М. В. РАДЧЕНКО

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебник

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
МОСКВА
КРАСНОДАР
2022

УДК 621.3
ББК 31.2я73

Р 15 **Радченко М. В.** Электротехническое материаловедение : учебник для вузов / М. В. Радченко. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 116 с. : ил. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-8114-9416-3

Учебник написан в соответствии с требованием государственного образовательного стандарта преподавания общепрофессиональных дисциплин и предназначен для освоения учебной дисциплины «Электротехническое материаловедение» при подготовке бакалавров и магистров по специальностям «Электроэнергетика и электротехника», «Машиностроение» (профиль «Оборудование и технологии сварочного производства»).

Учебник состоит из трех частей, в которых рассмотрены металловедение и термическая обработка металлов, диэлектрики и проводниковые материалы. Основное внимание в первой части учебника уделено строению металлов и их сплавов, влиянию химического состава и обработки на механические, электрические и тепловые свойства, классификации и марке конструкционных и электротехнических металлов и сплавов. Во второй части даны общие сведения о диэлектриках, описаны основные диэлектрические материалы, применяемые в электротехнике, их характеристики и области применения. В третьей части описаны основные свойства проводниковых материалов и области их применения.

Учебник предназначен для студентов технических вузов машиностроительных направлений и специальностей всех форм обучения. Может быть полезен для магистров, аспирантов, научных и инженерно-технических работников.

УДК 621.3
ББК 31.2я73

Рецензент
В. М. МАКИЕНКО — доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических комплексов Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

Обложка
П. И. ПОЛЯКОВА

© Издательство «Лань», 2022
© М. В. Радченко, 2022
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2022

ЧАСТЬ 1
МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

РАЗДЕЛ 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

1.1. Общие понятия в материаловедении

История развития материаловедения относится к концу XIX в., когда в 1878 г. русским металлургом Д. К. Черновым были опубликованы системные понятия о строении и качестве металлов.

Д. К. Чернов (1839–1921) — русский металлург и изобретатель, основоположник научной металлографии, профессор металлургии Михайловской артиллерийской академии в Петербурге (рис. 1.1).

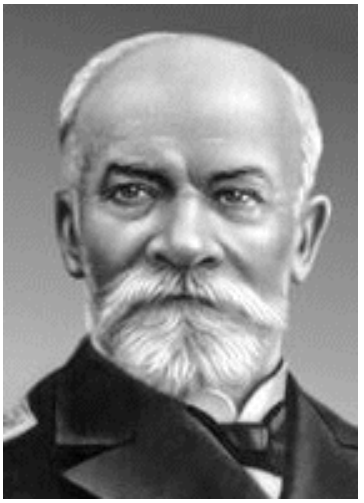


Рис. 1.1
Д. К. Чернов

К основным понятиям в материаловедении относятся следующие.

Компонент — химический элемент, входящий в состав материала.

Металл — поликристаллическое вещество, состоящее из множества элементарных объемов, называемых зерном.

Принципиально различают 3 основных формы зерна: дендритная, глобулярная, игольчатая. Размер зерна может достигать 0,01 мм.

Система — сочетание двух металлов и неметаллов, из которого состоит сплав.

Фаза — элементарный объем металла, имеющий четко выраженные границы, внутри которых сплав имеет одинаковые свойства.

Структура — общая картина внутреннего строения сплавов и неметаллических материалов.

Все электротехнические материалы подразделяются на:

1) металлы и их сплавы: стали, чугуны, цветные металлы и сплавы типа бронз, латуней, нихромов и др.;

2) неметаллы: проводники, сверхпроводники и криопроводники, неметаллические проводники, диэлектрические и волокнистые материалы, смолы, стекла, электроизоляционные лаки и компаунды, припои, флюсы, конструкционная керамика и др.

1.2. Общие свойства металлов

Основными свойствами, присущими большинству металлов, являются:

1) отражательная способность поверхности;

2) высокая тепло- и электропроводность;

3) положительный термический коэффициент электросопротивления;

4) повышенная способность к пластическому деформированию.

1.3. Кристаллическое строение металлов и сплавов

Для большинства используемых в практике металлов и сплавов существуют три основные вида элементарных кристаллических решеток.

ОЦК — объемно-центрированная кристаллическая решетка, в узлах которой находятся атомы металла и в центре куба еще один атом металла (Fe, Li, Ca, Cr, Mo, W, Nb).

ГЦК — гранецентрированная кристаллическая решетка, в центре граней которой находятся атомы металла (Cu, Al, Au, Pt, Ag).

ГПУ — гексагональная плотно упакованная решетка (Mg, Be, Ti_2).

Различное строение элементарных кристаллических решеток металлов, насыщенность их различным количеством атомов с различными размерами и свойствами определяют такое свойство как анизотропность.

Анизотропия — неодинаковость свойств металлов и сплавов в различных кристаллографических направлениях.

Реальные металлы и сплавы, как правило, псевдоизотропные.

1.4. Дефекты кристаллического строения

Принципиально различают три вида дефектов кристаллического строения:

1) точечные (вакансия — отсутствие в узле кристаллической решетки атома и межузельные атомы). Такого типа дефекты определяют вакансионный механизм диффузионного перемещения отдельных атомов внутри металлов и сплавов их твердом состоянии, что определяет такие свойства, как теплопроводность, электропроводность и т. п.;

2) линейные дефекты (дислокации) — цепь отсутствующих атомов;

3) плоскостные дефекты — отсутствие плоскости атомов.

Наличие дефектов кристаллического строения в металлах, сплавах и полимерах фактически определяет возможность большей или меньшей свободы диффузионного перемещения атомов, что, в конечном счете, определяет механические и физические свойства всех материалов (твердость, пластичность, электропроводность, магнитную проницаемость).

1.5. Виды соединений

Существует условное деление видов расплавов на жидкие растворы, твердые растворы, химическое соединения. Кроме того, существует понятие однофазных и многофазных твердых растворов.

В зависимости от атомного радиуса компонента, входящего в состав расплава, различают:

1) твердые растворы замещения;

2) твердые растворы внедрения;

3) частично или полностью упорядоченные твердые растворы.

Упорядоченные растворы являются промежуточной стадией между твердыми растворами и химическими соединениями.

Твердые растворы замещения образуются при соблюдении следующих требований:

1) одинаковый тип кристаллической решетки;

2) разница атомарных радиусов не превышает 15%;

3) принадлежность компонентов к одной группе периодической системы Менделеева.

Характеристика химических соединений:

1) химические соединения имеют существенно более сложную химическую решетку, чем входящие в него компоненты;

2) физические свойства химических соединений резко отличаются от свойств компонентов;

3) процесс образования химического соединения происходит со значительным тепловым эффектом.

Металлические соединения типа оксидов, боридов, карбидов — соединения с легкими элементами (азот, водород).

1. Механические смеси — смеси двух и более компонентов, имеющие четко выраженные границы и различные свойства составляющих.

2. Твердые растворы:

а) *твердые растворы замещения* образуются при перемещении атомов из своей кристаллической решетки на место вакансии в решетке другого элемента (Fe–Cr, Fe–Mo и др.);

б) *твердые растворы внедрения* образуются при размещении атомов одного компонента в кристаллической решетке другого компонента. Такой тип растворов чаще всего относится к соединениям металлов (Fe, Cr, W и др.) и неметаллов (C и др.);

в) *интерметаллидные соединения*. Такой тип соединений называется упорядоченным твердым раствором. В этом случае ряд плоскостей одного элемента замещается плоскостью другого с последовательным чередованием плоскостей (Ni–Al, Ni–Ti и др.).

Упорядоченные твердые растворы обладают резко отличными от исходных материалов свойствами, включая температуру плавления, электропроводность, температурный диапазон, пластическую деформацию, плотность, твердость, конструктивную прочность.

Упорядоченные твердые растворы являются одними из наиболее перспективных материалов в ближайшие десятилетия.

Диаграмма состояния двойных сплавов строится по методу Н. С. Курнакова: термический анализ кривых охлаждения сплавов с последовательным рядом содержания одного компонента в другом.

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение строения сплавов в зависимости от температуры и химического состава. Диаграммы состояния могут быть построены для сплавов, состоящих из двух, трех и более компонентов. На рисунке 1.2 изображена диаграмма состояния сплавов двух металлов при отсутствии взаимной растворимости. По оси ординат откладывается температура. Ось ординат соответствует чистому металлу (А или В).

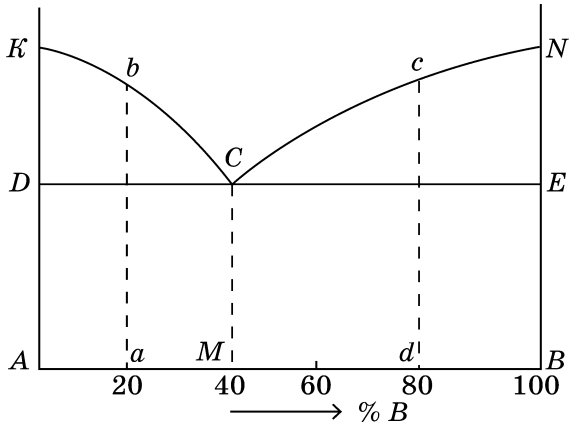


Рис. 1.2

Диаграмма состояния сплава двух металлов при отсутствии взаимной растворимости

По оси абсцисс откладывается концентрация. Общее содержание обоих компонентов в сплаве 100%, и каждая точка на оси абсцисс соответствует определенному содержанию каждого компонента. Например, точка «а» соответствует 20% компонента В и 80% компонента А. Каждая вертикаль (ав и dc), проведенная через точку на горизонтальной оси, соответствует изменению температуры определенного сплава. Каждая точка на диаграмме состояния определяет состояние сплава заданного химического состава при данной температуре. Линия KCN называется линией *ликвидус*. Сплав выше этой линии находится в жидком состоянии, а сама линия соответствует началу кристаллизации.

Линия DCE, соответствующая концу кристаллизации, называется линией *солидус*. В области, ограниченной линиями KC, CD, DK, сплав находится в двухфазном состоянии — жидкая фаза и кристаллы А. В области, ограниченной линиями CN, NE и EC, — из жидкой фазы и кристаллов В. В точке С жидкая фаза кристаллизуется в твердую механическую смесь — эвтектику, состоящую из кристаллов А и В. Эвтектика всегда имеет определенный химический состав. Температура плавления ее ниже температуры плавления компонентов А и В. Ниже линии солидус сплав находится в твердом состоянии и состоит из А + Э левее СМ и из В + Э правее СМ.

Рассмотренная диаграмма — одна из множества диаграмм состояния сплавов, которые встречаются на практике. Приведем еще несколько простых диаграмм, которые могут встречаться в более сложных диаграммах состояниях.

На рисунке 1.3 показана диаграмма состояния при неограниченной растворимости в жидком и твердом состояниях. DNC — линия ликвидус, DMC — линия солидус.

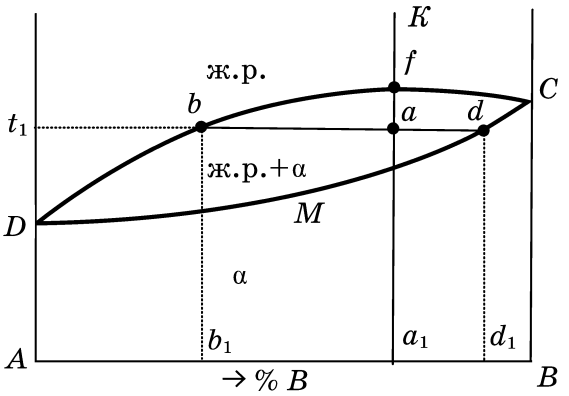


Рис. 1.3

Диаграмма состояния при неограниченной растворимости компонентов в жидком и твердом состояниях

Между ликвидусом и солидусом сплав состоит из жидкой фазы и твердого раствора (α). Ниже линии солидус — твердый раствор α.

На рисунке 1.4 изображена диаграмма состояния двух металлов, полностью взаиморастворимых в жидком состоянии и частично в твердом.

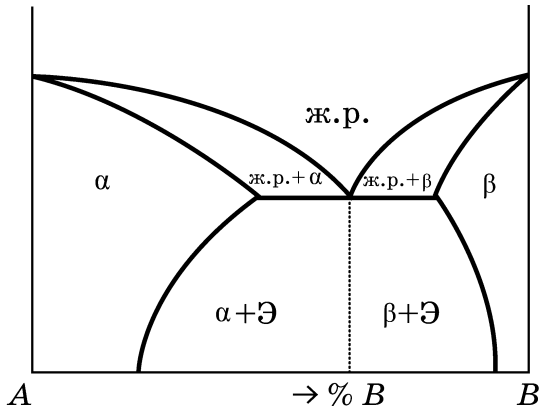


Рис. 1.4

Диаграмма состояния двух металлов, полностью взаиморастворимых в жидком состоянии и частично в твердом

Как видно из диаграммы, она уже имеет элементы двух предыдущих диаграмм: образование твердых растворов и образование эвтектики.

Основные физические свойства металлов и сплавов, имеющие практическое значение:

1) твердость;
2) температура плавления;
3) плотность;
4) тепловое расширение;
5) теплопроводность;
6) электропроводность;
7) магнитные свойства.

Температура плавления

Существует условное деление на легкие (Al имеет температуру плавления 660°C, Sn — 326°C), тугоплавкие (W — 3142°C, Fe — 1539°C) и промежуточные (Au — 1063°C, Cu — 1084°C) металлы.

Тепловое расширение

Характеризуется коэффициентом α (град$^{-1}$) линейного (объемного) расширения. Разница коэффициентов α для различных металлов колеблется в диапазоне от 0 до 90^{-6} град$^{-1}$.

Из сплавов, у которых низкий коэффициент α, наиболее известным является сплав железа с никелем (Fe–Ni (36% Ni)) под названием нивар. В сплавах, в которых не происходит структурное изменение, слабо проявляется изменение коэффициента объемного расширения. У сплавов, в которых происходит структурное превращение, коэффициент α может изменяться в 2 раза, что является основой дилатометрического метода определения фазовых превращений. Термическая обработка, также как и состав сплава, сильно влияет на коэффициент α.

Теплопроводность

Характеризуется коэффициентом λ (Вт/м·К).

При постоянной температуре у большинства легированных сталей изменение λ составляет ±10%. В то же самое время у железа λ при 100°C изменяется в 5 раз.

$\lambda_{стали}$ = 45,4 Вт/м·К.

λ_{Al} = 209,3 Вт/м·К.

λ_{Ar} = Вт/м·К.

Вопросы для самопроверки

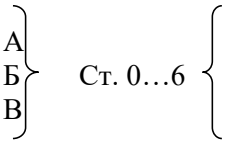
1. Какие кристаллические решетки характерны для металлов?
2. Что называется анизотропией?
3. Какие существуют объемные дефекты? Точечные дефекты? Линейные дефекты? Плоскостные дефекты?
4. Что такое дислокации и их влияние на свойства металлов?
5. Что такое компонент? Фаза?
6. Какие существуют твердые растворы?
7. Что такое механические смеси?
8. Что такое диаграмма состояния?

РАЗДЕЛ 2. МАРКИРОВКА СТАЛЕЙ

По химическому составу, согласно ГОСТ 380-2005, стали подразделяются на углеродистые и легированные, по применению — на конструкционные и инструментальные.

По качеству углеродистые стали подразделяют на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные.

Маркировка сталей обыкновенного качества



А — сталь с регламентом по *механическим свойствам* (твердость, прочность и т. п.).

Б — сталь с регламентом по *химическому составу.*

В — сталь с регламентом как *по механическим свойствам, так и по химическому составу.*

0...6 — порядковый номер стали (находится по справочнику сталей).

Для удаления неметаллических включений (окислов, газов и пр.) из стали при ее выплавке выполняют так называемое «раскисление». Для этого в жидкую сталь добавляют шихту. При этом в жидкой стали образуются соединения, всплывающие на поверхность и создающие эффект «кипения». Затем они удаляются механически, и сталь становится чище и качественнее.

В зависимости от степени раскисления стали различают на:

сп — спокойная;

пс — полуспокойная;

кп — кипящая.

Например:

АСт3кп (обычно буква А не пишется)

БСт3кп

Маркировка инструментальных сталей

У7……..У16

0,7–1,6% углерода

Маркировка конструкционных сталей

Сталь 10……..Сталь 70

0,1%…….0,7% углерода

Маркировка легированных сталей

В *легированных сталях* русская буква означает компонент: без указания цифры — до 1%, с указанием цифры — его среднее значение в сплаве.

