов, оценивают **температурным коэффициентом линейного расширения** $T_{\text{кл}}$, измеряемым в К^{-1} .

$$T_{\text{кл}} = \alpha_l = \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{dT}$$

В таблице 6.4 приведены средние $T_{\text{кл}}$ некоторых материалов при температуре 20-100°C.

Таблица 6.4

Температурный коэффициент линейного расширения некоторых диэлектриков

Материал	$\alpha \cdot 10^6, \text{К}^{-1}$
Поливинилацетат	265
Поливинилхлорид	160
Полиэтилен	145
Нейлон	115
Политетрафторэтилен	100
Полиметилметакрилат	70
Полистирол	68
Эпоксидные смолы	55
Слюда	37
Селикатное стекло	9,2
Глиноземистая керамика	7,0
Фарфор	3,5
Плавленый кварц	0,55

6.2. Газообразные диэлектрики (см. табл. 6.5)

Таблица 6.5

Свойства газов

параметр	воздух	азот N_2	кислород O_2	водород H_2	элегаз SF_6	гелий He	неон Ne	аргон Ar
молекулярная масса	28,9	28,0	32,0	2,0	146,0	4,0	20,0	39,9

температура кипения, К	79,0	77,4	90,2	20,4	209,3	4,2	27,2	87,5
температура плавления, $T_{пл.}$, К	60,0	63,2	54,4	14,0	-	-	24,5	84,0
плотность, кг/м^3	1,29	1,25	1,4	0,09	6,39	0,18	0,90	0,90
коэф. теплопроводности, мВт/м·к	24,0	24,0	24,0	166,0	-	142,0	45,5	16,3
удельная теплоемкость, кДж/кг·к	1,0	1,0	0,9	14,2	0,62	5,2	1,0	0,5

Азот - практически имеет одинаковую электрическую прочность с воздухом, применяется для заполнения газовых конденсаторов.

Водород - обладает благоприятными свойствами для использования его в качестве охлаждающей среды вместо воздуха. Как видно из таблицы 6.4. водород характеризуется высокой теплопроводностью и удельной теплоемкостью при очень малой плотности. При использовании водорода для охлаждения крупных генераторов заметно снижаются потери энергии на трение ротора о газ, на вентиляцию, резко снижается процесс старения изоляции.

Элегаз - (шестифтористая сера) имеет электрическую прочность примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха. Элегаз не токсичен, химически стоек, не разлагается при нагреве до 800°C. Его с успехом используют в конденсаторах, кабелях.

Инертные газы - обладают низкой электрической прочностью и весьма малой теплопроводностью. Нашли широкое применение при изготовлении газоразрядных электрических ламп.

6.3. Жидкие диэлектрики (см. табл. 6.6)

Нефтяные электроизоляционные масла - получают в результате перегонки нефти и представляют собой смесь углеводородов ароматического, нафтенового и парафинового рядов.

Трансформаторное масло - находит наибольшее применение в электротехнике для заливки силовых трансформаторов, масляных выключателей.

В трансформаторах масло:

- повышает электрическую прочность изоляции;
- улучшает отвод тепла работающего трансформатора.

В выключателях масло интенсивно гасит, возникающую при размыкании контактов электрическую дугу. Трансформаторное масло - это жидкость желтоватого цвета; его свойства регламентированы ГОСТ 982-80 и приведены в таблице 6.6.

Таблица 6.6

Свойства трансформаторного масла и других жидкостей.

показатель	трансф. масло	конденс. масло	ПЭСЖ*
------------	---------------	----------------	-------

плотность при 20°C, кг/м ³	880-890	900-920	990-1000
цвет	желт.	желт.	бесцвет.
кислотное число, КОН на 1 кг масла не более	0,01-0,05	0,01-0,015	0,05-0,07
температура застывания, °С не ниже	-4,5	-45	-60
температура вспышки, °С не ниже	+135	+135	+150
удельное объемное сопротивление при 20°C, Ом·м	10 ¹² -10 ¹³	10 ¹² -10 ¹³	10 ¹⁰ -10 ¹²
относительная диэлектрическая проницаемость при 20°C	2,1-2,4	2,1-2,3	2,6-2,8
тангенс угла диэлектрических потерь при 20°C и 50Гц, мВ/м	0,001-0,003	при 100°C 0,003-0,005	0,0002-0,003
электрическая прочность при 20°C и 50Гц, мВ/м	15-20	20-25	18-20

* ПЭСЖ –кремнийорганическая жидкость.

Температура застывания масла - параметр особенно важный для масла, используемого в районах с суровой зимой. Специальное “арктическое масло” (марки АТМ) имеет температуру застывания минус 70°C.

Электрическая прочность масла - чрезвычайно чувствительна к содержанию в нем влаги. Более резкое снижение электрической прочности происходит, если в масле кроме воды содержатся волокнистые примеси. Волокна бумаги, хлопчатобумажной пряжи легко впитывают влагу и способствуют пробоя масла. Для сушки масла существует несколько способов:

- применение фильтр-прессов;
- центрифугирование;
- распыление подогретого масла в камере заполненной азотом.

Испытание масла на электрическую прочность производится на специальной испытательной установке. Проба масла заливается в стандартный фарфоровый сосуд, внутри которого установлены два электрода диаметром 25 мм с закругленными краями при расстоянии между ними 2,5 мм. К электродам подводится синусоидальное напряжение, величина которого повышается от 0 до максимального, при котором происходит пробой масла. В результате пятикратного пробоя определяется среднее значение электрической прочности масла.

Таблица 6.7

Нормы электрической прочности трансформаторного масла.

Для аппаратов с рабочим напряжением, кВ	Электрическая прочность U _{пр} /2,5, кВ/мм не менее	
	сухого масла	масла в эксплуатации
≤ 6	25	20
35	30	25
110 и 220	40	35
≥ 330	50	45

Как видно из таблицы, чем выше рабочее напряжение аппарата, тем выше должна быть электрическая прочность масла, подлежащего заливке в данный аппарат или находящегося в эксплуатации.

6.4. Волокнистые материала (см. табл. 6.8)

Весьма широко в электротехнике применяются волокнистые материалы, которые состоят преимущественно из частиц удлиненной формы - волокон.

Преимущества их: дешевизна, довольно большая механическая прочность и гибкость, удобство обработки.

Недостатки: невысокие электрические прочность и теплопроводность, высокая гигроскопичность.

Однако свойства волокнистых материалов могут быть существенно улучшены посредством пропитки их. Пропитанные волокнистые материалы по нагревостойкости относятся к классу А.

Синтетические волокнистые материалы на основе стекла и асбеста имеют повышенную нагревостойкость и значительно меньшую гигроскопичность.

6.4.1. Дерево

Наиболее широко в электротехнике применяются береза, бук, граб. Пропитка дерева производится после окончания механической обработки; для этого используют трансформаторное, льняное масла, различные смолы.

Применяются в качестве крепежных и опорных деталей трансформаторов, пазовых клиньев электрических машин, опор электролиний, линий связи, радио и т.п.