А — азот	Е — селен	Р — бор
Б — ниобий	К — кобальт	С — кремний
В — вольфрам	М — молибден	Т — титан
Г — марганец	Н — никель	Ф — ванадий
Д — медь	П — фосфор	Х — хром
Ч — редкоземельные элементы		Ю — алюминий

Примеры:

Конструкционная сталь 18Х2Н4ВА имеет следующий химический состав: 0,18% С, ~2% Cr, ~4 % Ni, ~1% W. Буква А означает, что эта сталь более качественная по содержанию серы и фосфора (S_i, Р — вредные для сталей элементы, выводимые из расплава при плавке стали).

Инструментальная сталь 4ХВ2С имеет следующий химический состав: 0,4% — С, ~1% Cr, ~2% W, ~1% Si.

Вопросы для самопроверки

1. Маркировка легированных сталей.
2. Маркировка легированных сталей, например: 18Х2Н4МА, 65Г, 08Х19Н10Г2Б.
3. Маркировка сталей обыкновенного качества.
4. Маркировка качественных и высококачественных сталей.
5. Маркировка углеродистых сталей обыкновенного качества, например: Ст3пс, Ст6кп, Ст5сп.

РАЗДЕЛ 3.
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

3.1. Твердость металлов и сплавов

Твердость — это способность материала сопротивляться вдавливанию в него другого материала (индентора).

Существует несколько способов измерения твердости вдавливанием: по Бринеллю (НВ); по Роквеллу (HRA, HRB, HRC); по Виккерсу (HV).

1. НВ — твердость по Бринеллю. Эта методика предполагает вдавливание в исследуемый материал на специальном прессе стального закаленного шарика диаметром 10 мм. В результате на поверхности образца образуется отпечаток, диаметр которого измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Шарик вдавливают с помощью пресса (рис. 3.1) (существуют и другие конструкции). Образец устанавливают на столике *1* зашлифованной поверхностью кверху. Поворотом маховика *2* столик прибора поднимают так, чтобы шарик в оправке *4* мог вдавиться в испытуемую поверхность. Затем включают электродвигатель *5*, который сначала перемещает коромысло и постепенно нагружает шток, а следовательно, и вдавливает шарик под действием нагрузки *3*, сообщаемой привешенным коромыслу грузом. Эта нагрузка действует определенное время, после чего вал, вращаясь в обратном направлении, снимает нагрузку.

Твердость измеряют по формуле

$$HB = 0{,}120 \cdot 2P / \pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}),$$

где P — нагрузка, Н; D — диаметр шарика, мм; d — диаметр отпечатка, мм.

На практике твердость чаще определяют по таблицам.

Данный способ используется для определения твердости относительно мягких материалов: незакаленных сталей, чугунов, меди, алюминия и других цветных металлов и их сплавов.

Условная нагрузка на индентор — до 3000 кГс.

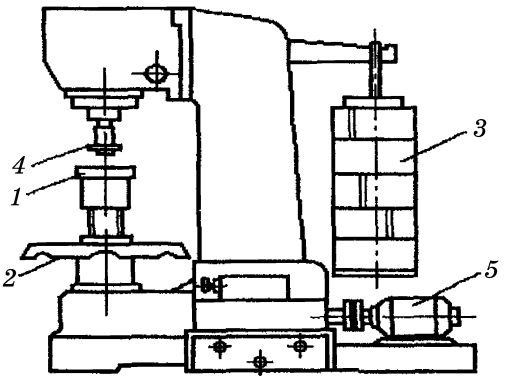


Рис. 3.1
Схема прибора для измерения твердости по Бринеллю (вдавливанием стального закаленного шарика)

2. HRC — твердость по Роквеллу. В этом случае в качестве индентора используется стальной конусный наконечник с углом конуса 120°. Используется для стальных закаленных и высокопрочных неметаллических материалов. Нагрузка на индентор — до 120 кГс.

3. HV — твердость по Виккерсу. Твердость по Виккерсу используется для определения твердости тонкопленочных покрытий и твердости отдельных структурных фазовых составляющих. Нагрузка на индентор (алмазная пирамида с углом при вершине 136°) — порядка 2,5–5 кГс.

H_{μ} — микротвердость, используется для определения свойств мелких структурных фазовых составляющих и анализа свойств границ между фазами. При этом используется алмазная пирамида при нагрузке на индентор 25, 100, 200, 500 Гс.

3.2. Определение прочности материала

Прочность — способность материала сопротивляться разрушению при линейной или объемной деформации.

Для определения прочности, упругости и пластичности материал в виде образцов круглой и плоской формы испытывают на расстояние. Испытания производят на разрывных машинах. В результате испытаний получают диаграмму растяжений (рис. 3.2).

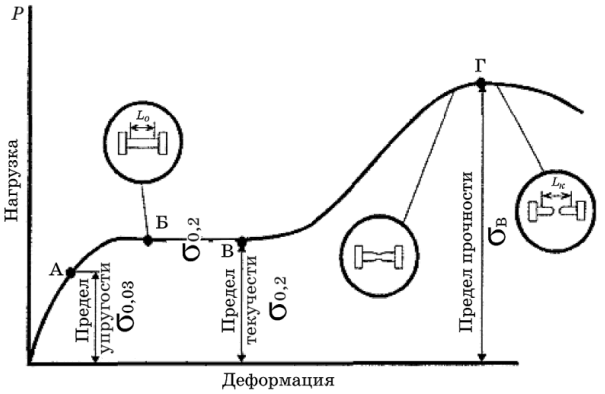


Рис. 3.2
Диаграмма растяжения

Предел прочности $\sigma_в$ (временное сопротивление) — условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца

$$\sigma_в = \frac{P_{max}}{F_c},\ \text{МПа (кгс/мм}^2\text{)},$$

где P_{max} — наибольшая нагрузка (точка Г диаграммы); F_0 — начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца.

Предел текучести $\sigma_т$ — наименьшее напряжение, при котором образец деформируется.

$\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала, при котором остаточная деформация образца составляет 0,2%.

Площадку текучести имеют в основном только пластичные материалы. Другие сплавы площадки текучести не имеют. Для таких материалов определяют условный предел текучести, при котором остаточное удлинение достигает 0,2% от расчетной длины образца:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2x}}{F_c},\ \text{МПа (кгс/мм}^2\text{)},$$

где $P_{0,2}$ — условная нагрузка предела текучести.

Ударная вязкость — это способность материала сопротивляться динамическим нагрузкам. Определяется как отношение затраченной на излом образца работы А к площади его поперечного сечения F в месте надреза:

$$KC = \frac{A}{F}, \quad \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2}.$$

KCU — ударная вязкость стандартного образца 10×10×55 мм с U-образным надрезом. Эта методика используется преимущественно для исследования стали после закалки и твердосплавных материалов.

KCV — методика, используемая для более пластичных материалов.

KCT — методика определения вязкости отожженных сталей и пластичных материалов, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$.

3.3. Эксплуатационные свойства

Один из видов постепенного разрушения — это разрушение от износа — явление столь же частое, как и разрушение от усталости. Часто износ является следствием трения двух поверхностей. В процессе трения у менее износостойкого материала (обычно, но не всегда, менее твердого) износ больше. Износ состоит в отрыве отдельных частиц. Важное значение при износе имеет химическое и физическое взаимодействие трущихся пар.

Как правило, износостойкость различают по условиям, в которых работают детали машин, узлы и агрегаты:

1) в условиях сухого трения;
2) в условиях масляного трения;
3) при высокотемпературном газоабразивном изнашивании при температуре 500°С и выше;
4) при работе в агрессивных средах (коррозионная стойкость).

Наряду с этим существует изнашивание так называемых «жестко» закрепленных частиц и «не жестко» закрепленных частиц.

Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию принято называть *износостойкостью.*

Износостойкость весьма сильно зависит от условий трения.

При постоянных условиях трения имеют место три стадии изнашивания: 1) период приработки, при котором происходит интенсивное изнашивание, изменяется микрогеометрия поверхности и материал наклепывается; эти процессы обеспечивают упругое контактное взаимодействие тел; после приработки устанавливается равновесная шероховатость поверхности, характерная для заданных условий трения, которая в дальнейшем не изменяется и непрерывно воспроизводится; 2) период установившегося износа, в течение которого интенсивность износа минимальна для заданных условий трения; 3) период катастрофического износа.

Изнашивание происходит в результате механического, коррозионно-механического, эрозионного, кавитационного или усталостного воздействия.

К *механическому изнашиванию* относят абразивное, гидроабразивное, газоабразивное, эрозионное, кавитационное и усталостное изнашивание.

Абразивное изнашивание материала происходит в результате режущего или царапающего действия твердых тел или частиц. Абразивные частицы — это частицы грязи, пыли, песка. Они попадают между контактирующими поверхностями со смазкой или из воздуха, а также могут появиться в результате развития других видов изнашивания (схватывания, выкрашивания, окисления). Абразивное изнашивание является типичным для многих деталей горных, буровых, строительных, дорожных, сельскохозяйственных и других машин, работающих в технологических средах, содержащих абразивные частицы.

Изнашивание, происходящее в результате воздействия твердых тел или частиц, увлекаемых потоком жидкости, называют *гидроабразивным изнашиванием.* Оно имеет место в мешалках, колесах и корпусах насосов, в шнеках и т. д.

Если абразивные частицы увлекаются потоком газа, как это имеет место в дымоходах и воздуходувках, то вызываемое ими изнашивание называют *газоабразивным изнашиванием.*

Эрозионное изнашивание происходит в результате воздействия потока жидкости или газа на поверхность.

Под *кавитационным изнашиванием* понимают изнашивание поверхности при относительном движении твердого тела в жидкости в условиях кавитации. В условиях кавитации работают гребные винты, гидротурбины, детали машин, подвергающиеся водяному охлаждению, трубопроводы.

При образовании продуктов химического взаимодействия металла со средой (изнашивание при фреттинг-коррозии и окислительное) возникает *коррозионно-механическое изнашивание.*

При длительном трении сопряженных поверхностей в случае нормального износа окислительное изнашивание наблюдается в подшипниках скольжения, валах, втулках, поршневых кольцах и т. д.

Изнашивание при фреттинг-коррозии происходит в болтовых и заклепочных соединениях, посадочных поверхностях подшипников качения, шестерен, муфт и других деталей, находящихся в подвижном контакте. Для образования фреттинг-коррозии достаточны даже весьма малые относительные перемещения с амплитудой 0,025 мкм.

Причиной изнашивания является непрерывное разрушение защитной окисной пленки в точках подвижного контакта.

В результате одновременного механического воздействия и воздействия молекулярных или атомных сил наступает изнашивание, получившее название *молекулярно-механического.* К нему следует отнести изнашивание при заедании. Это результат схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность. Такие повреждения возникают там, где между поверхностями контакта исчезают разделяющие их смазочные слои, адсорбированные пленки жира, влаги, газов, пленки окислов и др., и эти поверхности под действием нагрузки сближаются на расстояние межатомного взаимодействия.

Изнашивание при заедании наблюдается на зубчатых колесах, подшипниках скольжения и т. д.

Слой смазки устраняет непосредственный контакт двух поверхностей, благодаря чему не только уменьшаются силы трения, но создаются условия для устранения или уменьшения износа поверхностей. Смазка предотвращает схватывание при трении и обеспечивает хорошую прирабатываемость.

Для многих сталей с повышением твердости (при некотором запасе пластичности) относительная износостойкость возрастает. Повышение износостойкости стали достигается химико-термической обработкой, упрочнением поверхности путем механического наклепа или наплавки, образованием промежуточных пленок, предотвращающих непосредственный металлический контакт (фосфатирование, сульфоцианирование и др.).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое прочность?
2. Что такое предел прочности? Предел текучести? Условный предел текучести? Обозначение и размерность.
3. Что такое упругость? Чем оценивается упругость?
4. Что такое пластичность? Чем оценивается пластичность?
5. Что такое ударная вязкость? Обозначение и размерность.
6. Что такое твердость?
7. Какие существуют методы определения твердости и когда их применяют?
8. Какая разница между вязким и хрупким разрушением?
9. Что такое износостойкость?
10. Какие существуют стадии изнашивания?
11. Какие существуют виды изнашивания?

РАЗДЕЛ 4. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ «ЖЕЛЕЗО — ЦЕМЕНТИТ»

Диаграмма состояния и структура

Диаграмма состояния и структура сплавов железа с углеродом изучены только частично.

При обычных, относительно небольших скоростях охлаждения (например, несколько градусов в минуту) исследованная часть диаграммы состояния сплавов железа с углеродом имеет вид, показанный на рисунке 4.1 сплошными линиями.

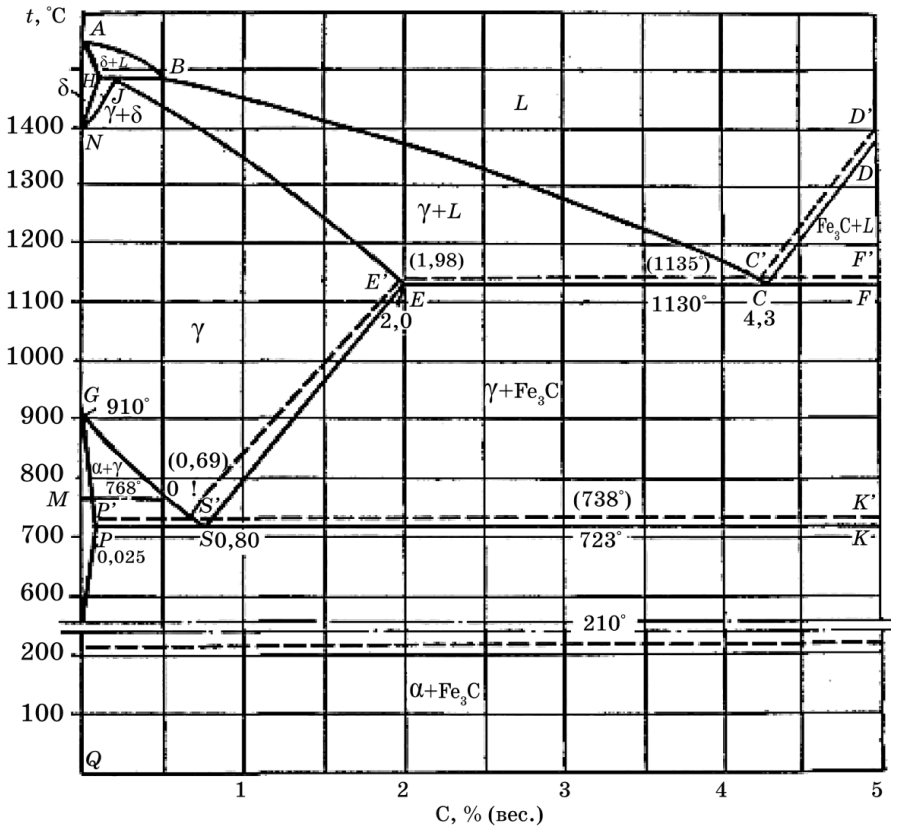


Рис. 4.1
Диаграмма состояния «железо — углерод» (по совокупности работ)

Согласно этой диаграмме, железо образует с углеродом химическое соединение — карбид железа Fe_3C.

Это соединение может считаться самостоятельным компонентом, вследствие чего данную систему возможно рассматривать как систему Fe — Fe_3C.

Если бы не существовало аллотропических превращений железа, то диаграмма состояния относилась бы к числу простейших диаграмм эвтектического

типа. Наличие аллотропических превращений усложняет диаграмму, увеличивая число возможных фаз и их взаимных превращений.

Как видно из диаграммы, на основе решеток аллотропических форм железа (δ, γ и α) образуется целая серия твердых растворов углерода в железе — δ, γ, α, для обозначения которых принята та же символика.

При кристаллизации бедных углеродом сплавов по ликвидусу *AB* и солидусу *AH* происходит выделение кристаллов δ-твердого раствора. Твердый раствор δ, имеющий решетку центрированного куба, при температуре 1490°С (температура предельного насыщения δ-раствора углеродом) содержит 0,10% С (точка Н). При 1400°С происходит перитектическая реакция между насыщенным δ-раствором и жидкостью, содержащей 0,50% С (точка В), в результате которой образуется новая фаза: γ-твердый раствор углерода в γ-железе, содержащий 0,18% С (точка I).

При содержании углерода выше 0,50% при охлаждении сплавов происходит кристаллизация γ-твердого раствора непосредственно из жидкости (по ликвидусу *BC* и солидусу *IE*).