6.4.2. Бумага (см. табл. 6.8)

Листовой или рулонный материал, состоящий в основном из целлюлозы; Для изготовления электроизоляционной бумаги применяется сульфатная и натронная целлюлоза, получаемая путем варки измельченной древесины в растворах, содержащих едкий натрий NaOH.

Кабельная бумага выпускается согласно ГОСТ 645-77 нескольких марок: КМ, К, КВ, КВУ, КВМ и КВМУ (буквы в марке: К - кабельная, В - высоковольтная, М - многослойная, У - уплотненная). После букв в марке стоят цифры от 15 до 240 (они обозначают толщину бумаги от 15 до 240 мкм).

Бумаги марок К и КМ применяют для силовых кабелей напряжением до 35 кВ, КВ и КВУ - 35 кВ и выше, КВМ и КВМУ - 110 кВ и более.

6.4.3. Картон (см. табл. 6.8)

Электроизоляционные картоны изготавливают из древесной или хлопковой целлюлозы. Отличаются от бумаги большей толщиной. Выпускаются двух типов: **воздушные**, более твердые и упругие, предназначенные для ра-

боты на воздухе и *масляные*, предназначенные для работы в трансформаторном масле.

Таблица 6.8

Электроизоляционные бумаги и картон.

Материал	Марка	Толщина мкм	Плотность кг/м ³	Электрические параметры при 20 °С и 50 Гц		Характеристика и область применения
				tgδ	U _{пр} , В	
бумага кабельная	К-080	80	780	не	не	Для изоляции жил кабелей напряжением до 35 кВ
	К-120	120	780	нормируется	нормируется	
	К-170	170	780	-	-	Для изоляции жил кабелей напряжением от 110 до 500 кВ
	КМ-120	120	780	-	-	
	КВМ-080	80	770	0,022	-	
	КВМУ-80	80	1100	0,0026	-	
	КВМУ-120	120	1100	0,0026	-	
бумага кабельная полупроводящая	КПУ-080	80	900	$\rho_v=10^3-10^5$	$\rho_v=10^3-10^5$	Бумага с содержанием сажи. Для экранирования жил кабелей
	КПУ-120	120	970	Ом·м	Ом·м	
бумага конденсаторная	КОН-1	10-30	1000	0,0017	300-600	Применяется в бумаж. конденсат. то же, с улучшенными эл. характеристиками
	КОН-2	4-30	1170	0,0016	240-680	
	МКОН-1	8-30	1000	0,001	300-600	
	МКОН-2	6-30	1170	0,0012	300-700	
	МКОН-3	6-15	1130	0,0012	300-500	
картон электроизоляционный (для работы в воздушной среде)	ЭВС	0,2-0,4мм	1250	не нормируется	12мВ/м	Выпускается в листах и рулонах (ЭВ, ЭВС) или только в рулонах (ЭВП, ЭВТ). Прокладки, карманы катушек с последующ. пропиткой
	ЭВП	0,1-0,3мм	1250	-	12мВ/м	
	ЭВТ	0,1-0,5мм	1150	-	12мВ/м	
	ЭВ	0,2-0,3мм	1200	-	10мВ/м	
картон электроизоляционный для аппаратов с масляным заполнением	А	2;2,5;3мм	950	-	-	Эластичный, гибкий в тр-рах до 700кВ. Плотный (до 220кВ) твердый с повышенным сопротивлением расслаиванию
	Б	1-6мм	950	-	-	
	В	2;2,5;3мм	1250	-	-	
	Г	0,5;1,0;1,5мм	950	-	-	

6.5. Лакоткани (см. табл. 6.8)

Лакоткань - это гибкий электроизоляционный материал: ткань, пропитанная лаком. Для изготовления лакоткани применяют ткани: хлопчатобумажную, шелковую, капроновую и стекловолоконную. Лакоткани малостойкие ЛХММ и ЛСММ пригодны для работы в трансформаторном масле.

Таблица 6.8

Основные свойства электроизоляционных лакотканей

Марка лакоткани	Основа	Пропиточный состав	Толщина, мм	ρ_v , Ом·м	$U_{пр}$, кВ при 15-40°C и влажности 45-75%	Нагревостойкость, °C
ЛХМ	хл/бум	масляный лак	0,15-0,3	10^{11}	4-9,5	105
ЛХММ	-	-	0,17-0,24	10^{11}	4,8-9,2	105
ЛХБ	-	битумно-масляный лак	0,17-0,24	10^{11}	4,5-9,2	105
ЛШМ	шелк	масляный лак	0,08-0,15	10^{11}	1,0-8,5	105
ЛКМ	капрон	-	0,1-0,15	10^{11}	3,6-7,8	105
ЛСМ	стеклоткань	-	0,15-0,24	10^{11}	3,2-8,0	120
ЛСММ	-	-	0,17-0,24	10^{11}	4,0-9,2	120
ЛСП	-	полиэфирно-эпоксидный лак	0,08-0,17	10^{10}	0,8-9,0	155
ЛСК	-	кремний-органический лак	0,06-0,1	10^{12}	1,2-9,0	180

6.6. Полимеры

Открытие полимеров сыграло решающую роль в прогрессе электроизоляционной техники. Синтетические полимерные материалы (полимеры) могут быть получены двумя способами:

- полимеризацией;
- поликонденсацией.

Полимеризация - это химическая реакция, в результате которой из низкомолекулярного соединения (мономера) получают высокомолекулярное соединение (полимер) без изменения элементарного химического состава вещества. Предпосылкой такой реакции является наличие в молекулах мономера непрочных двойных или тройных связей между атомами углерода.

Число молекул мономера n , объединившихся в молекулу полимера называется **степенью полимеризации**.

Поликонденсация - это химическая реакция между мономерами, при которой образование полимера идет с выделением побочных веществ (воды, водорода, аммиака и др.).

Диэлектрики, полученные в результате реакции поликонденсации, как правило, обладают несколько пониженными изоляционными свойствами по сравнению с диэлектриками, полученными в результате полимеризации. Причиной этому является наличие в поликонденсационных диэлектриках

побочных веществ, которые, разлагаясь на ионы, увеличивают электропроводность материала.

По характеру строения молекулы полимеры делятся на:

- линейные;
- пространственные (трехмерные).

Молекулы линейных полимеров имеют вид цепочек или нитей, изогнутых и переплетенных друг с другом. Молекулы пространственных полимеров развиты в пространстве в различных направлениях, т.е. имеют более компактную форму.

По тепловым свойствам полимеры подразделяются на:

- термопластичные;
- терморезистивные материалы.

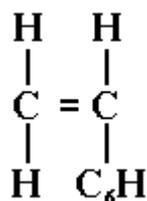
Термопластичные материалы (термопласты) при нагревании размягчаются и постепенно превращаются в густые жидкости.

Терморезистивные материалы при нагревании не размягчаются (Свойства синтетических полимеров приведены в приложении 4).

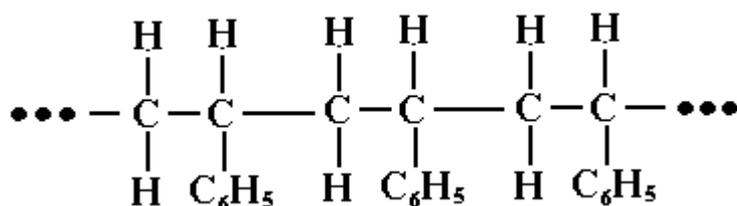
6.6.1. Полимеризационные полимеры

Полистирол - твердый прозрачный материал. Неполарный диэлектрик, термопластичный - размягчается при $110^{\circ}\dots 120^{\circ}\text{C}$.

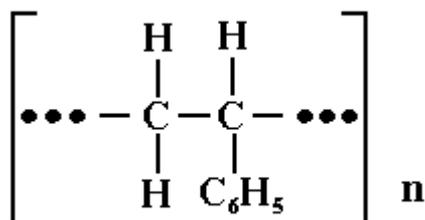
Исходный мономер: стирол - жидкость C_8H_8 , имеющая строение молекулы:



В результате реакции полимеризации получается полистирол - линейный полимер:

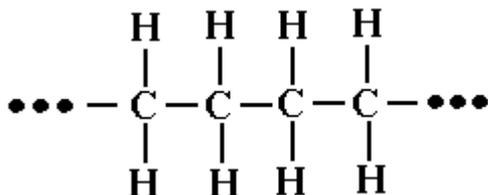


или:



n - степень полимеризации для полистирола может достигать до 6000. Т.о., если молекулярная масса стирола равна $12 \cdot 8 + 1 \cdot 8 = 104$, то для полистирола молекулярная масса составляет ($C_{48000}H_{48000}$) 624000.

Полиэтилен - неполярный, термопластичный диэлектрик белого или светлосерого цвета; получается в результате полимеризации газа этилена C_2H_4 ($H_2C = CH_2$). Идеализированная формула строения молекулы полимера полиэтилена имеет вид:



Но фактически строение молекулы имеет боковые ответвления (- CH_3 , - C_2H_5).

Долгое время единственным способом получения полиэтилена была полимеризация этилена при высоком давлении (до 300 мПа) и температуре около $200^{\circ}C$. Катализатором служит кислород, вводимый в реактор в небольшом количестве.

Получаемый полимер называется полиэтиленом высокого давления (ПЭВД). Впоследствии было создано производство полиэтилена низкого давления (ПЭНД): давление при полимеризации 0,3...0,6 мПа, температура около $80^{\circ}C$, катализатор из смеси $TiCl_4$ с одним из соединений: $(C_2H_5)_2AlCl$, $Al(C_2H_5)_3$ или $Al(C_4H_9)_3$.

Получение полиэтилена среднего давления (ПЭСД) идет при давлении 3...7 мПа, температуре от 160 до $275^{\circ}C$; катализаторы - оксид хрома CrO_3 или молибдена MoO_3 .

Процесс теплового старения полиэтилена может быть замедлен введением в состав материала антиокислителей (некоторых ароматических веществ с наличием между бензольными кольцами аминогрупп (-NH-)). Старение под действием света ослабляется введением в состав полиэтилена сажи (до 2%); однако стабилизированный сажой полиэтилен обладает пониженными электроизоляционными свойствами и используется лишь для защитных оболочек кабелей.

Для повышения нагревостойкости полиэтилена его подвергают воздействию ионизирующих излучений (потока электронов от ускорителя или от изотопа кобальта Co^{60}).

Полиэтилен применяется в качестве изоляции кабелей (силовых, радиочастотных, телефонной связи). Выпускается в виде пленок, лент.

Полипропилен

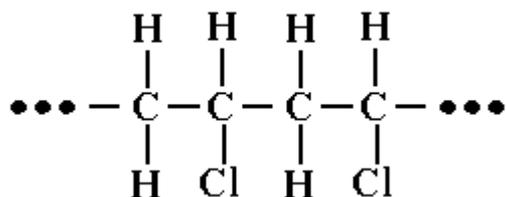
Линейный неполярный полимер, получаемый из газа пропилена $CH_2 = CH \cdot CH_3$. Электроизоляционные свойства пропилена аналогичны свойствам полиэтилена.

Из полипропилена получают пленки, волокна, ткани и фасонные изделия методом литья под давлением.

Поливинил хлорид

Линейный термопластичный полимер, получаемый в результате полимеризации газообразного мономера - винилхлорида: $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{Cl}$.

Структурная формула поливинилхлорида имеет вид:



Вследствие асимметрии строения молекулы (из-за наличия атомов Cl) поливинилхлорид является полярным диэлектриком и имеет пониженные свойства по сравнению с неполярными полимерами. Поливинилхлорид стоек к действию воды, щелочей, кислот, масел, бензина и спирта.

Используется для изготовления пластмасс, в качестве изоляции проводов, защитных оболочек кабелей.

Горячим прессованием порошкообразного поливинилхлорида получают твердый, химически стойкий материал - **винипласт**, который применяется для изготовления различных электроизоляционных деталей, труб и др.

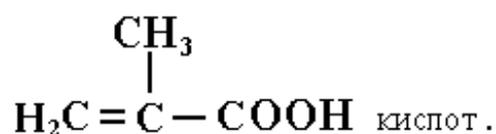
Изделия из винипласта можно склеивать, сваривать; они легко поддаются всем видам механической обработки. Недостатки винипласта - низкая холодостойкость и нагревостойкость.

В электроизоляционной технике широко применяется пластифицированный поливинилхлорид. Поливинилхлоридный пластикат получают из порошкообразного поливинилхлорида, смешанного с пластификаторами (густыми маслообразными жидкостями, например дибутилфталатом). Пластикат обладает большой эластичностью, более высокой холодостойкостью (до -50°C).

Поливинилхлоридный пластикат применяют для изоляции проводов, для изготовления пленок, изоляционных лент и пр.

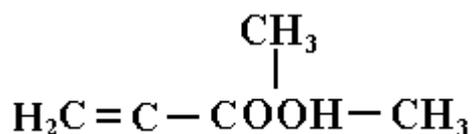
Полиакрилаты

Полимеры эфиров акриловой: $\text{H}_2\text{C} = \text{CH} - \text{COOH}$ и метакриловой:



Они имеют хорошую холодо-, масло- и щелочестойкость; в зависимости от вида спиртового остатка в молекуле мономера они могут иметь различные механические свойства - прочность, твердость, эластичность.

Наиболее распространенный из этих материалов - **полиметилметакрилат**, т.е. полимер метилового эфира метакриловой кислоты (метилметакрилата).



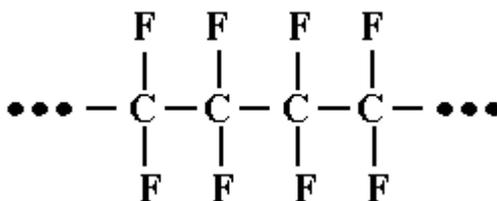
Он известен под названием органическое стекло. Этот прозрачный бесцветный материал широко применяется как конструкционный.