Предельная растворимость углерода в γ-железе, отвечающая температуре 1130°С, приближается к 2,0% С (точка Е). При дальнейшем понижении температуры с 1130°С растворимость углерода в γ-железе падает по линии TS и при температуре 723° составляет всего 0,80% С (точка *S*). По линии ES между указанными температурами происходит выделение карбида железа из γ-раствора.

Твердый раствор γ почти также неустойчив при низких температурах, как и γ-фаза в чистом железе. По мере увеличения содержания углерода температура перестройки δ-решетки в α-решетку понижается, а сама перестройка в полном соответствии с правилом фаз протекает не при постоянной температуре (как в чистом железе), а в интервале температур, как это показано кривыми *GS* и *GP*.

Кривая выделения α-фазы из γ-фазы, т. е. кривая *GS*, пересекается с кривой *ES*, по которой, как уже сказано ранее, выделяется карбид железа. Точка *S* пересечения обеих кривых является эвтектоидной точкой с координатами 723°С и 0,80% С. В точке S при охлаждении сплава происходит одновременное выделение насыщенного α-раствора и карбида железа из γ-раствора эвтектоидной концентрации.

Насыщенный углеродом твердый раствор α по типу решетки аналогичен δ-твердому раствору и при эвтектоидной температуре 723°С содержит 0,02% С (точка *P*). При последующем охлаждении растворимость углерода в железе значительно уменьшается и при обычной комнатной температуре составляет тысячные доли процента (точка *Q*).

В сплавах, содержащих более 2,0% С (т. е. в области чугунов), кристаллизация начинается либо с выделения γ-раствора по линии *BC* (если содержание углерода ниже 4,3%), либо с выделения карбида железа по недостаточно точно известной линии *CD* (при содержании углерода выше 4,3%). После выделения избытка первичной фазы во всех сплавах, содержащих более 2,0% С, происхо-

дит эвтектическая кристаллизация γ-раствора и карбида железа в точке *C*, координаты которой 1130°С и 4,3% С.

Добавочное усложнение вносит линия *MO*, указывающая на магнитное превращение.

Каждая из фаз системы железо — углерод имеет свое общепринятое, интернациональное наименование. Такие же наименования имеют и эвтектическая и эвтектоидная смеси. В таблице 4.1 приведены эти наименования и указаны причины выбора того или иного названия.

Таблица 4.1

Наименования структурных составляющих системы железо — углерод

Фаза или смесь фаз	Наименование	Происхождение наименования
Твердый раствор углерода в α-железе (также в δ-железе)	Феррит	От латинского Ferrum — железо
Твердый раствора углерода в γ-железе	Аустенит	В честь английского металлографа Roberts Austen
Карбид железа Fe_3C (точнее, твердый раствор железа в карбиде железа)	Цементит	Указание на твердость этой фазы
Эвтектическая смесь твердого раствора углерода в γ-железе с карбидом железа	Ледебурит	В честь германского металлурга Ledebur
Эвтектоидная смесь твердого раствора углерода в α-железе с карбидом	Перлит	Указание на перламутровый отлив шлифа этой смести при травлении

Величина растворимости железа в карбиде железа точно не известна, а поэтому для сокращения употребляется термин «карбид», хотя, конечно, и это есть твердый раствор железа в карбиде.

При очень малых скоростях охлаждения вместо цементита прямо из жидкости может кристаллизоваться углерод-графит, а вместо эвтетики аустенита с цементитом может образоваться эвтетика аустенита с углеродом-графитом. Поэтому для случая очень медленного охлаждения часть линий диаграммы состояния железо — углерод имеет несколько другой вид, показанный на рисунке 4.1 пунктиром. В этом случае вместо карбида железа образуется свободный углерод-графит. Фазу, образованную свободным углеродом или, вернее, раствором некоторого количества железа в углероде, принято называть просто графитом.

Для большей наглядности обе возможные диаграммы состояния наложены одна на другую. Линии железо-графитной системы идут выше, чем линии железо-цементитной системы. Очевидно, что система железо — графит является более устойчивой, более близкой к состоянию полного равновесия, чем система железо — цементит. Это видно также и из того, что при нагревании — высокоуглеродистых сплавов, содержащих много цементита, происходит распад его на феррит и графит по реакции: $Fe_3C - 3Fe + C$.

Диаграмму с двойными линиями, представленную на рисунке 4.1, следует рассматривать как проекцию на одну плоскость двух сечений пространственной диаграммы системы железо — углерод, дающей зависимость температур превращений не только от концентрации, но и от скорости охлаждения.

При средних скоростях охлаждения часть сплава может закристаллизоваться по графитной, а часть по цементитной системе. То же получается, если ускорить охлаждение в процессе кристаллизации. В обоих случаях удается заметить, что пластинки графита врезаются в цементитную эвтектику (рис. 4.2). Таким образом, установлено, что графит и графитная эвтектика могут кристаллизоваться прямо из жидкости.



Рис. 4.2
Прямая кристаллизация графитной эвтетики (по Л. А. Долинской). Зафиксировано закалкой из полужидкого состояния

Получаемые построением по экспериментальным данным линии диаграммы цементитной системы так же, как и линии графитной системы, в отличие от линий диаграммы истинного равновесия фаз, не являются строго определенными, а смещаются в зависимости от скорости охлаждения. Особенно сильно могут смещаться линии распада твердого раствора углерода в γ-железе, т. е. аустените. То положение линий, которое дается на диаграмме рисунка 4.1 (сплошные линии), справедливо для скорости охлаждения порядка до нескольких десятков градусов в минуту. При скоростях в сто и больше градусов в минуту линии распада твердого раствора уже заметно смещаются в сторону более низких температур (переохлаждение на гистерезис), а при скоростях охлаждения в несколько сот градусов в секунду распад аустенита происходит на несколько сот градусов ниже, чем обычно. Поэтому все выводы, вытекающие из диаграммы рисунка 4.1, применимы непосредственно только к сравнительно медленно охлажденным сплавам, а для больших скоростей охлаждения требуется ряд оговорок.

При обычных способах нагрева перегреть какое-либо вещество выше точек превращения удается только на очень небольшое число градусов. Поэтому практически все выводы из диаграммы состояния, построенной при малых скоростях охлаждения, когда точка *Ar* почти совпадает точкой *Fc* или отличается от нее на малую величину, можно прилагать ко всем процессам, совершаю-

щимся при нагревании, за исключением случаев особо быстрого нагрева, как, например, при нагреве токами высокой частоты.

Положение линии ликвидуса лишь в слабой степени зависит от скорости охлаждения.

Для того чтобы в дальнейшем судить о свойствах сталей и чугунов, надо ближе ознакомиться со структурой и свойствами железоуглеродистых сплавов.

Так как медленно охлажденные сплавы, согласно диаграмме рисунка 4.1, состоят, в конечном счете, из феррита и цементита или из феррита и графита, то прежде всего надо ознакомиться с характеристикой этих фаз.

Стали — сплавы железа с углеродом при содержании последнего до 2,14%.

Линия ликвидус — это линия, соответствующая множеству точек, являющихся температурами плавления сплавов с различным содержанием углерода.

Линия солидус соответствует температурам затвердевания сплавов.

Феррит — это твердый раствор углерода в ОЦК решетки железа с максимальным содержанием углерода до 0,02%. Под микроскопом феррит имеет вид плоских зерен со светлой окраской (рис. 4.3). Твердость феррита соответствует НВ 80.

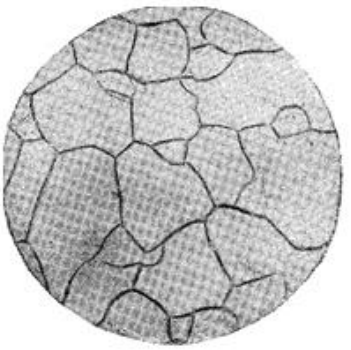


Рис. 4.3
Феррит с 0,03% С. × 200

Цементит — химическое соединение железа с углеродом Fe_3C, карбид железа с твердостью НВ 800.

Перлит — механическая смесь феррита и цементита с перламутровым оттенком под микроскопом. В смеси содержится в ней 0,8% углерода. Твердость перлита НВ 220.

Аустенит — твердый раствор углерода в ГЦК решетки железа с максимальной растворимостью углерода 2,14% при t = 1147°С.

Графит мягок и в то же время хрупок; по сравнению с металлами плохо проводит ток, однако хорошо проводит тепло, не плавится даже при температурах 3000...3500°С. Графит имеет некомпактную гексагональную решетку. Кристаллы графита очень легко расщепляются (подобно слюде) параллельно плоскости базиса гексагональной призмы.

Для определения фазового состава сталей существует правило отрезков:

а) в состав стали входят те фазы, которые находятся по краям горизонтальной линии при заданной температуре;

б) количественное соотношение фаз при заданной температуре определяется обратной пропорцией противоположных отрезков.

На диаграмме железо — цементит различают горизонтальные линии, соответствующие температуре фазовых превращений:

$$A_1 = 727°C,$$

где A_1 — температура нагрева стали под закалку с перегревом на 30...50°С.

Вопросы для самопроверки

1. Назвать основные компоненты железоуглеродистых сплавов.
2. Назвать критические точки в системе железо — цементит.
3. Какие фазы образуются в системе железо — цементит и железо — графит?
4. Что такое феррит, аустенит, перлит, цементит?
5. Какие сплавы называются сталями и чугунами?
6. Определить марку стали, если в ее структуре 30% перлита, а остальное — феррит.
7. Какие чугуны называются белыми? серыми?
8. Правило отрезков.
9. Какая существует связь между диаграммой состояния и свойствами сплавов?

РАЗДЕЛ 5. ЧУГУНЫ

По отношению к перлиту (эвтектоиду) стали подразделяются на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.

Сплавы железа и углерода с содержанием последнего более 2,14% называется чугунами.

Ледебурит (эвтектика) — это механическая смесь перлита и цементита первичная до A_1, и смесь аустенита и цементита первичного выше A_1.

По отношению к эвтектике чугуны делятся на доэвтектические, заэвтектические и эвтектические.

По наличию графита (углерода в чистом виде) чугуны подразделяются по цвету излома на белые и серые.

По форме графита чугуны различаются на чугуны с пластинчатым, хлопьевидным и шаровидным графитом.

Размеры в графитовых включениях в серых чугунах зависят от:

1) количества углерода в самом чугуне;
2) скорости охлаждения при выплавке.

Наличие и количество дополнительных центров кристаллизации

Для сочетания конструктивной прочности детали работающей на износ с высокой износостойкостью поверхности используют операцию отбеливания, которая осуществляется нагревом поверхности выше температур фазовых превращений каким-либо источником нагрева (индукционными, лазерными или электронными лучами, пламенем газовой горелки).

Маркировка серых чугунов

По виду металлической основы чугуны подразделяются на ферритные, ферритно-перлитные и перлитные.

СЧ — серый чугун. Серый чугун с пластинчатым графитом маркируется буквами и двумя цифрами, которые показывают минимальное значение предела прочности чугуна на растяжение.

Например, СЧ 25 — серый чугун с пределом прочности при растяжении $\sigma_{в.раст}$ = 25 МПа (кгс/мм^2).

КЧ; ковкий чугун. Ковкий чугун — это чугун с хлопьевидным графитом, который получается из белого чугуна в результате специального графитизирующего отжига.

Ковкий чугун маркируется следующим образом:

КЧ; число, показывающее $\sigma_в$; число, показывающее δ.

Например: КЧ30-6, т. е. $\sigma_в$ (не менее) 30 МПа (кгс/мм^2), δ (не менее) 6%.

ВЧ — высокопрочный чугун. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом маркируется буквами ВЧ и цифрами, показывающими предел прочности в десятых долях МПа (ГОСТ 7293-85).

Например, ВЧ70 — высокопрочный чугун с $\sigma_в$ = 700 Мпа.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое ледебурит?
2. Какие бывают чугуны по отношению к эвтектоиду?
3. Какие различают чугуны по форме графита?
4. Как осуществляется операция отбеливания?
5. Что такое ковкий чугун?
6. Маркировка чугунов.

РАЗДЕЛ 6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Закалка — это основной способ упрочнения металлических сплавов, заключающийся в нагреве сплава выше температур фазовых превращений (на 30–50°С), выдержке при этой температуре и последующем охлаждении со скоростью выше критической.

В результате закалки в структуре стали образуется или чистый мартенсит для доэвтектоидных сталей или мартенсит с цементитом для заэвтектоидных сталей.

Мартенсит (М) — это закалочная структура или твердый пересыщенный раствор углерода в α-железе. Твердость мартенсита по методике Бринелля НВ 640.

Неполная закалка

Для неполной закалки осуществляют нагрев стали до температуры на 30...50°С выше линии PS (720°С), при этом структура феррит — аустенит. После закалки аустенит превращается в мартенсит с твердостью до НВ 640, а феррит остается ферритом с твердостью НВ 80.

Полная закалка

Для полной закалки сталь нагревают до аустенитного состояния. После закалки образуется структура чистого мартенсита с твердостью до НВ 640 (в зависимости от содержания в стали углерода).

Для заэвтектоидных сталей для получения твердости больше, чем у мартенсита, необходимо наличие цементита, имеющего твердость НВ 800. Поэтому под закалку эти стали нагревают до температуры 760°С.

Основные виды закалочных сред

Для снятия внутренних напряжений после закалки существует термическая операция отпуск:

1) низкий — с нагревом стали до 220°С, выдержанной при этой температуре и медленном охлаждении;

2) средний — с нагревом стали до 400...450°С (происходит частичный распад мартенсита со снижением твердости);

3) высокий — с нагревом стали до 650...680°С (происходит полный распад мартенсита с возвращением исходной структуры и твердости).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое закалка?
2. Что такое мартенсит, его свойства?
3. Чем отличаются полная и неполная закалка?
4. Особенности мартенситного превращения.
5. Какую решетку имеет мартенсит?
6. Основное назначение закалки.
7. Закалочные среды.
8. Выбор температур закалки для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей.

РАЗДЕЛ 7. МЕДЬ И ЕЕ СПЛАВЫ

7.1. Общие сведения

Медь, как золото и серебро, встречается в самородном виде, и поэтому в древности человек, который еще не знал металлургии, уже мог находить и применять медь. В настоящее время медь производят металлургическим способом — отделением ее от кислорода и серы.

Несмотря на то, что содержание меди в земной коре невелико (0,01%), она не рассеянный металл и концентрируется в медных рудах, где содержание ее порядка 5%.

7.2. Полезные и вредные примеси

Одно из основных свойств меди — электропроводность. Все примеси понижают электропроводность меди, как это следует из рисунка 7.1. Поэтому в качестве электротехнической меди применяют металл высших сортов с содержанием не менее 99,9% Cu. Вреднейшими примесями меди являются висмут и свинец. Эти элементы почти не растворимы в меди и образуют легкоплавкие эвтектики.

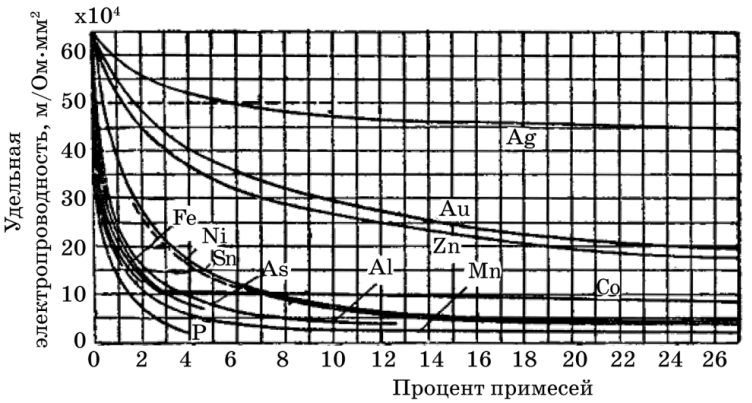


Рис. 7.1
Влияние примесей на электропроводность меди

Кристаллизация сплавов меди с висмутом и свинцом фактически заканчивается при температурах плавления этих металлов (соответственно при 270 и 327°С), а структура сплава состоит из ранее выделившихся кристаллов меди, вокруг которых расположены в виде оболочек висмут и свинец. Из-за этого нагрев сплава выше температуры плавления этих металлов и сопровождается нарушением связи между первичными кристаллами меди (красноломкость). Прокатка такого сплава невозможна. Уже тысячные доли процента висмута вызывают красноломкость меди; свинец вызывает красноломкость при наличии его в сотых долях процента.