Имеет свойство выделять большое количество газов (СО, Н₂ пары Н₂О, СО₂) при воздействии электрической дуги используется в разрядниках, где требуется быстрое гашение возникающей дуги.

Фтороорганические полимеры

Из фтороорганических полимеров наиболее широко применяется **политетрафторэтилен**, который получается путем полимеризации тетрафторэтилена: F₂C = CF₂.

Строение молекулы политетрафторэтилена:



Благодаря симметричному строению молекулы политетрафторэтилен не полярен. Выпускается под названием **фторопласт - 4** (цифра 4 указывает на количество атомов фтора в мономере). Аналогичный материал за рубежом известен под названием **тефлон**.

Фторопласт - 4 обладает необычайно высокой для органического полимера нагревостойкостью (около +250°С), что объясняется высокой энергией связи С-F; химически стоек (на него не действует соляная, серная, азотная, плавиковая кислоты, щелочи); не горюч, абсолютно негигроскопичен. Этот материал обладает наилучшими свойствами из известных диэлектриков. Холодостойкость минус 80°С, для тонких пленок ниже минус 100°С.

Применяется в пластмассах; из него делают различные фасонные изделия, листы, гибкие пленки, изоляцию кабелей. Применяется в особо ответственных случаях. Широкому внедрению фторопласта - 4 препятствуют его высокая стоимость и сложность технологии.

6.6.2. Поликонденсационные синтетические полимеры

В эту группу полимеров, используемых в качестве электроизоляционных материалов входят: полиэфирные, кремнийорганические, эпоксидные, фенолформальдегидные, полиамидные, полиуритановые полимеры (смолы).

Полиэфирные смолы.

Продукты поликонденсации различных многоатомных спиртов (гликоля, глицерина и др.) и органических кислот (фталевой, малеиновой и др.) или их ангидридов.

Полиэтилентерефталат (лавсан)

Прозрачный высокополимерный диэлектрик, получаемый в результате реакции поликонденсации терефталевой кислоты и этиленгликоля. Применяют для изготовления волокон, пряжи, тканей, тонких электроизоляционных пленок.

Лавсан аморфного строения (поликонденсация между терефталевой кислотой, этиленгликолем, глицерином и отвердителем (бутилтитанатом)) используется при производстве электроизоляционных лаков, применяющихся при изготовлении эмалированных проводов. Пленки лавсановых лаков термореактивны.

Поликарбонаты

Полиэфиры угольной кислоты, обладающие хорошими механическими и электрическими свойствами, относительно высокой температурой размягчения (+140°C). Обладают хорошей химической стойкостью.

Поликарбонаты применяют для изготовления слоистых пластиков, компаундов, электроизоляционных пленок.

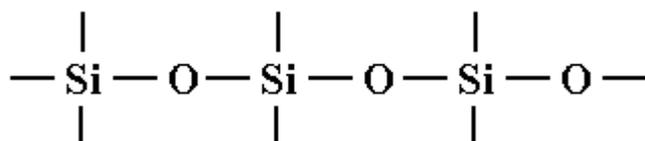
Глифталевые смолы

Результат реакции поликонденсации глицерина и фталевого ангидрида. Термореактивны, обладают высокой клеящей способностью, хорошими электроизоляционными свойствами, высокой нагревостойкостью (до 130°C).

Глифталевые смолы используют в качестве основы для клеящих, пропиточных и покровных лаков.

Кремнийорганические полимеры

Соединения, основу структурной формулы которых, составляет цепь чередующихся атомов кремния и кислорода:

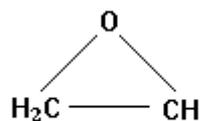


свободные связи кремния заполняются органическими радикалами (метильными, этильными, фенильными и др.).

Кремнийорганические полимеры могут быть термопластичными и термореактивными. Их отличает высокая нагревостойкость (до +250°C) и холодостойкость (до -60°C); обладают малой гигроскопичностью, химически инертны. Эти смолы используют для изготовления покровных эмалей, эмальлаков для проводов. Промышленность выпускает большое число кремнийорганических смол, применяющихся для изготовления электроизоляционных материалов: стеклотекстолитов, компаундов, слюдяной изоляции, лаков.

Эпоксидные смолы

Группа синтетических смол, получаемых в результате хлорирования глицеринов с фенолами в щелочной среде. Особенностью эпоксидных смол является наличие в их молекулах эпоксидных групп (колец):



В чистом виде эпоксидные смолы - термопластичные и низкоплавкие материалы. Они легко растворяются во многих органических растворителях (ацетоне, толуоле и др.), не растворяются в воде и плохо растворяются в спиртах.

Эпоксидные смолы при добавлении в них отвердителя сравнительно быстро переходят из жидкого состояния в твердое. Отвержденные эпоксидные смолы являются уже термоактивными материалами.

Эпоксидные смолы применяются для приготовления компаундов, клеящих лаков, литой изоляции для аппаратов и приборов.

Полиамиды

Термопластичные полимеры, обладают высокой механической прочностью, эластичностью, высокой химической стойкостью.

Из числа полиамидов широко применяют **капрон** и **нейлон**. Используют для изготовления синтетических волокон, гибких пленок, пластмасс.

Полиуретаны

Линейные термопластичные и отверждающиеся термореактивные полимеры. Применяют для эмалирования проводов, изготовления покровных лаков, заливочных компаундов.

Полиимиды

Наиболее нагревостойкие органические полимеры (пленки выдерживают температуру до 300°C). Обладают очень высокой холодостойкостью (до - 269°C).

Полиимидные пленки применяют в конденсаторах, в нагревостойких кабелях. Полиимидные лаки используют для эмалирования проводов и пропитки катушек.

6.7. Пластмассы

Пластмассы (пластические массы) – вещества, нашедшие широкое применение в электротехнике и в качестве изоляционных и в качестве конструкционных материалов.

Наряду с положительными (высокими электроизоляционными и антикоррозионными свойствами) имеют ряд недостатков: имеют невысокую теплостойкость, холодостойкость, сравнительно быстрое старение и др.

Как правило, пластмассы в своем составе имеют следующие компоненты:

- связующие вещества (органические полимеры);
- наполнители (древесная мука, х/б или стеклянное волокно, бумага, слюда, ткань);
- пластификаторы – вещества, уменьшающие хрупкость, повышающие холодостойкость пластмассовых изделий;

- красители;
- стабилизаторы, способствуют длительному сохранению пластмассами основных свойств.

Пластмассы на основе термопластичных полимеров и изделия из них производят преимущественно без наполнителей.

В зависимости от состава связующих веществ пластмассы подразделяются на:

6.7.1. Пластмассы на основе кремнийорганических полимеров – обладают высокими и стабильными электроизоляционными свойствами, высокой нагревостойкостью (до $+300^{\circ}\text{C}$), повышенной дугостойкостью и хорошими механическими свойствами. Изготавливают методом горячего прессования. Наполнители: асбест, стекловолокно, молотый кварц и др. минеральные вещества.