Сера и кислород тоже нерастворимы в меди, но она образует с кислородом и серой эвтектики, богатые медью, которые плавятся соответственно при

1065 и 1067°С, т. е. выше температур горячей обработки меди. Поэтому ни кислород, ни сера не вызывают красноломкости.

Медь, содержащая кислород, подвержена при нагреве так называемой «водородной болезни». Если нагревать медь в среде, содержащей водород, то пары воды при этом, создавая высокое давление, образуют в несплошностях металла разрывы и трещины.

7.3. Свойства меди. Сравнительный анализ с золотом и серебром

По свойствам медь близка к серебру и золоту. Последние на воздухе не окисляются и поэтому называются благородными металлами; медь окисляется слабо, поэтому ее называют полублагородным металлом.

Чистая медь имеет ряд ценных технических свойств. Высокая пластичность, высокая электро- и теплопроводность, малая окисляемость — все это обусловило широкое применение меди. Кроме того, медь является основой важнейших сплавов — латуней и бронз.

Физические свойства

		Cu	**Ag**	**Au**
Плотность при 200°С, г/см^3		8,9	10,5	19,3
Температура плавления, °С		1083	961	1064
Температура кипения, °С	2595	2530	2212	
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$	16,5	14,2	9,7	
Удельное электросопротивление, Ом·см 10^{-4}	1,7	1,5	2,1	

7.4. Маркировка, механические и физические свойства, применение

Медь является важнейшим материалом из проводниковых, по электропроводности лишь незначительно уступая серебру. Поэтому примерно половину всей меди потребляет электротехническая промышленность для изготовления разнообразных проводников: монтажных и обмоточных проводов, токопроводящих деталей приборов и аппаратов и т. д. Широкое применение медь находит и в электровакуумной технике.

Вследствие недостаточной прочности технически чистую медь в качестве конструкционного материала применяют редко. Поэтому в качестве проводникового материала используют электролитическую медь марок М1 (99,9%), М0 (99,95%) и особо чистую медь М00 (99,99%).

Как уже говорилось, все примеси уменьшают электропроводность меди. Наклеп тоже понижает электропроводность. Поэтому, если провода не должны быть особо прочными, то применяют отожженную медь (маркировка ММ). Для подвесных проводов, где требуется прочность, применяют нагартованную медь (маркировка МГ).

Медь и многие ее сплавы стойки к атмосферной коррозии. Широкое распространение в промышленности имеют сплавы меди с латунной и бронзой.

7.5. Сплавы меди с оловом: структура, свойства, маркировка, применение

Сплавы меди с оловом, где цинк не является основной добавкой, называются оловянистыми бронзами.

В системе Cu — Sn возможно образование следующих фаз: твердый раствор олова в меди; твердый раствор на базе соединения Cu_5Sn; соединения $Cu_{31}Sn_8$, Cu_3Sn, Cu_6Sn_5.

Литые бронзы, содержащие до 5% Sn, обладают пластичностью и небольшой прочностью. Оловянистые бронзы устойчивы против действия атмосферы, морской воды, растворов NaOH, Na_2CO_3 и др. Бронзы неустойчивы в HNO_3 и HCl.

Наличие химических соединений исключает возможность прокатки, поэтому бронза, содержащая более 5–6% Sn, не прокатывается, не куется и ее применяют в литом виде.

Ввиду высокой стоимости олова давно уже стоит вопрос о замене оловянистых бронз другими сплавами. В таблице 7.1 приведены свойства и составы прежде наиболее распространенных оловянистых бронз. Все эти бронзы еще длительное время будут работать на ранее изготовленных деталях. Однако поскольку эти бронзы не включены в новый общесоюзный стандарт и заменяются постепенно новыми сплавами, содержащими меньшее количество олова или вовсе не содержащими его, постольку значение их в нашей промышленности будет все время уменьшаться.

Таблица 7.1

Состав и свойства некоторых оловянистых бронз, ранее бывших стандартными

Марка	Состав, %				Механические свойства в литом виде				Основное назначение
					σ_b, кг/мм^2		δ, %		
	Sn	Zn	Pb	P	в кокиль (не менее)	в землю	в кокиль	в землю	
БрО 10	10	—	—	—	20	20	3	10	Общее применение в машиностроении, ответственная арматура
БрОЦ 10-2	10	2	—	—	20	20	2	10	Ответственные отливки, арматура высокого давления
БрОЦ 8-4	8	4	—	—	20	20	4	6	Менее ответственные отливки

Продолжение табл. 7.1

Марка	Состав, %				Механические свойства в литом виде				Основное назначение
					σ_b, кг/мм^2		δ, %		
	Sn	Zn	Pb	P	в кокиль (не менее)	в землю	в кокиль	в землю	
БрОЦС 6-6-3	6	6	3	—	15	18	4	8	Арматура
БрОФ 10-1	10	—	—	1	26	—	3	—	Подшипники
БрОС 8-12	8	—	12	—	15	—	3	—	Подшипники

Бронза имеет исключительно малую усадку и обладает высокими литейными свойствами. Она имеет малую жидкотекучесть, поэтому для отливки высокой плотности не годится. При содержании 5% Sn в бронзе ее пластичность начинает падать. Бронза с содержанием 10% Sn является лучшим антифрикционным материалом и ее применяют как подшипниковый сплав. Благодаря высокой химической стойкости бронзы из нее изготавливают арматуру (паровую, водяную и др.). Таким образом, основное применение бронзы — сложные отливки, вкладыши подшипников и др.

Типичная структура литой бронзы с содержанием 10% Sn показана на рисунке 7.2. Более темные овальные зерна, образующие оси дендритов, — первичные кристаллы α-раствора, богатые медью, а более светлые поля между темными зернами — те же α-кристаллы, но выделившиеся к концу застывания и потому более богатые оловом. Извилистые включения в светлой массе — эвтектоид (α + $Cu_{31}Sn_8$).



Рис. 7.2
Литая бронза с 10% Sn. × 160

На рисунке 7.3 при большом увеличении показана структура эвтектоида, основой которого является химическое соединение $Cu_{31}Sn_8$ (имеющее слегка голубую окраску), на фоне которого лежат темные включения α-раствора.



Рис. 7.3
Строение эвтектоида (α + $Cu_{31}Sn_8$). × 500

Для удешевления в большинство промышленных бронз добавляют 5–10% Zn. Он растворяется в меди и не оказывает существенного влияния на структуру. **Для лучшей обрабатываемости в бронзу вводят до 3–5% Pb**, который присутствует в виде обособленных свинцовых включений, которые облегчают разрушение стружки. Фосфор вводят в бронзу как раскислитель для устранения хрупких включений SnO_2.

Фосфор в объеме свыше 0,2% находится в бронзе в форме фосфида меди Cu_3P, который заметен под микроскопом в виде светло-голубых включений, не краснеющих в отличие от закиси меди в поляризованном свете (рис. 7.4).



Рис. 7.4
Включения фосфоридов в литой бронзе. × 160

В большинстве случаев фосфор служит раскислителем и добавляется в столь малых количествах, что не дает собственной составляющей. Нераскисленная бронза содержит очень хрупкие включения SnO_2 (оловянистая кислота), показанные на рисунке 7.5.

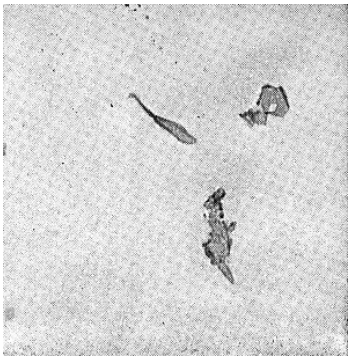


Рис. 7.5
Включения оловянистой кислоты в бронзе. × 160

Маркируют бронзу начальными буквами Бр, затем следуют буквы, показывающие, какие легирующие элементы содержит бронза, а потом цифры, показывающие количество этих элементов в целых процентах. Например, Бр010 — олово 10%, остальное — медь.

7.6. Сплавы меди с алюминием, кремнием и другими элементами: структура, свойства, маркировка, применение

Сплавы меди с алюминием называются алюминиевыми бронзами. Они обладают хорошими технологическими и механическими свойствами и не содержат дефицитных элементов. При нормальной температуре в меди может быть растворено до 9% Al с образованием однородного α-твердого раствора. При содержании алюминия более 9% в сплаве образуются частицы металлического соединения алюминия с медью, называемого β-фазой, сплав становится двухфазным.

Обычно в алюминиевых бронзах содержится 9–11% Al. Бронзы, содержащие больше 10% Al, можно подвергать закалке, нагревая до 900°С. В результате образуется ориентированная игольчатая структура, напоминающая мартенсит. В результате закалки прочность и твердость увеличивается, а пластичность падает.

Типичная структура литой алюминиевой бронзы с 10% Al показана на рисунке 7.6.

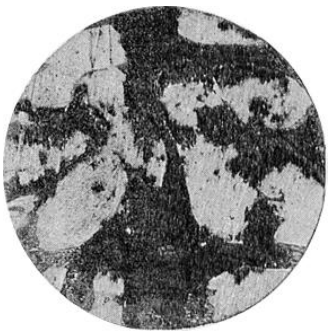


Рис. 7.6
Литая алюминиевая бронза с 10% Al. × 160

Алюминиевые бронзы можно также легировать Fe, Ni, Mn. Маркировка сложных алюминиевых бронз: БрАЖ9-4 (9% — Al, 4% — Fe, остальное Cu).

Из алюминиевых бронз изготавливают зубчатые колеса, сальники, детали турбин, электропроводные пружины и т. д. Они хорошо работают в условиях износа, повышенного давления и повышенных температур.

Алюминиевые бронзы, легированные железом и никелем, являются наиболее прочными из всех алюминиевых бронз. Сочетание прочности, высокой химической стойкости и антифрикционных свойств делает эти бронзы ценными материалами, которые применяются для изготовления втулок, седел клапанов, шестерен и других трущихся деталей.

Сплавы меди с кремнием называют кремнистыми бронзами. Их применяют в качестве заменителей оловянистых бронз. Они содержат 1–3% Si. Эти бронзы имеют хорошие литейные свойства, обрабатываются резанием, деформируются в горячем состоянии. По механическим свойствам они даже выше оловянистых бронз. Обладают высокой упругостью, выносливостью, антикоррозионной стойкостью. Используются для деталей, работающих при температурах до 500°С.

Наиболее распространенными являются бронзы БрКН1-3 (из них изготавливают ответственные детали, работающие в тяжелых условиях температуры и трения) и БрКМц3-1 (из них делают полосы, прутки, втулки, клапаны, плоские и круглые пружины).

Сплавы меди с бериллием называют бериллиевыми бронзами. Они содержат 2–2,5% Be.

Бериллий — дорогой и редкий металл, однако комплекс свойств этих бронз настолько высокий, что их производство экономически оправдано.

Маркировка этих бронз, например, БрБ2. Их используют в приборостроении для изготовления ответственных пружин, мембран и других пружинящих деталей. Эти бронзы обладают химической стойкостью, хорошей свариваемостью, обрабатываемостью режущим инструментом.

Эти бронзы можно подвергать термической обработке. Они являются искробезопасными, поэтому из них делают электрические контакты и ударный инструмент для работы во взрывоопасных атмосферах.

Сплавы меди со свинцом называются свинцовистыми бронзами. Они содержат до 30% Pb, остальное — медь. Нормальная структура такой бронзы показана на рисунке 7.7.

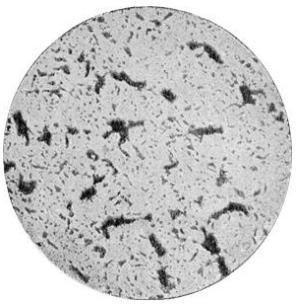


Рис. 7.7
Свинцовистая бронза с 30% Pb (по Л. И. Дмитриеву). × 160

Являются высококачественным антифрикционным материалом (подшипниковый сплав), широко применяемым в машиностроении. ***Структура*** этих бронз — отдельные зерна меди и свинца. Высокие антифрикционные свойства сплава обеспечиваются равномерным вкраплением свинца и меди.

Сплавы меди с цинком: структура, свойства, маркировка и применение. Латунями называют медные сплавы, в которых основным легирующим элементом является цинк. В системе Cu — Zn образуются шесть твердых растворов: α, β, γ, δ, ε, η. Практическое значение имеют сплавы, содержащие примерно до 42–43% Zn.

При содержании цинка до 39% латуни однофазны (α-латуни), до 46% — двухфазны (α + β). Первые характеризуются высокой пластичностью: β′-фаза очень хрупкая и твердая, поэтому двухфазные латуни имеют более высокую прочность и меньшую пластичность, чем однофазные.

Практически применяемые латуни состоят из α-, (α + β)- или β-кристаллов. Соответственно структуре и сами латуни называют α-, (α + β)- или β-латунями.

На рисунке 7.8 показана литая α-латунь с дендритной структурой, а на рисунке 7.9 — та же латунь после деформации и отжига. Так же, как и в меди, в отожженной латуни видны равноосные зерна с большим количеством двойниковых кристаллов.



Рис. 7.8
Литая α-латунь. × 160



Рис. 7.9
Деформированная и отожженная α-латунь. × 160

На рисунках 7.10 и 7.11 представлены (α + β)-латуни, содержащие соответственно 38 и 40% Zn. Кристаллы β, более богатые цинком, травятся сильнее, чем α-кристаллы, и рядом с ними кажутся темными.

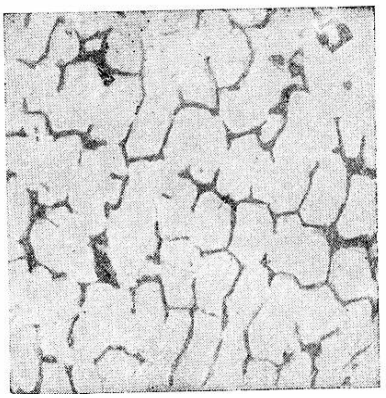


Рис. 7.10
Латунь (α + β) с 38% Zn. × 160

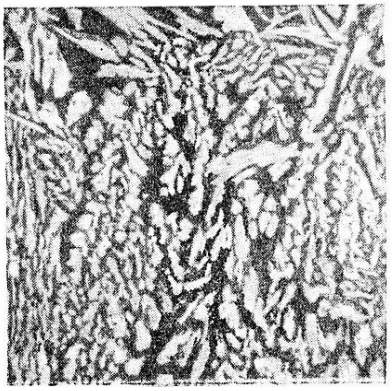


Рис. 7.11
Латунь (α + β) с 40% Zn. × 160

Наконец, на рисунке 7.12 показана чистая β-латунь.



Рис. 7.12
Чистая β-латунь с 46% Zn. × 160

Химический состав отожженных латуней влияет на механические свойства. При содержании цинка до 30% возрастают одновременно и прочность, и пластичность. Затем пластичность уменьшается, вначале за счет усложнения α-твердого раствора, а затем происходит резкое ее понижение в связи с появлением в структуре хрупкой β`-фазы. Прочность увеличивается до содержания цинка около 45%, а затем уменьшается так же резко, как и пластичность.

Большинство латуней хорошо обрабатывается давлением. Особенно однофазные латуни. Они деформируются при низких и высоких температурах. Однако в интервале 300...700°С существует зона хрупкости, поэтому при таких температурах их не деформируют.

Двухфазные латуни пластичны при нагреве выше температуры 700°С, когда их структура становится однофазной (β-фаза).

Для повышения механических свойств и химической стойкости латуней в них вводят легирующие элементы: алюминий, никель, марганец, кремний и т. д.

Олово, марганец и алюминий увеличивают прочность и коррозионную стойкость (так называемые «морские латуни»). Кремний увеличивает твердость и прочность, улучшает литейные свойства.

Из α-латуней наиболее употребительны сплавы с 90, 80 и 70–67% Cu. Первые два сплава называются *томпаками*; последний часто называется *патронной латунью*. Основные применения α-латуней — для лент, патронов, гильз, радиаторных труб, проволоки. Латуни (α + β) употребляются главным образом для труб и листов (62% Cu), прутков разных профилей (59% Cu). Составы некоторых стандартных латуней даны в таблице 7.2.