6.7.2. Пластмассы на основе эпоксидных смол обладают хорошими изоляционными свойствами, повышенной влагостойкостью. Применяют для изготовления радиотехнических деталей.

6.7.3. Пластмассы на основе фенолформальдегидных смол (фенопласты) изготавливают горячим прессованием, обладают высокой стабильностью свойств, противостоят воздействию кислот, масел, органических растворителей – фенопласты с органическими наполнителями могут работать в диапазоне температур от -60 до $+120^{\circ}\text{C}$. Используются в качестве конструкционного материала (корпуса приборов, кнопки, ручки управления и т.п.).

Фенопласты с неорганическими наполнителями имеют высокие изоляционные свойства, стойки при температурах от -60 до $+280^{\circ}\text{C}$. Используют для изготовления электроизоляционных деталей с повышенной механической прочностью (каркасы, катушки, втулки и др.).

6.8. Слоистые пластики (см. табл. 6.10)

Широко применяются в качестве конструкционных и электроизоляционных материалов. В качестве наполнителей используют листовые волокнистые материалы.

6.8.1. Гетинакс

Получают методом горячего прессования нагревостойкой бумаги, пропитанной лаком (раствором бакелита в спирте).

Таблица 6.10

Некоторые свойства слоистых пластиков

Свойство	Гетинакс	Текстолит	Стекло-текстолит
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	1400	1400	1800
Предел прочности, Мпа:			
- при растяжении	120	60	400
- при изгибе	100	100	440

Теплостойкость, °С	190	160	260
Класс нагревостойкости	А	А	В
Электрическая прочность, МВ/м	20...35	5...10	6...22

Более совершенной является технология производства слоистых пластиков, при которой пропитка бумаги или ткани ведется жидкими водными суспензиями фенолформальдегидных смол. После сушки вода испаряется, а полученный многослойный пластик готов к применению. Прессовка обычно ведется при давлении около 1 Мпа и температуре 160...165°С.

Гетинакс нашел применение в производстве высоковольтных и низковольтных различных по назначению аппаратах, в технике связи.

Фольгированный гетинакс облицованный с одной или двух сторон электролитической медной фольгой толщиной 0,035...0,05 мм применяется при изготовлении печатных схем низковольтных цепей аппаратуры.

6.8.2. Текстолит

Изготавливается из пропитанной смолами хлопчатобумажной ткани в виде листов 450х600 мм марок А, Б и Г. Толщина листа от 0,5 мм до 50 мм. Эти марки текстолита применяются для работы в трансформаторном масле и на воздухе при 50 Гц. Применяется для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или работающих на истирание.

6.8.3. Другие виды слоистых пластиков

Текстогетинакс – комбинированный слоистый пластик с внутренними слоями из бумаги и наружными – слоями х/б ткани.

Стеклотекстолит – пластик на основе стеклянной ткани с нагревостойкими связующими.

Слоистые пластики на неорганических основах: асбогетинакс на основе асбестовой бумаги и асботекстолит на основе асбестовой ткани являются наиболее нагревостойкими.

6.9. Битумы, лаки, компаунды

6.9.1. Битумы - аморфные материалы, сложные смеси углеводородов. Растворяются в бензоле, толуоле. Битумы термопластичны, плотность около 1000 кг/м³. Различают: природные (асфальты) и искусственные (тяжелые продукты перегонки нефти). В электроизоляционной технике из нефтяных битумов применяют битумы марок БН-III, БН-IV, БН-V. Битумы используют для изготовления лаков и компаундов.

6.9.2. Лаки

Это коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел, составляющие так называемую лаковую основу в летучих растворителях. При

сушке лака растворитель улетучивается, а лаковая основа переходит в твердое состояние, образуя лаковую пленку.

По применению электроизоляционные лаки разделяются на три группы:

- пропиточные лаки;
- покровные лаки;
- клеящие лаки.

Широко применяются пропиточные лаки: фенольный ФЛ-98, полиуретановый УР-9144, кремнийорганический КО-964 и масляно-глифталевый ГФ-95 (первая цифра – 9 – электроизоляционный лак, последующие цифры – конкретный вид лака). Такие лаки применяют для пропитки обмоток электрических машин с рабочей температурой до 150⁰С; лак ГФ-95 – для пропитки обмоток маслonaполненных трансформаторов.

Для пропитки обмоток машин с рабочей температурой 180...200⁰С изготавливают лаки без растворителя марок БИД-9001, БИД-9002, БИД-9003, которые отличаются повышенной химостойкостью и маслостойкостью.

Для изолирования обмоточных проводов применяют полиэфирные, полиэфиримидные, полиамидные и полиуретановые лаки.

6.9.2. Компаунды

Отличаются от лаков отсутствием в их составе растворителя. Состоят из различных смол, битумов, воска, масел. В исходном состоянии компаунд твердый материал; перед употреблением его нагревают до необходимой вязкости.

По применению компаунды делятся на две группы:

- пропиточные (для пропитки волокнистых диэлектрических материалов);
- заливочные компаунды (например, для заливки соединительных и концевых кабельных муфт).

Весьма распространены *эпоксидные компаунды*, представляющие собой эпоксидную смолу с добавлением наполнителей и пластификаторов. Непосредственно перед употреблением в него вводят отвердитель.

Применяют также термоактивные *полиэфирные компаунды*.

6.10. Гибкие пленки

Большинство пленок изготавливают методом **ЭКСТРУЗИИ**: расплавленный полимер пропускают через кольцевую головку, имеющую три зоны нагрева; получают рукавную пленку. Затем этот рукав раздувают сжатым воздухом. Скорость вытяжки от 10 до 30 м/с; рукав раздувается для получения пленки шириной от 1,5 до 3,0 м.

Фторопласт (политетрафторэтилен) при нагревании не плавится, поэтому пленки из этого полимера не могут быть изготовлены методом экструзии. Фторопластовые пленки изготавливают методом механического резания цилиндрических заготовок из фторопласта-4 на токарных станках с последующей прокаткой.

Свойство пленок обусловлены свойствами исходных полимеров, поэтому пленки подразделяются на два класса:

- неполярные;
- полярные.

6.10.1. Неполярные пленки (см. табл. 6.11)

Важнейшие из неполярных пленок: полистирольная (ПС), пленка из сополимера стирола с альфаметилстиролом (САМП), политетрафторэтиленовая (ПТФЭ), полиэтиленовая (ПЭ), полипропиленовая (ПП).

Таблица 6.11

Основные параметры неполярных пленок

№	Параметры	ПС	САМП	ПТФЭ	ПЭ	ПП
1	2	3	4	5	6	7
1.	Толщина, мкм	20...100	20	5...150	10...60	4...12
2	ρ при $t=20^{\circ}\text{C}$, $f=1\text{кГц}$	10^{17}	10^{16}	10^{17}	10^{15}	10^{15}

Продолжение таблицы 6.11

1	2	3	4	5	6	7
---	---	---	---	---	---	---

3.	ϵ при $t=20^{\circ}\text{C}$, $f=1\text{кГц}$	2,3...2,6	2,7	2,1	2,2	2,2
4.	$E_{пр}$, МВ/м	150...300	160...300	100...200	200...350	300...600
5.	Максимальная раб. температур., $^{\circ}\text{C}$	70...85	90...100	200...250	85...110	90...110
6.	Гигроскопичность, %	0,07	0,07	0,01	0,3	0,2
7.	Плотность, кг/м^3	1050	1050	2150	950	900

6.10.2. Полярные пленки (см. табл. 6.12)

Из полярных пленок наибольшее распространение получили: полиэтилентерефталатная (ПЭТФ), из триацетата целлюлозы (ТАЦ), поликарбонатная (ПК), полиамидная (ПАМ) и поливинилхлоридная (ПВХ).

Таблица 6.12

Основные параметры полярных пленок

№	Параметры	ПЭТФ	ТАЦ	ПК	ПАМ	ПВХ
1.	Толщина, мкм	4...250	3...100	2...500	12...125	20...500
2.	ρ при $t=20^{\circ}\text{C}$, Ом·м	10^{16}	10^{14}	10^{16}	10^{10}	10^{13}
3.	ϵ при $t=20^{\circ}\text{C}$	3,0	10...15	2,8...3,0	6,0	3,3
4.	$E_{пр}$ при $t=20^{\circ}\text{C}$, МВ/м	140...160	90...150	150...350	15...45	75
5.	Максимальная раб. температур., $^{\circ}\text{C}$	130	100	140	100	80
6.	Гигроскопичность, %	0,6	2...3	0,3...0,5	1,0...3,3	1,0
7.	Плотность, кг/м^3	1400	1200	1200	1300	1400

6.11. Слюда и слюдяные материалы

Слюда – важнейший из природных электроизоляционных материалов благодаря ее исключительно ценным качествам:

- высокой электрической прочности;
- нагревостойкости;
- влагостойкости;
- механической прочности и гибкости.

Применяется в качестве изоляции электрических машин большой мощности. По химическому составу различные виды слюд представляют собой вводные алюмосиликаты. Важнейшие из них:

- мусковит, состав которого выражается приблизительно формулой $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$;
- флогопит: $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

В состав слюд могут входить также соединения железа, натрия, кальция и др.

Мусковит – бесцветный или имеет красноватый, зеленоватый и др. оттенки; флогопит – янтарный, золотистый, коричневый.

Таблица 6.13

Электрические свойства слюды

Вид слюды	ρ , Ом·м	ϵ	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ при частоте		
			50 Гц	1кГц	1МГц
Мусковит	$10^{12}-10^{16}$	6-8	150	25	3

Флогопит	10^{11} - 10^{12}	5-7	500	150	15
----------	-----------------------	-----	-----	-----	----

Приведенные параметры свойств слюды относятся к случаю, когда электрическое поле действует перпендикулярно плоскости пластинок. Вдоль пластинок слюды эти свойства значительно хуже. Плотность слюд – $2700...2900 \text{ кг/м}^3$, удельная теплоемкость – $0,86...0,87 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$.

Мусковит более стоек к истиранию, чем флогопит. Коллекторный миканит делают из флогопита, который стирается наравне с медью. Большинство слюд сохраняют сравнительно хорошие электрические и механические свойства – до нескольких сот градусов Цельсия. Плавятся слюды при $1145...1400^\circ\text{C}$.

Миканиты - листовые или рулонные материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды с помощью клеящего лака или смолы, иногда с применением волокнистой подложки из бумаги или ткани. Подложка увеличивает прочность материала на разрыв и удерживает лепестки при изгибе (см. табл.6.14)

Таблица 6.14

Свойства клеевых материалов на основе слюды

Материал	Марка	Толщина, мм	Электрические параметры		
			$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\text{tg}\delta$	$E_p, \text{ МВ/м}$
Миканит коллекторный	КФШ, КФГ, КФП, КФГС и др.	0,4...1,5	$10^{10}...10^{12}$	0,01...0,03	19...22
Миканит коллекторный на аммофосе	КФА	0,7...1,2	$10^{11}...10^{12}$	0,008...0,01	20...23
Миканит формовочный	ФМГ, ФМК, ФФП и др.	0,4...1,5	$10^9...10^{11}$	-	25...40

Коллекторный миканит применяют в виде штамповочных прокладок, которые являются изоляцией между пластинами коллекторов электрических машин. Связующими для коллекторного миканита служит глифталь и другие смолы. Количество связующего вещества не более 4%, поэтому такой миканит имеет хорошие механические свойства.

Формовочный миканит применяют при изготовлении коллекторных манжет (изоляция коллектора от вала электрических машин), а также фланцев, каркасов катушек, трубок и других фасонных изделий. Содержание слюды от 80 до 95%.

Особая разновидность формовочного миканита – *микафолий*, имеющий с одной стороны подложку из бумаги, стеклоткани или стеклосетки. Микафолий изготавливается из мусковита или флогопита, связующее – глифталевый, полиэфирный или кремнийорганический лаки. Содержание слюды – 45...50%. Применяется для изоляции стержней обмоток машин высокого напряжения.

Гибкий миканит изготавливается из слюды на масляно-битумном, масляно-глифталевом или кремнийорганическом лаках. Выпускается также гибкий миканит, оклеенный с обеих сторон бумагой.

Разновидность гибкого миканита – микалента клеится из щепаной слюды в один слой. Микалента имеет с обеих сторон подложки из стеклоткани, стеклосетки или микалентной бумаги. Выпускается в виде роликов шириной от 10 до 35 мм. Микалента применяется в качестве основной изоляции обмоток электрических машин высокого напряжения.

Слюдиниты и слюдопласты.

Высокая трудоемкость изготовления щепаной слюды и миканитовой изоляции стимулировали разработку новых материалов из слюды без предварительной ручной щепки. Эти материалы называются слюдинитами и слюдопластами.

Слюдиниты – изготавливают из отходов слюды мусковита, подвергнутой термообработке при 900°C . При этой температуре кристаллы слюды, теряя воду, сильно вспучиваются. Вспученные кристаллы обрабатываются щелочными и кислотными растворами, тщательно промываются водой. Масса (пульпа) из измельченной слюды с водой выливается на сетку бумагоделательной машины. Полученная слюдинитовая бумага имеет толщину от 10 до 150 мкм.

Слюдинитовая бумага в сухом состоянии имеет электрическую прочность 15...20 МВ/м. Может быть получен и листовой слюдинит: для этого слюдинитовая бумага пропитывается и склеивается с подложками с использованием связующих – эпоксидных, кремнийорганических и других. Слюдинитовые материалы по своим свойствам приближаются к миканитовым.

Слюдопласты – производятся на основе слюдинитовой бумаги с использованием подложек и связующих. По сравнению со слюдинитами слюдопласты имеют более высокую механическую прочность, более высокую короностойкость. Слюдопласты выпускаются: коллекторные, прокладочные, формовочные.