Таблица 7.2

Химический состав латуни некоторых стандартных марок

Название	Марка	Содержание меди, %	Содержание примеси, % (не более)				Содержание Zn, %
			Fe	Pb	Br	Sb	
Томпак	ЛТ 96	95–97	0,1	0,03	0,02	0,05	Остальное
	ЛТ 90	88–91	0,1	0,03	0,02	0,05	
Полутомпак	Л-80	79–81	0,1	0,03	0,02	0,05	
Латунь	Л-70	69–72	0,07	0,03	0,02	0,02	
	Л-68	67–70	0,1	0,03	0,02	0,05	
	Л-62	60,5–63,5	0,15	0,08	0,02	0,05	
	ЛС59-1	57–60	0,5	0,8–1,9	0,03	0,1	

Латуни маркируют буквой Л и числом, указывающим среднее содержание меди. Например, Л80 — латунь, содержащая 80% Cu и 20% Zn. В марках латуней сложного состава имеются буквы, соответствующие введенным легирующим элементам. Например, в латуни ЛМцС58-2-2 содержится 58% Cu, 2% Mn, 2% Pb (остальное Zn).

Из α-латуней наиболее применимы латуни с содержанием 90 и 80% Cu и латуни с содержанием 70–68% Cu, которые называются гильзовыми, так как применяются для изготовления гильз. Латуни, легированные алюминием, применяют для конденсаторных трубок, так как обладают повышенной стойкостью к морской воде. Латунь, легированная Mn, имеет повышенную прочность. Ни-

келевую латунь, обладающую повышенной коррозионной стойкостью, используют для конденсаторных и манометрических трубок. Свинцовистые латуни применяют для деталей, изготавливаемых горячим прессованием. Они хорошо обрабатываются резанием.

Вопросы для самопроверки

1. Медь и ее свойства.
2. Какие сплавы называют латунями? Их маркировка.
3. Применение латуней в котлостроении.
4. Механические свойства латуней.
5. Какие сплавы называют бронзами?
6. Какие бывают бронзы, их свойства и маркировка?

РАЗДЕЛ 8. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

8.1. Свойства алюминия

Из всех легких металлов алюминий имеет наибольшее значение из-за высокого объема производства и невысокой стоимости.

Алюминий относят к легким металлам, так как его плотность менее 3 г/см^3.

Основные физические свойства алюминия:

1) коэффициент линейного расширения при 25°С — $24{,}4 \cdot 10^{-6}$;

2) удельная теплопроводность при 20°С (Вт/(м·К)) — 225;

3) удельное электросопротивление при 20°С, Ом·см — $2{,}8 \cdot 10^{6}$;

4) температура плавления, °С — 660;

5) температура кипения, °С —2327;

6) твердость — НВ 150.

Впервые об этом металле, который входит в состав глины, высказался английский ученый Дэви в 1808 г. Он и дал ему название алюминий. В России в XIX в. он назывался глинием.

В 1825 г. датчанин Эрстед получил первые крупицы алюминия. Авторами современного способа производства алюминия были американец Ч. Холл и француз П. Эру.

До 1890 г. всего во всем мире было изготовлено 200 т алюминия, и он по цене мало уступал тогда золоту.

До 1906 г. алюминий применяли в чистом виде, но затем А. Вильм почти случайно нашел способ упрочнения сплава Al–Cu в результате закалки и старения. А предложенный им сплав является сейчас самым распространенным алюминиевым сплавом — дюралюминием (4% Cu, 0,5% Mg, 0,5% Mn). Он имеет широкое применение как конструкционный материал из-за своей высокой прочности ($\sigma_в$ = 300...600 МПа) и малой плотности (2,6–3,0 г/см^3).

Наиболее характерные свойства чистого алюминия:

1) наименьшая по сравнению с железом плотность g = 2,7 г/см^3, в связи с чем алюминий и его сплавы широко применяют там, где важное значение имеют малая плотность и большая удельная прочность ($\sigma_в/g$);

2) низкая температура плавления (660°С), благодаря чему технология обработки Al резко отличается от технологии обработки стали;

3) высокая пластичность;

4) малая прочность.

Al кристаллизуется в гранецентрированной решетке. Он не имеет аллотропических модификаций, обладает высокой теплопроводностью, электропроводностью и очень высокой скрытой теплотой плавления.

Al имеет большое сродство с кислородом. Но, несмотря на это, он весьма слабо подвергается коррозии на воздухе и в некоторых других средах из-за образования плотной пленки Al_2O_3, которая защищает металл от коррозии. Чем чище Al и чем больше он свободен от различных примесей, тем выше его коррозионная устойчивость.

Применять Al как конструкционный материал из-за низкой прочности нецелесообразно. Однако такие его свойства как высокая пластичность, коррозионная стойкость и электропроводность позволяют эффективно его использовать для других целей. Таким образом имеются три направления применения технического Al:

1) высокая пластичность позволяет производить из Al грубую штамповку и прокатку до тонкой толщины (алюминиевая фольга и др.);

2) высокая электропроводность (65% от Cu) позволяет применять Al для электротехнических цепей (проводниковый металл). Провод из Al равной электропроводности легче, чем провод из меди;

3) высокая коррозионная стойкость позволяет применять Al как устойчивый металл в органических кислотах (отсюда и широкое применение Al в быту, для транспортировки и хранения продуктов питания). В неорганических кислотах Al устойчив только при их низкой концентрации.

Наиболее чистый алюминий — 99,999%.

Маркировка: А999, А995, А99, А95, А85, А8, А7, А5, А0.

8.2. Постоянные примеси алюминия

Основные (постоянные) примеси, загрязняющие Al, — это железо и кремний. На рисунке 8.1 приведена часть диаграммы Al–Fe для сплавов, богатых алюминием.

Железо можно считать практически нерастворимым в Al, поэтому даже при очень низком содержании железа образуется эвтектика Al + Al_3Fe. Она содержит только 1,7% Fe (или 7% Al_3Fe). Из-за малого содержания железа при микроисследовании типичная структура эвтектики не наблюдается. Структура сплавов Al–Fe состоит из Al и темных включений Al_3Fe.

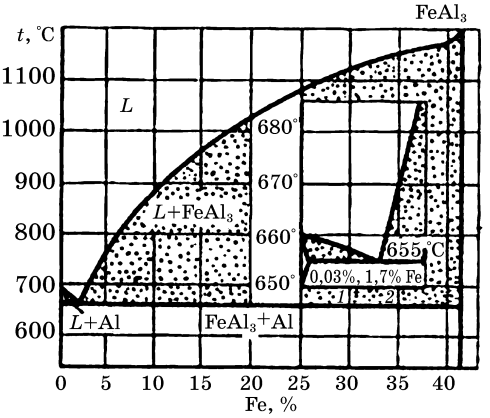


Рис. 8.1
Часть диаграммы состояния сплавов Al–Fe

Кремний не образует химических соединений с Al. Растворимость Al в кремнии очень мала, поэтому можно считать, что в системе Al–Si присутствует чистый кремний.

Растворимость кремния в Al при эвтектической температуре достигает 1,65%, а при комнатной почти равна нулю. Эвтектика содержит 11,7% кремния и состоит из чередующихся включений обеих фаз (см. диаграмму Al–Si на рис. 8.2).

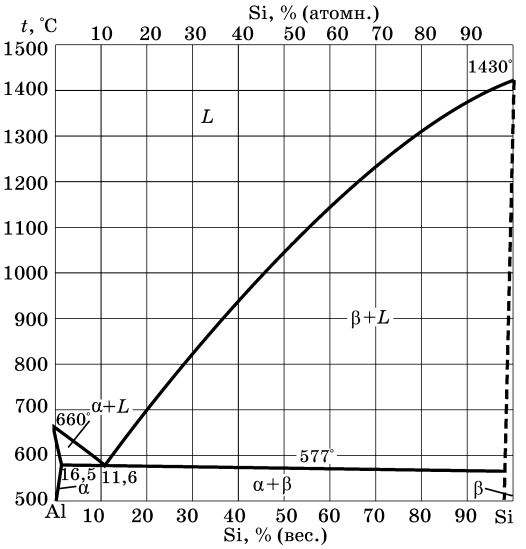


Рис. 8.2
Диаграмма состояния Al–Si (по совокупности работ)

При одновременном присутствии кремния и железа появляются новые фазы — тройные химические соединения или тройные растворы, которые отсутствуют в двойных сплавах. Они обозначаются α — (Fe – Si – Al) и β — (Fe – Si – Al). Это тройное химическое соединение Al, Si и Fe. Присутствие этих соединений, особенно по границам зерен, уменьшает пластичность Al.



Рис. 8.3
Эвтектика Al + α-FeSiAl. × 400

Все фазы ($FeAl_3$, Si, α и β) видны на нетравленых шлифах и отличаются друг от друга по цвету и отношению к травителям. Свободный кремний значи-

тельно темнее других фаз, а тройные соединении наиболее светлые. В техническом алюминии соотношение кремния и железа обычно таково, что обе эти примеси почти целиком связаны в тройные соединения. При достаточном количестве примесей появляется характерная скелетообразная эвтектика, напоминающая китайский шрифт. Такая эвтектика видна на рисунке 8.3.

Все эти фазы в литом состоянии обычно присутствуют в форме пластинок или иголочек.

8.3. Классификация алюминиевых сплавов

По технологическому признаку все Al-сплавы, как и другие металлические сплавы, подразделяются на:

1) деформируемые;

2) литейные.

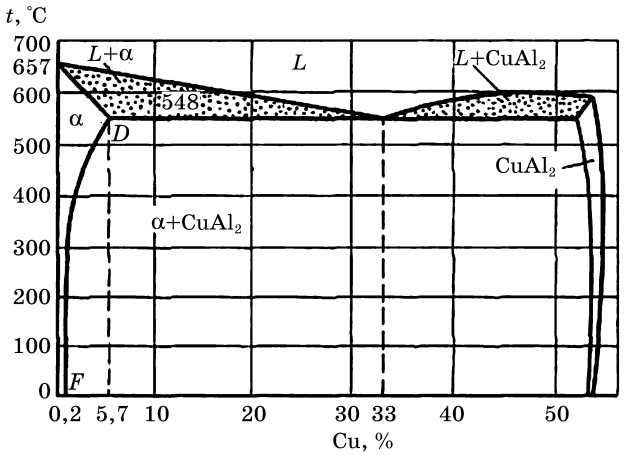


Рис. 8.4
Диаграмма состояния Al–Cu

На рисунке 8.4 приведена диаграмма Al — легирующий элемент (на примере Cu).

Для алюминиевых сплавов медь — основной второй элемент, и поэтому структурные превращения при термической обработке рассмотрены на примере Al–Cu. Это тем более целесообразно, что введение других легирующих элементов, кроме или вместо меди, не вносит принципиальных изменений.

Из диаграммы (рис. 8.4) видно, что все сплавы, находящиеся левее точки D, можно привести в однофазное состояние твердого раствора с помощью нагрева. Эти сплавы имеют высокую пластичность, хорошо обрабатываются давлением и относятся к группе *деформируемых* Al-сплавов.

Точка D соответствует предельной растворимости легирующего элемента в α-твердом растворе при эвтектической температуре. Поэтому сплавы, по содержанию легирующего элемента находящиеся правее точки D, имеют структуру α + эвтектика. Наличие такой структуры резко уменьшает пластичность,

способность прессоваться, прокатываться, коваться. Но благодаря наличию эвтектики эти сплавы обладают высокими *литейными* свойствами.

Концентрация компонентов в литейных сплавах должна превышать предельную растворимость при высокой температуре по двум причинам:

1) для создания прочности, достаточной для того, чтобы внутренние напряжения (естественные и неизбежные) у литой (неотожженной) детали не вызывали бы образования трещин;

2) для повышения жидкотекучести.

Все литейные сплавы могут упрочняться в результате термической обработки, но степень упрочнения тем меньше, чем больше литейный сплав легирован, т. е. чем больше в структуре эвтектики.

Деформируемые Al-сплавы подразделяются на:

1) не упрочняемые термической обработкой (сплавы А левее точки F, их структура при любых температурах состоит из зерен однофазного α-твердого раствора);

2) упрочняемые термической обработкой (сплавы Б, расположенные правее точки F).

Неупрочняемые. Прочность Al можно повысить легированием. В такие сплавы вводят марганец или магний. Входя в кристаллическую решетку Al, атомы этих элементов существенно повышают его прочность, снижая при этом пластичность. Сплав Al с марганцем обозначают АМц, сплавы Al с магнием — АМг. Среднее содержание в сплаве магния в % дополнительно обозначают цифрами (АМг3). Он эффективно действует как упрочнитель: прочность сплава АМг6 примерно в 3 раза больше прочности Al. Марганец вводят не только для упрочнения сплавов, но и для повышения их коррозионной стойкости.

Прочность сплавов АМг и МАц можно повысить только в результате пластической деформации в холодном состоянии. Чем больше степень деформации, тем значительнее возрастает прочность и понижается пластичность сплава. В зависимости от степени упрочнения различают сплавы:

1) полунагартованные (обозначаются добавлением к марке сплава буквы П) — АМг3П;

2) нагартованные (обозначаются добавлением к марке сплава буквы Н) — АМг3Н;

3) отожженное состояние (обозначают буквой М) — АМг3М.

Эти сплавы применяют для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, трубопроводов, мало- и средненагруженных деталей конструкций.

Упрочняемые. Содержание легирующих элементов в таких сплавах должно быть больше, чем предел их растворимости в Al при нормальной температуре. В то же время оно не должно превышать предела их растворимости в твердом Al при нагреве.

Чем более легированы сплавы, тем они менее упрочняемые.

8.4. Дюралюминий: механические и физические свойства, применение

Дюралюминий — наиболее распространенный представитель группы Al-сплавов, применяемых в деформируемом виде и упрочняемых термической обработкой.

Он содержит 4% Cu, 0,5% Mg, а также марганец и железо. Дюралюминий — сплав, по крайней мере, шести компонентов: Al, Cu, Mn, Mg, Si и Fe, хотя основными добавками являются медь и магний. Поэтому указанный сплав можно причислить к сплавам системы Al–Cu–Mg. Кремний и железо являются постоянными примесями, которые попадают в результате применения недостаточно чистого Al.

Перечисленные компоненты образуют ряд растворимых соединений, вызывающих старение, таких как $CuAl_2$, фаза S, Mg_2Si и нерастворимых соединений, таких как железистые и марганцовистые соединения.

Структура дюралюминия в отожженном состоянии состоит из твердого раствора и вторичных включений различных интерметаллических соединений.

После закалки с оптимальной температуры (500°C) основное количество соединений $CuAl_2$ и Mg_2Si растворяются в Al, но соединения железа не растворяются. Поэтому в закаленном состоянии структура дюралюминия — твердый раствор и нерастворимые включения железа (черного цвета).

При нагреве выше 500...520°C происходит оплавление по границам, и при охлаждении участки жидкой фазы превращаются в эвтектику.

Механические свойства после окончания термической обработки (после закалки и старения) сильно зависят от температуры закалки. В результате повышения температуры закалки происходит растворение интерметаллидных соединений, а после старения — более высокая прочность. Нагрев выше определенной температуры вызывает перегрев (рост зерна, окисление и оплавление границ зерна), что приводит к катастрофическому падению прочности и пластичности. Поэтому при термической обработке дюралюминия важно соблюдать температурный режим закалки, при котором колебания температур не должны превышать +3...4°C.

Термическая обработка этих сплавов заключается в закалке примерно с 500°C в воде с последующим естественным (зонным) старением, т. е. детали из этих сплавов могут быть готовы только через 5–7 дней после закалки.

Структура литого дуралюмина показана на рисунке 8.5. Типичные структуры дуралюмина в различных состояниях показаны на рисунках 8.6 (отожженный дуралюмин) и 8.7 (закаленный и состарившийся дуралюмин). Структурными составляющими дуралюмина до закалки являются алюминиевый твердый раствор $CuAl_2$, фаза S и марганцевая фаза. На рисунке 8.8 показана структура дуралюмина, перегретого перед закалкой. В результате перегрева произошло оплавление эвтектики по границам кристаллов, сопровождающееся потерей прочности и пластичности.