6.12. Асбест и асбестовые материалы

Асбест группа материалов, обладающий волокнистым строением; наиболее распространенный тип асбеста **хризотилковый**: $3\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Основное месторождение асбеста находится на Урале (вблизи гор. Асбеста).

Преимуществом асбеста перед органическими волокнистыми материалами является высокая нагревостойкость ($300\text{--}400^{\circ}\text{C}$). Плавится асбест при 1150°C . Диэлектрические свойства асбеста невысоки.

Асбест широко применяется в различных областях электротехники в виде пряжи, ленты, ткани, бумаги, картона. Ленты выпускают толщиной 0,4...0,5 мм ткани – 1,6...2,9 мм, бумаги – 0,2...1,0 мм.

Асбест в качестве волокнистого наполнителя входит в состав пластмасс с различными связующими веществами.

Асбоцемент – твердый материал холодной прессовки, в котором наполнителем является асбест, а связующим – цемент.

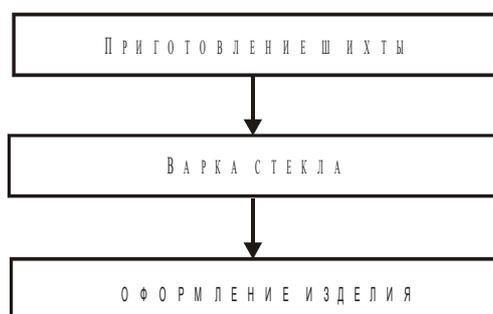
Асбоцемент выпускается в виде листов, щитов, труб. Для уменьшения гигроскопичности изделий из асбоцемента производится их пропитка.

6.13. Стекла

Стекла – неорганические аморфные вещества, представляющие собой сложные системы различных оксидов.

Электроизоляционные изделия из стекла выпускаются в виде стеклянных тканей, лент, а также в виде опорных, штыревых и подвесных изоляторов.

Общая схема технологического процесса производства изоляционных изделий из стекла представляется в виде:



В качестве сырьевых материалов для приготовления шихты используются:

кварцевый песок	-	SiO_2
сода	-	Na_2CO_3
поташ	-	K_2CO_3
известняк	-	CaCO_3
доломит	-	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$
сульфат натрия	-	Na_2SO_4
бура	-	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
борная кислота	-	H_3BO_3
сурьма	-	Pb_3O_4
коалин		
полевой шпат		

Компоненты шихты измельчают на специальных мельницах, сушат и тщательно перемешивают. Различные типы стекол требуют соответствующего процентного состава компонентов.

Приготовленная шихта загружается в печь, в которой шихта плавится, летучие составные части (H_2O , CO_2 , SO_3) удаляются, а оставшиеся оксиды химически реагируют между собой, в результате получается однородная стекломасса. Горячее стекло благодаря пластичности легко обрабатывается путем выдувания (ламповые баллоны и др.), вытяжки (листовое стекло, трубки), прессования и отливки. Все эти виды обработки стекломассы выполняются на специальном технологическом оборудовании. Существуют

также установки для производства стеклянных нитей, из которых на стеклопрядильных агрегатах изготавливают стеклянные ткани, сетки, ленты.

В зависимости от назначения выпускаются следующие виды электротехнических стекол.

Конденсаторные стекла используются в качестве диэлектрика конденсаторов.

Установочные стекла применяются для изготовления различных изоляторов.

Ламповые стекла применяются для баллонов и других деталей осветительных ламп.

Стекла с наполнителем: пластмассы на основе стекла и слюдяного порошка – микалекс.

Стеклоэмали – получают следующим образом: расплавленную стекломассу сливают тонкой струей в холодную воду; полученную *фритту* дробят на шаровой мельнице в тонкий порошок. Иногда к фритте перед размоллом добавляют небольшое количество глины. Для нанесения стеклоэмали на изделия их нагревают в печи, посыпают стеклопорошком, который, расплавляясь, покрывает изделия прочным стекловидным слоем.

Стеклоэмали используют в качестве изоляционных материалов для покрытия трубчатых резисторов. В таких резисторах на наружную поверхность керамической трубки помещается обмотка из нихромовой проволоки, поверх которой наплавляется слой стеклоэмали, создающий изоляцию между витками и защищающий обмотку от влаги, окисления при рабочей температуре до 300⁰С.

Стеклоэмали используются также в электроаппаратостроении для получения прочного и нагревостойкого электроизоляционного покрытия на металле; для устройства вводов в металлические вакуумные приборы. Стеклоэмали применяются и в некоторых видах конденсаторов.

Стекловолокна и стеклоткани.

Стеклянные волокна (диаметром 4-7 мкм) имеют настолько высокую гибкость, что к ним применимы приемы текстильной технологии.

Получение стекловолокна: стекло расплавляют в сосуде из тугоплавкого сплава. В дне сосуда имеются многочисленные отверстия (фильеры) диаметром около 1 мм. Расплавленная стекломасса под действием собственного веса вытекает из отверстий в дне сосуда в виде нитей. Нити наматываются на барабан со скоростью около 30 м/с, не успевая охладиться, вытягиваются в тонкое волокно.

Отдельные волокна (их число равно числу фильер) соединяются в одну прядь маслом, подаваемым из замасливателя. Благодаря этому, при дальнейшей перемотке нитей с барабана, не происходит спутывание волокон из различных прядей. Из стеклянных нитей, скрученных из отдельных волокон, ткнут стеклянные ткани. Такие же нити используют для изоляции обмоточных проводов.

Ткани и ленты из стекловолокна имеют толщину от 0,02 до 0,7 мм.

Преимущество стекловолокнистой изоляции по сравнению с органическими волокнами: высокая нагревостойкость, высокая механическая

прочность, относительно малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства.

6.14. Керамические материалы

Керамическими материалами (керамикой) называют неорганические материалы, изделия из которых подвергаются обжигу при высокой температуре. В результате происходящих в керамической массе сложных физико-химических процессов готовое (обожженное) изделие приобретает определенные свойства.

Фарфор в настоящее время является одним из основных изоляционных материалов (см. табл. 6.15).

Для изготовления фарфора используются специальные сорта глин (каолин – высококачественная светлая глина, а также другие виды огнеупорных пластичных глин) и минералы – кварцевый песок SiO_2 и полевой шпат.

В результате тщательного измельчения и перемешивания компонентов с водой образуется однородная фарфоровая масса. Затем прессовкой или отливкой получают изделия нужной конфигурации. Отформованные изоляторы и другие фарфоровые изделия покрывают слоем глазури.

Глазурные водные суспензии получают из тех же сырьевых материалов, которые идут для электрокерамики, но дополнительно вводят легкоплавкие материалы: доломит, магнезит, мел и пр.

При обжиге $1300\text{-}1400^\circ\text{C}$ глазурь плавится и покрывает поверхность фарфорового изделия гладким блестящим слоем. Глазурь защищает изделия из фарфора от проникновения внутрь влаги, улучшает внешний вид его.