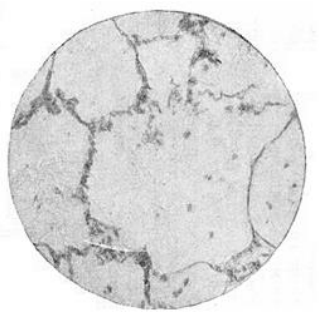


Рис. 8.5
Литой дуралюмин. × 200

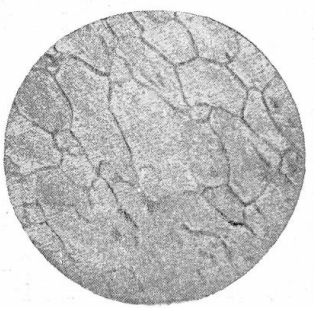


Рис. 8.6
Отожженный дуралюмин. × 200

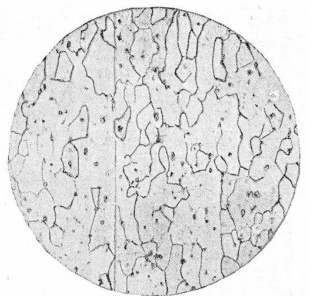


Рис. 8.7
Закаленный после деформирования и состарившийся дюралюмин. × 200

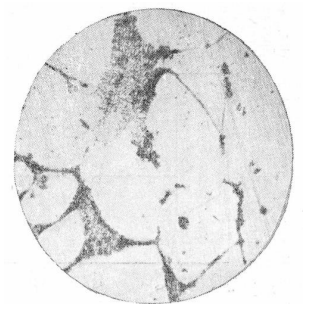


Рис. 8.8
Перегретый перед закалкой дуралюмин с оплавившейся эвтектикой. × 200

Так как коррозионная стойкость дюралюминия незначительна, то изыскивали различные способы для защиты его от коррозии. Наиболее распространенный способ — плакирование чистым алюминием. Плакированный дюралюминий обладает такой же коррозионной устойчивостью, как чистый Al. Однако наличие на дюралюминии менее прочного слоя из чистого Al ухудшает прочностные свойства полуфабриката в целом, т. е. плакированный дюралюминий несколько менее прочен, чем неплакированный.

В настоящее время производят дюралюминий нескольких марок. Сплавы Д1 (сплав алюминия с 3,8–4,8% Cu; 0,4–0,8 Mg; 0,4–0,8 Mn; до 0,7% Fe и до 0,7% Si) — это нормальный дюралюминий, основной упрочняющей фазой является соединение $CuAl_2$. Сплав Д16 называется супердюралюмином и содержит повышенное количество магния. В соответствии с этим основной упрочняющей фазой является фаза S, что и обеспечивает более высокую прочность сплава Д16 по сравнению с Д1.

Al-сплавы имеют в пять раз меньшую конструктивную прочность, чем стали.

Представление о достигнутых показателях механических свойств легких алюминиевых сплавов дает таблица 8.1, в которой свойства двух лучших алюминиевых сплавов Д16 и сплава В95 сравниваются со свойствами чистого алюминия, технического железа, меди и высококачественной специальной стали. Нетрудно заметить, что путем сплавления с другими металлами прочность алюминия удалось повысить в несколько раз.

Таблица 8.1

Механические свойства алюминиевых сплавов и других металлов

Металл	Состав, %									Состояние	Свойства		
	Cu	Mg	Mn	Zn	Al	Fe	C	Ni	Cr		σ_b, кг/мм^2	δ, %	Твердость H_B
Сплав Д16	4,5	1,5	0,6	—	остальное	—	—	—	—	Отожженный	23	20	50
										Закаленный после старения	50	20	110
										Наклепанный	60	1–2	130
Сплав В95	1,7	2,3	0,4	6	остальное	—	—	—	0,2	Закаленный и отпущенный	6	12	150
Чистый алюминий	—	—	—	—	99,9	—	—	—	—	Отожженный	5	50	15

Продолжение табл. 8.1

Металл	Состав, %									Состояние	Свойства		
	Cu	Mg	Mn	Zn	Al	Fe	C	Ni	Cr		σ_b, кг/мм^2	δ, %	Твердость H_B
Железо	—	—	0,3	—	—	99,5	0,1	—	—	Отожженное	30	35	100
Медь	99,9	—	—	—	—	—	—	—	—	Отожженная Наклепанная	22 45	45 1–2	40 80
Высококачественная сталь	—	—	0,3	—	—	94,4	0,3	3,5	1,5	Закаленная и отпущенная	200 150 100	1–2 6 15	300 и выше

Следует также указать, что пайка и сварка Al-сплавов не создают шва равной прочности с основным металлом. Надежным соединением является соединение на заклепках, которые тоже должны быть изготовлены из дюралюминия.

8.5. Силумины: маркировка, свойства, применение

Силуминами называются сплавы с большим содержанием кремния. Это наиболее распространенные литейные Al-сплавы, широко применяемые только в литом виде (например, в авто- и авиастроении).

Основа силуминов — соединение Al и Si (Si — 4–12%).

Большинство силуминов является доэвтектическими сплавами (4–13% Si). Их структура состоит из α-твердого раствора и эвтектики, содержащей 11,6% Si. Чем больше в составе силумина эвтектики, тем лучше литейные свойства.

Эвтектика представляет собой механическую смесь зерен α-твердого раствора и крупных пластин кремния, являющегося хрупким и непрочным элементом. При таком крупнопластинчатом строении эвтектики сплав имеет сравнительно малую прочность и низкую пластичность ($S_в$ ~ 14 кгс/мм^3, δ ~ 1%).

Силумины обычно имеют грубо игольчатую эвтектику, состоящую из α + Si, и первичные кристаллы (рис. 8.9). Но стоит только перед отливкой добавить в жидкий сплав незначительное количество металлического натрия или некоторых других веществ (очень хороший модификатор — смесь 2/3 NaF и 1/3 NaCl), как структура меняется. Эвтектика становится мелкозернистой (рис. 8.10), а заэвтектический сплав с 12–14% Si делается по структуре доэвтектическим с первичными дендритами алюминиевого раствора.

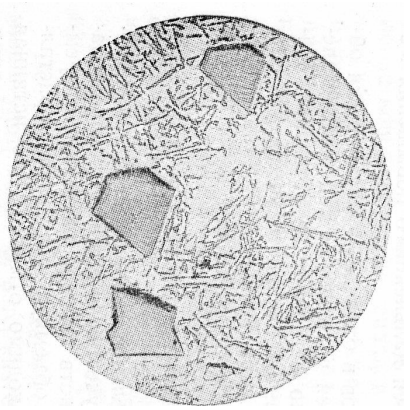


Рис. 8.9
Нормальная структура силумина. × 200



Рис. 8.10
Структура модифицированного силумина. × 200

Таким образом, для улучшения строения эвтектики и получения более мелкозернистой структуры силумины подвергают модифицированию смесью NaCl и NaF (1/3 NaCl; 2/3 NaF; 2–3% от массы отливки). В этом случае структура его состоит из светлых первичных выделений Al и мелкозернистой эвтектики. Введение модификатора (т. е. указанных выше веществ в количестве до 1% от массы жидкого сплава) затрудняет кристаллизацию кремния.

Измельчение структуры и отсутствие первичных выделений хрупкого кремния улучшают механические свойства. Так, немодифицированный сплав с 13% Si имеет $\sigma_в$ = 140 МПа, при δ = 3%. После модифицирования свойства этого сплава следующие: $\sigma_в$ = 180 МПа, при δ = 8%.

Термическая обработка литых деталей из алюминиевых сплавов существенно улучшает их механические свойства. Предел прочности и относительное удлинение литейных алюминиевых сплавов после термической обработки (закалка с последующим искусственным старением) увеличиваются в два раза.

Литые сплавы почти не подвержены естественному старению и максимальную прочность получают после искусственного старения в течение 10–20 ч

при 150...180°С или при более высокой температуре, но тогда продолжительность старения меньше.

Упрочнение литых Al-сплавов объясняется растворением интерметаллических соединений $CuAl_2$, MgSi фазы S, Al_3Mg_2 и т. д. с получением в закаленном состоянии пресыщенного твердого раствора. Одновременное повышение после термической обработки прочности и вязкости объясняется растворением указанных интерметаллических соединений, присутствующих до термической обработки в литом состоянии по границам зерен. Поэтому в ряде случаев уже только одна закалка без старения улучшает механические свойства. Обычно старение еще больше повышает прочность, но пластичность при этом часто снижается.

Силумины маркируют буквами АЛ и порядковой цифрой, не характеризующей ни состав, ни свойства сплава: АЛ2, АЛ3, АЛ13 и т. д. Цифра характеризует порядковый номер сплава в ГОСТ.

Силумины широко применяют для изготовления литых деталей приборов, корпусов турбонасосных агрегатов и других мало- и средненагруженных деталей, в том числе и тонкостенных отливок сложной формы.

Однако силумины, несмотря на их превосходные технологические (литейные) свойства, не могут во всех случаях удовлетворить требованиям, которые предъявляются к литейным сплавам в отношении механических свойств. Сплав АЛ2 применяют для отливок сложной формы, от которых не требуются высокие механические свойства. При более высоких требованиях к прочностным свойствам применяют специальные силумины (сплавы АЛ3, АЛ4, АЛ5, АЛ6, АЛ9).

Механические свойства специальных силуминов в результате термической обработки следующие: $\sigma_в$ = 200–250 МПа при δ = 1–6%.

Но они все же ниже механических свойств деформируемых сплавов. Это является следствием более грубой структуры, не раздробленной пластической деформацией.

Среди литейных сплавов наиболее высокими механическими и антикоррозионными свойствами обладает сплав АЛ8. После закалки прочность его достигает 300 МПа при удлинении 12%. Однако этот сплав обладает худшими литейными свойствами, чем другие алюминиевые сплавы.

Применение литых сплавов для нагруженных деталей целесообразно только тогда, когда сложная форма литой детали дает преимущество в массе по сравнению с простой по форме кованой деталью или когда ковкой не удается получить заданную форму детали; в других случаях более целесообразно применение кованых, механически более прочных сплавов.

8.6. Жаропрочные сплавы: маркировка, свойства, применение

Есть детали, изготавливаемые отливкой или штамповкой из Al-сплавов, которые работают при температурах порядка 200...300°С и даже 350°С (например, поршень, головка цилиндра и др.).

Для этих целей применяют Al-сплавы, легированные Cu, Ni, Mg, Fe, Ti.

Для получения необходимых свойств эти сплавы подвергают закалке (перевод избыточных фаз в твердый раствор) и затем искусственному старению (стабилизации структурного состояния).

Чем сложнее состав сплава и состав выделяющихся фаз, тем медленнее происходит разупрочнение сплава при высоких температурах. Поэтому жаропрочные сплавы обычно имеют сложный химический состав и содержат специально вводимые присадки железа и никеля, что отличает их от остальных алюминиевых сплавов.

Маркируют эти сплавы буквами АК и цифрой после них, которая обозначает порядковый номер сплава по ГОСТ.

8.7. Краткая характеристика свариваемости алюминиевых сплавов

Ценными технологическими свойствами Al являются его хорошая деформируемость и свариваемость — он легко подвергается горячей, а также холодной обработке давлением и сваривается всеми видами сварки и пайки.

Естественное старение — самопроизвольное повышение прочности закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре.

Искусственное старение — повышение прочности закаленного сплава в процессе его выдержки при прогреве.

Интерметаллиды — нерастворимые соединения двух и более металлов.

Плакирование — нанесение тонкой защитной пленки на поверхность детали (4–8% от толщины детали).

Вопросы для самопроверки

1. Алюминий и его свойства.
2. Какой сплав называют силумином? Какой упрочняющей обработке его подвергают?
3. Применение силуминов.
4. Какие бывают магниевые сплавы? Их маркировка.
5. Классификация алюминиевых сплавов.
6. Какие бывают деформируемые алюминиевые сплавы?
7. Как можно повысить прочность сплавов АМг и АМц?
8. Что такое дюралюминий? Для чего он применяется?
9. В чем заключается термическая обработка дюралюминия?

РАЗДЕЛ 9. НИКЕЛЬ И ЕГО СПЛАВЫ

Никель кристаллизуется в кубической системе, имеет гранецентрированную решетку, плавится при 1455°С, а при 360°С испытывает магнитное превращение.

Плотность — 8,93 г/см^3.

HV — 200–400.

Основными характерными свойствами никеля являются его большая химическая стойкость, ферромагнитность, тугоплавкость и высокая прочность, сочетающаяся с большой пластичностью.

Эти ценные свойства никеля проявляются и в его важнейших сплавах. С очень многими элементами никель дает двойные и тройные твердые растворы на всем протяжении или в значительной части концентраций. Эти твердые растворы обладают ценными механическими и физическими свойствами. Среди кислотостойких и жаростойких сплавов никелю принадлежит основное место.

Основные свойства Ni-сплавов

1. Высокая химическая стойкость в агрессивных средах, высокая жаростойкость.

2. Немагнитность.

3. Высокая пластичность от минусовых температур до 1200°С.

4. Значения $\sigma_в$, НВ и электрического сопротивления в 1,5–2 раза выше, чем у стали 12Х18Н10Т.

5. Температурный коэффициент линейного расширения α в 1,5–2 раза выше, чем у коррозионных сплавов на основе железа.

6. Высокая обрабатываемость механическими способами.

7. Хорошая свариваемость.

Большинство электротехнических сплавов для нагревательных и измерительных приборов содержит никель в качестве одной из важнейших составляющих. Целый ряд сплавов со специфическими свойствами, как, например, сплавы, не изменяющие объема при нагревании, приобретают эти свойства благодаря никелю. Значительное количество высококачественных черных и цветных сплавов содержит никель. Сюда относятся специальные никелевые и хромоникелевые стали, аустенитные чугуны, специальные латуни и бронзы.

Ниже рассматриваются строение и свойства самого никеля и тех его сплавов, в которых никель является основой (монель-металл, нихромы), а также строение и свойства электротехнических сплавов для нагревательных приборов, реостатов и измерительных аппаратов, во многих из которых никель является одним из основных компонентов.

Наиболее чистый сорт никеля — **электролитический никель**. Однако в процессе приготовления высококачественных сплавов электролитический никель зарекомендовал себя хуже, чем никель (дробь), полученный через карбонит никеля. Вероятно, это объясняется тем, что в электролитическом никеле имеется значительное количество водорода, не удаляющегося полностью даже при переплавке. Из других сортов никеля надо отметить как наиболее чистый сорт карбонильный никель.

Свойства никеля существенно зависят от содержания в нем C, S, P, O_2 и др.

Постоянные примеси:

1) C = 0–0,3%; 2) Fe = 0–0,7%; 3) Co = 0,1–1,0%;

4) S = 0–0,01%; 5) Si = 0–0,2%; 6) Cu = 0,06%.

Обычными примесями в никеле являются углерод (от 0 до 0,3%), железо (от 0 до 0,7%), кобальт (от десятых долей процента до 1,0%), сера (от 0 до сотых долей процента), кремний (от 0 до 0,2%) и медь (от 0 до 0,6%). Следует иметь в виду, что при переплавках количество углерода, а иногда и железа, кремния и серы может повыситься.

Те количества кобальта, железа, меди и кремния, которые могут присутствовать в никеле, всегда находятся в твердом растворе и потому не могут оказать вредного влияния на свойства никеля.

Углерод до 0,3% также находится в растворе, но при больших количествах может выделиться в форме графита. Графит в никеле, так же как и в железных сплавах, делает прокатку затруднительной, а при большом содержании и невозможной. К сожалению, диаграмма состояния никель — углерод до сих пор известна недостаточно хорошо (рис. 9.1).

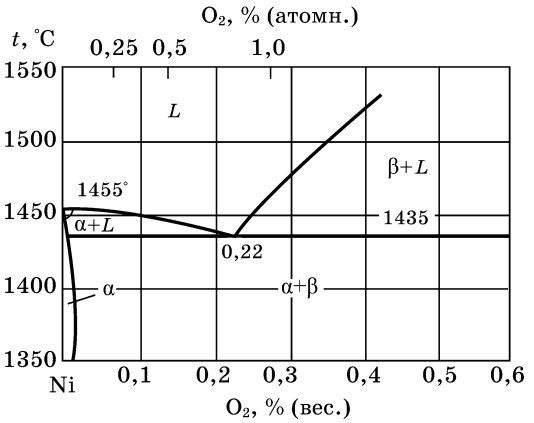


Рис. 9.1

Диаграмма состояния Ni–O (по совокупности работ)

В нераскисленном никеле имеется некоторое количество кислорода в форме эвтектики Ni + NiO (см. диаграмму состояния на рис. 9.2). Раскислителями могут служить марганец и магний. Окислы марганца и магния, как почти не растворимые в никеле, всплывают наверх — в шлак и только в незначительном количестве могут остаться в сплаве, в то время как количество закиси никеля могло быть достаточо большим.

Сера образует с никелем сульфид, дающий легкоплавкую эвтектику (диаграмма на рис. 9.3). Наличие этой легкоплавкой эвтектики делает никель красноломким и негодным к механической обработке. Эвтектика (Ni–γ–Ni_3S_2) залегает по границам зерен никеля и при расплавлении нарушает связь между ними. Для обезвреживания серы вводят марганец или магний. При этом образуются менее вредные MnS или MgS.

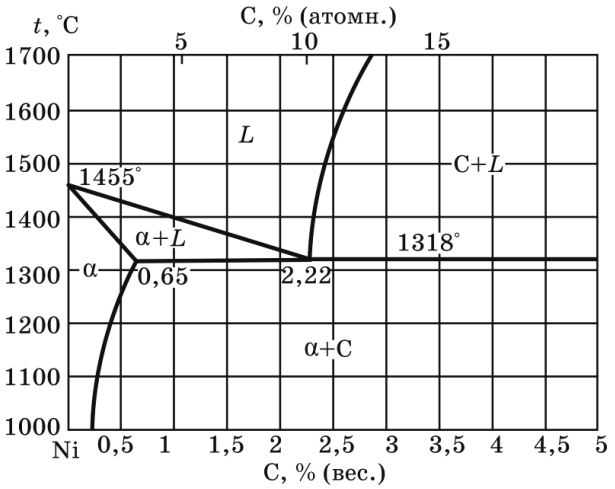


Рис. 9.2

Диаграмма состояния Ni–C (по совокупности работ)

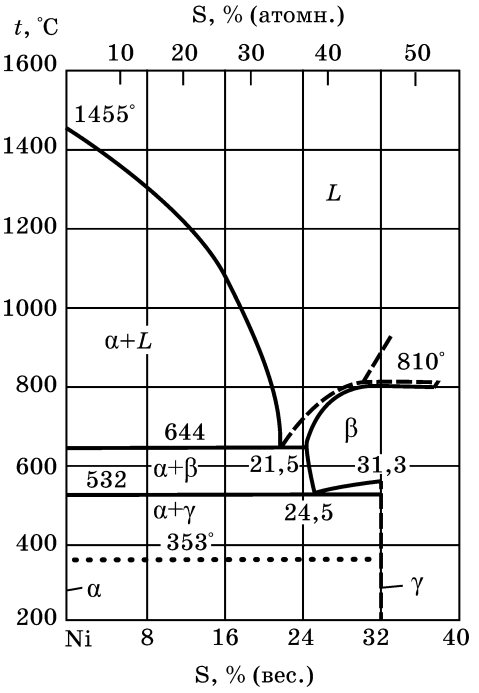


Рис. 9.3

Диаграмма состояния Ni–S (по совокупности работ)

Сульфид марганца как тугоплавкое вещество не так вреден, как сульфид никеля, хотя так же, как и сульфид никеля, располагается около границ зерен.

Магний так же, как и марганец, распределяется между кислородом и серой. При небольших количествах магния он почти полностью связан с серой в MgS. Сульфид магния располагается в виде отдельных разрозненных включений, по преимуществу в средней части зерен, а потому гораздо менее вреден,

чем Ni_3S_2 и даже чем MnS. Разные формы выделения сульфидов вполне объяснимы с точки зрения последовательности кристаллизации. MnS и особенно $Ni\alpha S_3$ выделяются к концу застывания сплава, в то время как наиболее тугоплавкий MgS кристаллизуется первым и служит центром кристаллизации для никеля. Избыток магния сверх того количества, которое необходимо для связывания серы, нежелателен, так как понижает жидкотекучесть сплава.

Жидкий никель легко и в большом количестве растворяет водород и окись углерода, которые при кристаллизации выделяются в форме пузырей и нарушают целостность отливки. Хорошим дегазификатором никеля является марганец, который, как уже сказано выше, одновременно может служить и раскислителем (если раскисление нужно) и десульфуризатором. Так как мы видели, что в качестве десульфуризатора лучше добавлять магний, то на долю марганца в основном приходится рафинировать сплав от газа. Избыток марганца входит в твердый раствор и потому безвреден, а в отношении влияния на механические свойства даже полезен.

Правильно раскисленный, десульфуризованный и дегазированный никель легко прокатывается в горячем и холодном состоянии.

Сплавы никеля

Классификация Ni-сплавов:

1) конструкционные (высоко-, средне- и низколегированные);

2) электротехнические (термо-э.д.с., электрическое сопротивление);

3) жаростойкие (алюмель, хромель Х23Ю5, фехраль, NiAl, Ni_3Al. Нихром-Х20Н80 имеет максимальную температуру 1125°С при толщине 1 мм. Для удешевления нихромов используют ферронихром. Применение: термопары, резисторы, терморезисторы, нагреватели);

4) жаропрочные **(нимоники)** работают при 550...1100°С. Основа — Ni (более 30–50%). Структура — $Ni_3(Ti,Al)$, Ni_3Al;

5) с особыми физическими и химическими свойствами:

– **магнитно-мягкие** (Ni–Fe) — для изготовления якорей и полюсов электрических машин, магнитопроводов, силовых трансформаторов. *Основное требование — высокая магнитная проницаемость*;

– **пермаллои —** сплавы с высоким значением индукции в слабых магнитных полях (Ni–Fe, где до 80% Ni). Для повышения удельного электросопротивления и магнитной проницаемости часто легируют Ni, Cr, Cu. Изготавливают из чистейшего железа и никеля вакуумным переплавом;

– **монель-металл** — сплав никеля с медью.

Ni 67–69%, Cu 28%, Fe 1,5–2,5%, Mn 1–2%.

Высокая прочность в сочетании с высокими пластичностью и коррозионной стойкостью используются в химическом аппаратостроении.

Мельхиор и нейзильбер (китайское серебро (Ni–Zn–Cu)) используются в *электрических контактах и ювелирных изделиях*.

Ni до 35%, Zn до 45% — однородный твердый раствор, обладающий высокой пластичностью. Чаще всего Ni 15%, Zn 20%.

Сплавы Fe–Ni с заданным коэффициентом линейного расширения (приборостроение: метрология, геодезия) в диапазоне температур 100...–100°С — **Инвар (36Н)**. Для впайки в молибденовые стекла используется **Ковар** 29НК (29% Ni и 18% Co).

Монель-металл, содержащий 67–69% Ni, 28% Cu, 1,5–2,5% Fe и 1–2% Mn, представляет собой очень прочный и в то же время пластичный сплав, прекрасно сопротивляющийся действию атмосферы, водных растворов солей и щелочей, пара, органических соединений и т. п.

Монель-металл также хорошо сопротивляется действию газов при высоких температурах и до 400°С почти не изменяет своих высоких механических свойств. По своему строению — это типичный твердый раствор (диаграмма состояния Cu–Ni на рис. 9.4). В литом виде монель-металл, как и все остальные технические сплавы никеля, имеет характерную дендритную структуру, которая после горячей и холодной механической обработки и отжига заменяется полиэдрической структурой с большим количеством двойников. Монель-металл широко применяется в химическом аппаратостроении как некорродирующий металл. При этом необходимо помнить, что высокая химическая стойкость монель-металла сполна используется только тогда, когда монель-металл работает без контакта с другими металлами.

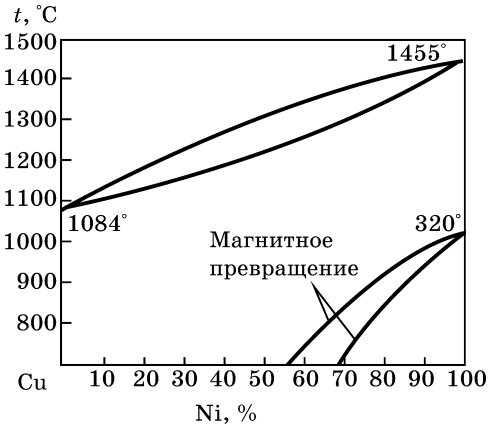


Рис. 9.4
Диаграмма состояния сплавов Ni–Cu (по Н. С. Курнакову и др.)

Достаточно применить железные заклепки для листов из монель-металла, чтобы конструкция вышла из строя быстрее, чем простая железная конструкция, склепанная железом. При приготовлении монель-металла следует избегать углерода, так как при содержании его свыше 0,15% появляется свободный графит и увеличивается хрупкость.

Механические свойства монель-металла можно значительно повысить путем введения таких добавок, которые сделали бы монель сплавом, закаливающимся и подвергающимся упрочняющему отпуску. Такой добавкой оказался алюминий (около 3%). Алюминий образует химическое соединение с никелем, которое при температуре закалки (около 800°С) полностью переходит в твердый раствор, а при последующем отпуске вновь выделяется из него в дисперсном состоянии.

Распад твердого раствора при отпуске вызывает резкое упрочнение сплава. В то время как закаленный сплав имеет прочность около 70 кг/мм^2 при удлинении свыше 40% сплав, отпущенный при 600°С, имеет прочность около 115 кг/мм^2 при удлинении около 20%. Для сравнения укажем, что без алюминия монель-металл при удлинении в 20% может иметь прочность только 80 кг/мм^2. Еще более резко выражено упрочнение в сплавах никеля с 10–20% Sn, способных достичь твердости до НВ 500, и в сплавах Ni–Mn–Cu, лежащих на разрезе Cu–MnNi.

Мельхиор и нейзильбер. К типичным твердым растворам относятся медноникелево-цинковые сплавы с 5–35% Ni и 13–45% Zn, известные под различными названиями: нейзильбер, мельхиор, китайское серебро и т. п. Нейзильберы содержат никель и цинк в таком соотношении, чтобы получить однородный α-твердый раствор. Ранее чаще всего применялся нейзильбер с 15% Ni и 20% Zn. Нейзильберы обладают высокой пластичностью и применяются в виде лент, штампованных изделий, проволоки и т. п. Нужно отметить, что под названием мельхиор встречаются и сплавы, вовсе не содержащие цинка, например сплав с 80% Cu и 20% Ni.

Для улучшения обрабатываемости нейзильберов резанием в них иногда вводят свинец, несмотря на то, что свинец в этих сплавах, как и в β-латунях, вызывает горячеломкость и делает их неподходящими для горячей обработки. Зато свинцовистые нейзильберы могут применяться для станочного изготовления мелких деталей для точной аппаратуры.

Электротехнические сплавы

Поскольку никель является одной из важнейших составных частей большинства электротехнических сплавов, в этой главе представлена общая информация об электротехнических сплавах на основе Ni.

Из числа электротехнических сплавов можно выделить несколько групп, имеющих различное назначение и различные свойства:

1) сплавы для постоянных магнитов с большой коэрцитивной силой и высокой магнитной индукцией;

2) сплавы с высокой магнитной проницаемостью;

3) немагнитные сплавы ферромагнитных металлов;

4) сплавы для проводов с большой электропроводностью;

5) сплавы для реостатов с большим сопротивлением и по возможности с малым температурным коэффициентом;

6) сплавы для нагревателей электрических печей и других аппаратов с большим сопротивлением, малым температурным коэффициентом и большой жаростойкостью;

7) сплавы для точных измерительных приборов с большим сопротивлением, особенно малым температурным коэффициентом и с возможно малой величиной термоэлектродвижущей силы в паре с медью, поскольку медь является обычным материалом для контактов;

8) сплавы для термопар с большой жаростойкостью и большой термоэлектродвижущей силой в паре с каким-либо из доступных жаростойких сплавов.

Сплавы первых трех групп уже рассмотрены в разделе о железных сплавах. Там же было указано, что из всех технически применяемых сплавов для постоянных магнитов наилучшими являются сплавы, содержащие никель, что основной сплав с высокой магнитной проницаемостью содержит более 70% никеля (пермаллой и др.) и что немагнитными (парамагнитными) сталями и чугунами в первую очередь являются никелевые аустенитные стали и чугуны.

Сплавы четвертой группы являются исключением и совсем не содержат никель. Это вполне понятно, так как высокая электропроводность — свойство чистых металлов, а из чистых технических металлов наибольшей электропроводностью обладают медь и алюминий. Никель даже в чистом виде обладает электропроводностью, равной всего 15% от электропроводности меди, а в сплавах, состоящих из твердых растворов, электропроводность падает еще сильнее. Именно на этом и основано самое широкое применение никелевых сплавов в качестве материалов 5, 6, 7 и 8-й групп по только что приведенной классификации.

В качестве материалов 5-й группы могут употребляться сплавы никеля с медью (константан с 59% Cu, 40% Ni и 1% Mn), никеля с железом (ферроникель) и в случае, если реостаты могут сильно разогреваться в работе, то и сплавы никеля с хромом или тройные сплавы Fe–Ni–Cr.

В качестве материалов 6-й группы следует применять сплавы никеля с хромом или сплавы Fe–Ni–Cr. Все эти сплавы, известные под общим названием *нихромов,* отличаются большой жаростойкостью и очень большим электросопротивлением (среди металлов, поддающихся механической обработке для изготовления проволоки). Рабочая температура нихромовых проволок может доходить до 1000...1100°С. Здесь уместно подчеркнуть, что жаростойкость является одним из важнейших свойств сплавов для нагревательных приборов. Дело в том, что само по себе большое омическое сопротивление при высокой температуре могло бы быть обеспечено и такими чистыми металлами, как железо или никель. Однако окисляемость этих металлов, вызванная отсутствием прочной защитной поверхностной пленки окислов, и переменность сопротивления с температурой не позволяют их применять при температурах выше 600°С для железа и выше 800...900°С для никеля.

Нихромы бывают двойные (80% Ni, 20% Cr) и тройные (например, с 15% Cr и 16% Fe). Во всех нихромах имеется марганец, который добавляется как раскислитель, дегазификатор и десульфуризатор.

Удельное электросопротивление нихромов 1,1–1,2 Ом·мм^2/м, т. е. примерно в 10 раз больше, чем у таких металлов, как платина и железо (~0,10 Ом·мм^2/м), и в 20 с лишним раз больше, чем у вольфрама и молибдена (~0,05 Ом-мм^2/м). Температурный коэффициент электросопротивления нихромов в зависимости от состава сплава и температурного интервала равен 0,0001–0,00001, т. е. в десятки и сотни раз меньше, чем у чистых технических металлов.

Для измерительной аппаратуры нихромы все же не подходят, так как температурный коэффициент сопротивления у них еще слишком велик (особенно при температурах 20...200°С), и они дают очень большую термоэлектродвижущую силу в паре с медью.

Помимо очень ценных электротехнических свойств, нихромы обладают высокими механическими свойствами, что в соединении с жаростойкостью делает их весьма интересными как конструкционный материал.

С нихромами конкурируют тройные сплавы (Fe–Cr–Al) на железной основе. Эти сплавы содержат около 4–7% A1, 15–35% Cr и небольшое количество углерода (до 0,10%). Имея даже более высокое сопротивление, чем нихромы, эти сплавы к тому же отличаются большей жаростойкостью, вызванной плотной пленкой окиси, богатой A_2O_3. Рабочая температура этих сплавов может доходить до 1350°C. Однако эти сплавы гораздо менее эластичны, чем нихромы, и труднее обрабатываются механическими методами.

В качестве материалов 7-й группы из уже названных сплавов подходит только константан (59% Cu, 40% Ni, 1% Mn). У остальных сплавов слишком высок температурный коэффициент электросопротивления. У константана единственным недостатком является большая термоэлектродвижущая сила в паре с медью. В этом отношении значительно выше стоят *манганин* и некоторые сплавы, не содержащие никеля. В то время как у константана на 1°C разности температур возникает в паре с медью термоэлектродвижущая сила в 39 мкв, у манганина (85% Cu, 12% Mn, 3% Ni) термоэлектродвижущая сила 1–2 мкв, а у алюминиевого манганина (84% Cu, 12% Mn, 4% Al) — всего 0,2 мкв.

Температурный коэффициент всех трех последних сплавов близок к нулю (менее 0,00003) и может быть даже отрицательным в зависимости от колебаний состава). Абсолютная величина электросопротивления всех этих сплавов также одного порядка и равна 0,43–0,5 Ом·мм^2/м.

В качестве сплавов для проволок термопар широкое применение нашли константан, нихром и сам никель. Константан употребляется в паре с медью, железом, серебром или нихромом, а нихром — в паре с никелем. Характеристика отдельных термопар дана на рисунке 9.5. Достоинством константановых и нихромовых термопар является их большая чувствительность. Предел применимости термопар зависит от диаметра проволок и метода защиты от окисления. Термопары, содержащие константан, могут употребляться до 500...600°C без специальной защиты и до 900°C при изоляции от воздуха. Нихромовые термопары могут употребляться до 900°C (тонкие термопары до 700...800°C) без специальной защиты от окисления и до 1000...1100°C в хорошей изоляции. Нихром для термопар обычно содержит 8–12% Cr и совсем не содержит железа.