Из стеклообразующих материалов в глазури применяют калиевые полевые шпаты. В некоторые глазури вводят буру ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), двуокись циркония (ZrO_2) и др.

Нормальный цвет глазури молочно-белый. Такой глазурью покрывают изоляторы для внутренних установок. Изоляторы для наружных установок покрывают коричневой глазурью. В качестве красителей используют окислы марганца и хрома.

Таблица 6.15

Материалы	Плотность, кг/м^3	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	ρ , Ом·м	ϵ	$E_{\text{пр}}$, МВ/м
Электрофарфор	2200	30...55	60...110	10^{12}	5...8	32
Ультрафарфор	3200	50...60	200...250	10^{13}	8,5	36

Список использованных источников

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. – М.: Машиностроение, 1986. – 542 с.
2. Сучков О.К. *Технология конструкционных материалов*. М.: «Колос», 1978. – 288 с.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. *Электротехнические материалы*. Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
4. Пасынков В.В., Сорокин В.С. *Материалы электронной техники*. М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.
5. Калинин Н.Н., Скибинский Г.Л., Новиков П.П. *Электрорадиоматериалы*. – М.: Высш. шк., 1981. – 293 с.
6. *Конструкционные и электротехнические материалы*. / Бородулин В.Н., Воробьев А.С., Попов С.Я. и др. под ред. Филикова В.А. – М.: Высш. шк., 1990. – 296 с.
7. *Электротехнические и конструкционные материалы*. / Бородулин В.Н., Воробьев А.С. и др. под ред. Филикова В.А. – М.: Мастерство: Высш. шк., 2000. – 280 с.
8. *Справочник по электротехническим материалам*. / Корицкий Ю.В., Пасынков В.В., Тареев Б.М. – М.: Энергоатомиздат. – Т.1. – 1986. – 308 с.; Т.2. – 1987. – 296 с.

Приложение 1

Важнейшие свойства металлов при 20⁰С

Металл	Темпер. плавл., °С	Плотность, кг/м ³	Удельн. тепл. емк., Дж/кг	Коэффициент теплопроводн., Вт/м·к	Удельн. сопротивл., мкОм·м	Работа выхода электронов, эВ
Ртуть Hg	-38,9	13600	138	10	0,958	4,5
Галий Ga	29,7	5910	381	-	0,56	-
Калий K	63,7	870	753	92	0,069	2,2
Натрий Na	97,8	970	1260	125	0,046	2,3
Индий In	156,0	7280	243	25	0,090	-
Олово Sn	232,0	7310	226	65	0,120	4,4
Кадмий Cd	321,0	8650	230	93	0,076	4,0
Свинец Pb	327,0	11400	130	35	0,210	-
Цинк Zn	420,0	7140	390	111	0,059	-
Магний Mg	651,0	1740	1040	167	0,045	3,6
Алюминий Al	657,0	2700	922	209	0,028	4,3
Серебро Ag	961,0	10500	234	415	0,016	4,4
Золото Au	1063,0	19300	126	293	0,024	4,8
Медь Cu	1083,0	8940	385	390	0,017	4,3
Бериллий Be	1284,0	1850	200	167	0,040	3,9
Никель Ni	1455,0	8900	444	95	0,073	5,0
Кобальт Co	1492,0	8710	435	79	0,062	-
Железо Fe	1535,0	7870	452	73	0,098	4,5
Титан Ti	1725,0	4500	577	15	0,480	-
Хром Cr	1850,0	7100	-	-	0,210	-
Платина Pt	1770,0	21400	134	71	0,105	-
Цирконий Zr	1860,0	6500	276	17	0,410	3,7
Иридий Ir	2350,0	22500	-	-	-	-
Ниобий Nb	2410,0	8570	272	50	0,140	4,0
Молибден Mo	2620,0	10200	264	151	0,057	4,2
Тантал Ta	2850,0	16700	142	54	0,0135	4,1
Вольфрам W	3380,0	19300	218	168	0,055	4,5

Приложение 2

Свойства германия и кремния

№ п/п	Свойства	Германий	Кремний
1.	Атомная масса	72,6	28,06
2.	Постоянная решетки, нм	0,566	0,542
3.	Плотность при 20 ⁰ С, кг/м ³	5300	2300
4.	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·к	55	80
5.	Средняя удельная теплоемкость, (0-100 ⁰ С), Дж/кг·к	333	710
6.	Температура плавления	936	1414
7.	Ширина запрещённой зоны при 20 ⁰ с, эВ	0,72	1,12
8.	Подвижность электронов, м ² /В·с	0,39	0,14
9.	Подвижность дырок, м ² /В·с	0,19	0,05
10.	Работа выхода электронов, эВ	4,8	4,3
11.	Диэлектрическая проницаемость	16	12,5

Приложение 3

Свойства полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$

№ п/п	Свойства	группа и соединение								
		фосфиды			арсениды			антимониды		
		AlP	GaP	InP	AlAs	GaAs	InAs	AlSb	GaSb	InSb
1.	Порядковый номер A^{III} B^V									
		13	31	49	13	31	49	13	31	49
		15	15	15	33	33	33	51	51	51
2.	Постоянная решётки, нм	0,542	0,545	0,587	0,564	0,565	0,605	0,613	0,609	0,648
3.	Плотность, Мг/м ³	2,4	4,1	4,8	3,6	5,4	5,7	4,3	5,7	5,8
4.	Подвиж- ность элек- тронов, м ² /В· с	0,008	0,019	0,50	0,03	0,95	3,30	0,02	0,40	10,00
5.	Подвиж- ность дырок, м ² /В·с	0,003	0,012	0,015	-	0,045	0,05	0,055	0,14	0,10

Приложение 4

Свойства синтетических полимеров

№ п/п	Полимеры	ρ , Ом·м	ϵ , при 20°C	$E_{пр.}$, МВ/м	Нагревостойкость, °C	Холодостойкость, °C	Плотность, кг/м ³
1.	Полистирол	$10^{14} \dots 10^{15}$	2,2...2,8	25...30	75	-60	1050
2.	Политетрафторэтилен	$10^{15} \dots 10^{16}$	1,9...2,2	20...30	250	-260	2300
3.	Полиэтилен	$10^{13} \dots 10^{15}$	2,1...2,4	15...20	80...90	-70	950
4.	Поливинилхлорид	$10^{13} \dots 10^{14}$	3,1...3,4	15...20	60...70	<10	1700
5.	Полиметилметакрилат	$10^{11} \dots 10^{12}$	3,6...3,8	20...35	70...90	-55	1200
6.	Полиамидные смолы	$10^{11} \dots 10^{12}$	3,8...4,8	15...20	100...120	-190	1150
7.	Полиэфирные смолы	$10^{11} \dots 10^{14}$	2,8...5,2	15...25	110...150	-100	1450
8.	Кремнийорганические смолы	$10^{12} \dots 10^{14}$	2,8...5,0	15...25	180...250	-60	1750
9.	Эпоксидные смолы	$10^{12} \dots 10^{13}$	3,3...6,0	20...80	120...140	-60	1250