Помимо приведенных на рисунке 9.5 материалов широко применяются термопары из сплавов *хромель* и *алюмель.* Хромель — двойной сплав никеля с 9,0–10% Cr с небольшими добавками марганца. Алюмель — сплав никеля с 2% A1, 2% Mn и 1% Si. Термопара из алюмеля и хромеля может применяться до 1000°C и дает при 1000°C электродвижущую силу в два раза большую, чем термопара платина-платинородий.

Очень большой электродвижущей силой обладают термопары нихром — константан и железо — копель (сплав Cu–Ni с 43,5% Ni).

Первая из них имеет при 600°C электродвижущую силу в 43, а вторая в 36 мв.

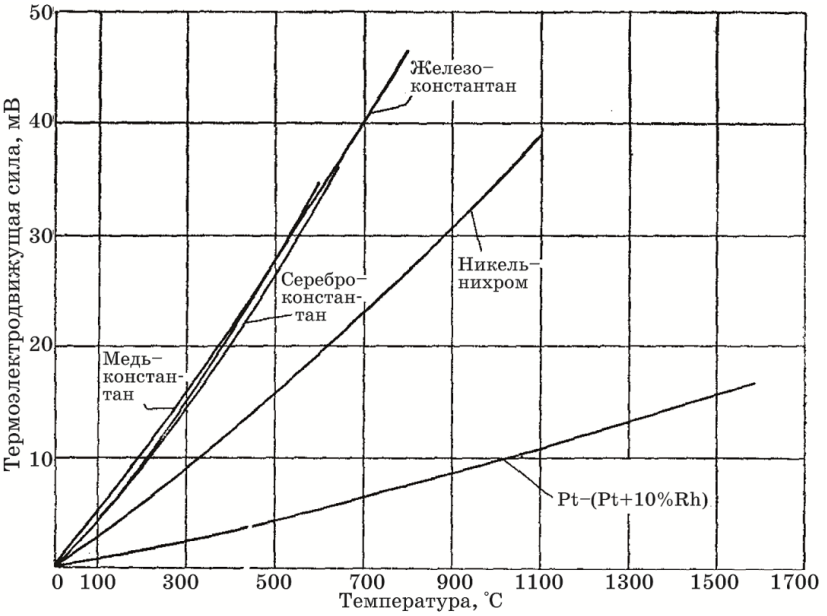


Рис. 9.5

Электродвижущие силы различных термопар (температура холодных концов 0°С)

Жаропрочные сплавы на никелевой и кобальтовой основах

Однородные твердые растворы на никелевой и кобальтовой основах (нихром, кохром и др.) не обладают высокой жаропрочностью, хотя их жаростойкость (сопротивление окислению) значительно выше, чем у сплавов железа. Ползучесть нихромов и других родственных сплавов при 700...800°С очень велика.

Для использования никелевых и кобальтовых сплавов в качестве конструкционных жаропрочных материалов при 700...800°С потребовалось дополнительное легирование их такими элементами, которые создали в них гетерогенную структуру с упрочнителями в виде сложных интерметаллидов или карбидов.

Типичными представителями никелевых жаропрочных сплавов являются сплавы типа *нимоник* — специальные алюминиево-титанистые нихромы, содержащие 62–75% Ni, 18–20% Cr, 0,7–1,8% A1 и 1,5–3% титана.

Сплавы типа нимоник при высоких температурах (выше 1000°С) являются однородным раствором и делаются гетерогенными лишь при высокотемпературном отпуске (около 700...750°С), во время которого выделяются дисперсные частицы упрочнителя.

Добавка только одного алюминия, который образует химическое соединение Ni_3Al, сильно повышает жаропрочность сплава. Добавка одного титана, который также дает соединение Ni_3Ti, действует значительно слабее. Наибольший эффект получается при одновременном введении алюминия и титана, когда образуется сложный твердый раствор титана в решетке Ni_3A1. Кристаллическая решетка такого раствора еще больше отличается от решетки основного раствора Ni–Cr, чем решетка Ni_3A1. Поэтому коагуляция тройного раствора требует для своего протекания более сложного диффузионного процесса и идет медленнее.

Сплавы типа нимоник применяются в состоянии, закаленном с 1000...1100°С и отпущенном при температуре не ниже рабочей температуры (обычно около 700...750°С), и в этом состоянии могут работать более 100 ч при 750°С под напряжением 25–30 кг/мм^2, а при 800°С под напряжением 10–17 кг/мм^2.

Еще более жаропрочными являются кобальтовые сплавы:

а) виталлиум с 63% Co, 27% Cr, 6% Mo, 3% Ni и 0,3% C;

б) сплав 816 с 50% Co, 20% Cr, 20% Ni, до 4% W, до 4% Mo, до 4% Nb и 0,4% C;

в) сплав 590 с 20% Co, 20% Cr, 4% W, 4% Mo, 4% Nb, 0,4% C, остальное — железо.

Упрочнителями в кобальтовых сплавах являются как сложные карбиды, так и интерметаллиды, в которые входят, помимо основных компонентов, вольфрам и молибден.

Гетерогенная структура этих сплавов создается уже в литом виде. Поэтому кобальтовые сплавы указанных типов применяются преимущественно в литом состоянии.

Эти сплавы могут работать длительное время (свыше 100 ч) при 700°С под напряжением до 35 кг/мм^2, при 800°С под напряжением 18–20 кг/мм^2 и даже при 900°С под напряжением около 10 кг/мм^2.

Как видно из этих данных, преимущества более дорогих кобальтовых сплавов становятся явными при рабочей температуре 800°С и выше. При 700...750°С целесообразнее применять более дешевые никелевые сплавы, а при еще более низких температурах — железные сплавы.

Вопросы для самопроверки

1. Свойства никелевых сплавов.
2. Постоянные примеси никеля. Какое влияние они оказывают на свойства никеля?
3. Какие вредные примеси в никеле вы знаете? Почему эти примеси являются вредными?
4. Что такое краснoломкость никеля? Что является причиной краснoломкости и как от нее избавится?
5. Классификация никелевых сплавов.
6. Что такое монель-металл? Свойства, применение.
7. Как повысить механические свойства монель-металла?
8. Для чего используются нихромы? Какими свойствами они обладают?
9. Какие жаропрочные сплавы вы знаете?
10. Какие легирующие элементы используют в жаропрочных никелевых сплавах? С какой целью?
11. Электротехнические свойства никеля и его сплавов. Области применения.
12. Что такое мельхиор? Нейзильбер?
13. Как улучшить обрабатываемость резанием нейзильберов?
14. Что такое константан? Для чего он применяется?

РАЗДЕЛ 10. ЦИНК

История развития металлов идет от золота к бронзе (сплав меди с оловом), далее к латуни, в основе которой лежит цинк, упоминаемый в сочинениях Платона как орихалк.

В музее Палестины существуют два предмета, датированные 330 г. до н. э.: чаша царя Дария и птица, выполненные из сплава на основе цинка с составом 75% меди и 23,5% цинка.

История развития и промышленного освоения цинка — это история промышленного шпионажа. Приоритет получения цинка относится к Индии. В VI–V в. до н. э. китайцы выкрали этот способ получения цинка. В Средние века этот способ был привезен из Китая в Европу доминиканским монахом вместе со своим учеником химиком и медиком Фомой Аквинским.

В 1530 г. швейцарский металлург Теофраст Парацельс, который также был и химиком, и медиком, освоил промышленное получение цинка и дал название металлу цинк.

В 1536 г. русский ученый Шлеттер разработал методику исследования свойств цинка и дал ему название туция.

В 1742 г. Менделеев при разработке периодической системы снова вернулся к названию цинк.

В 1758 г. в Англии построена серия заводов по производству цинка.

В 1798 г. немецкий ученый Рихберг после поездки в Англию организовал первый завод в Германии по производству цинка. Причиной медленного развития цинка служат его свойства. Температура плавления 420°С, а температура кипения — 906°С. При взаимодействии цинка с воздухом он моментально окисляется с образованием белого налета — окиси цинка.

В основном цинк используется для производства латуни.

Обозначение латуни

Цифра — процентное содержание меди в сплаве с цинком.

Л90 — применяется для плакирования специальных изделий.

Л85 — используется для производства листов, труб, проволок.

Л68 — самая распространенная марка латуни, из которой изготавливаются листы, профилированные прутки, трубы различного сечения, готовые изделия литья.

Все марки латуни очень хорошо припаиваются припоями типа ПОС40, ПОС20, ПОС18.

Сами латуни являются хорошими припоями для сварки бронзы и стали ПМЦ48 и ПМЦ36.

Основные преимущества латуни в сравнении с бронзой:

1) более высокая прочность (более 400 МПа);

2) более высокая жидкотекучесть;

3) более высокая коррозионная стойкость;

4) высокая пластичность при комнатных температурах;

5) хорошая свариваемость, практически любыми методами сварки.

Основная область применения латуни — это транспортная (водный и воздушный транспорт), применяется также в ракетостроении, автомобилестроении и для производства мелких деталей быта.

Недостатком латуни является сильное упрочнение при прокате (что приводит к растрескиванию поверхности), которое, тем не менее, легко устраняется: деталь необходимо обстучать киянкой, а мелкие детали подвергнуть встряхиванию.

Существуют два химических элемента, которые приводят к охрупчивости латуни: Bi — 0,005%, S — 0,03%.

В промышленно используемых латунях висмута не более 0,002%, а серы не более 0,03%.

Используя свойства хладноломкости латуни в присутствии серы, выпускают специальную автоматную латунь марки ЛС59 (~59% РБ), в которую добавляются висмут, сера, а довольно часто более дешевый металл — свинец. Сплавы, в которых вместо цинка присутствуют другие химические элементы (железо, олово, свинец), обладают высокой коррозионной стойкостью, особенно в водной среде, поэтому используются для изготовления гребных винтов, различных наружных патрубков, креплений. Наиболее эффективной добавкой для повышения коррозионной стойкости латуни является алюминий (1–2% Al), который повышает коррозионную стойкость латуни в 2–2,5 раза.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое латунь?
2. Маркировка и марки латуни.
3. Основные преимущества латуни в сравнении с бронзой.
4. Недостатки латуни. Свойства никелевых сплавов.
5. Постоянные примеси никеля.
6. Как делятся электроизоляционные компаунды по химическому составу?

ЧАСТЬ 2
ДИЭЛЕКТРИКИ

РАЗДЕЛ 11. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

11.1. Диэлектрические материалы

К диэлектрическим материалам относятся:

1) электроизоляционные материалы;

2) активные диэлектрики.

Электроизоляционные материалы используются для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами.

Назначение электрической изоляции — не допускать прохождения электрического тока по каким-либо нежелательным путям, помимо тех, которые предусмотрены электрической схемой. Электроизоляционные материалы используются в качестве диэлектриков.

Активные диэлектрики — диэлектрики с управляемыми свойствами: сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты.

Электроизоляционные материалы подразделяют по их *агрегатному состоянию* на:

1) газообразные;

2) жидкие;

3) твердые;

4) твердеющие материалы (особая группа).

Подразделяют по *химической природе* на:

1) органические (C, H, O_2, N, галогены);

2) неорганические;

3) элементоорганические материалы (табл. 11.1).

Электроизоляционные материалы обладают двумя практическими механическими свойствами:

1) гибкостью;

2) эластичностью.

Таблица 11.1

Материалы	Достоинства	Недостатки
1. Органические вещества	Гибкость, эластичность, возможность выполнять их в любой форме	Имеют относительно низкую нагревостойкость (кроме фторолонов, полиамидов)
2. Неорганические вещества	Высокая нагревостойкость	Хрупкие, неэластичные, сложная технология изготовления
3. Элементоорганические материалы (в технике нашли кремнийорганические и фторорганические соединения)	Имеют более высокую стойкость к нагреванию и воспламенению, чем органические	Низкая электрическая прочность. Кислород, содержащийся в воздухе, вызывает окисление материалов

Для обеспечения нормальной работы оборудования при воздействии высокой рабочей температуры применяют неорганические электроизоляционные материалы.

К промежуточным электроизоляционным материалам относятся элементоорганические материалы, в молекулы которых входят атомы других элементов (Si, Al, P и др.).

11.2. Общие сведения об органических полимерах

Органическими веществами называют соединения углерода с другими элементами.

Углерод обладает высокой способностью к образованию большого числа химических соединений с разнообразным строением молекулы преимущественно двух типов:

1) цепочным;

2) разветвленным (кольцевым).

Некоторые органические электрические материалы представляют собой *низкомолекулярные вещества*, молекулы которых образованы 1 или 10 атомами (хладоны, углеводороды, нефтяные масла и т. п.).

Однако большое число органических электрических материалов принадлежит к *высокомолекулярным соединениям* (до 1000 атомов), например целлюлоза, шелк, белки, каучук и т. п.

Разделяются на два класса:

1) искусственные материалы;

2) синтетические высокомолекулярные материалы.

Способы получения высокомолекулярных материалов:

1) искусственные материалы получают путем химической обработки природных высокомолекулярных веществ;

2) синтетические материалы изготавливают из низкомолекулярных веществ.

По своей природе высокомолекулярные соединения относятся к полимерам, т. е. веществам, строение которых представляет собой совокупность большого числа имеющих одинаковое строение групп *атомов-мономеров*. Реакция образования — *полимеризация* (из газообразного ↔ в жидкое ↔ твердое), т. е. полимеризация — это реакция образования полимера из мономера.

Скорость полимеризации можно регулировать, изменяя условия, в которых протекает данный процесс (повышение температуры, освещение, катализаторы).

Пример: стирол — жидкий ненасыщенный углеводород, имеющий состав C_8H_8. Благодаря наличию двойной связи между двумя соседними атомами С полимер стирола — полистирол — является уже твердым веществом, т. е. цепочка состоит из одинаково повторяющихся звеньев с измененным характером связей между атомами С. $t_{пл} = –33°C$, $t_{разм} = 75...80°C$. Не теряет своих свойств на холоде и в темноте продолжительное время, но при освещении и добавлении катализатора способен резко ускорить переход из жидкого в твердое состояние.

Деполимеризация — обратный процесс полимеризации, т. е. процесс разложения полимера на вещества с меньшей степенью полимеризации.

Сополимеризация — полимеризация нескольких мономеров различного состава.

Поликонденсация — процесс образования одновременно с образованием полимера низкомолекулярных веществ.

Полимеры делятся на две группы:

1) линейные (имеют вид цепочек или нитей);

2) пространственные (развиты в пространстве в различных направлениях и приближены к форме шара).

Линейные полимеры получаются при наличии двух валентностей (реактивные точки), к которым ведется присоединение мономеров.

Пространственные полимеры получаются за счет трех и более валентностей.

При наличии одной валентности полимеризация невозможна.

Различие между линейными и пространственными полимерами весьма существенны:

– линейные полимеры сравнительно гибки и эластичны, многие из них при умеренном повышении температуры размягчаются, способны растворяться в растворителях;

– пространственные полимеры обладают большей жесткостью, размягчение происходит лишь при весьма высоких температурах, а многие из них разрушаются (сгорают, горят), труднорастворимы.

На практике разделяют полимеры:

1) *термопластичные* — при достаточно низких температурах тверды, но при нагреве мягкие. Характерной особенностью является то, что нагрев до температуры плавления не вызывает необратимых изменений их свойств. Технология проще;

2) *термореактивные* — при нагреве происходят необратимые изменения их свойств (запекаются), теряя свойства растворимости (должны выдерживать воздействие повышенных температур).

11.3. Механические свойства диэлектриков

Прочность при растяжении, сжатии и изгибе

Значение пределов прочности при растяжении $\sigma_р$, сжатии $\sigma_с$ и изгибе $\sigma_и$ в системе СИ выражаются в паскалях ($1\ Па^{-1}$ н/м$^2 \approx 10^{-5}$ кгс/см^2).

Так как в большинстве электроизоляционные материалы имеют слоистое строение, максимальная прочность зависит от направления приложения нагрузки.

Для некоторых диэлектриков (стекло, керамика, пластмассы и т. д.) предел прочности при сжатии значительно больше, чем при растяжении и т. п. (в то время как у металлов $\sigma_р$, $\sigma_с$ и $\sigma_и$ имеют один и тот же порядок).

Прочность материала зависит от:

– площади поперечного сечения;

– температуры;

– влажности (для гигроскопичных материалов).

Термопластичные материалы способны деформироваться при *длительном воздействии*, т. е. происходит пластическое, холодное течение материала.

Механическая прочность электроизоляционных материалов сильно зависит от температуры, как правило, уменьшаясь с ее ростом (рис. 11.1).

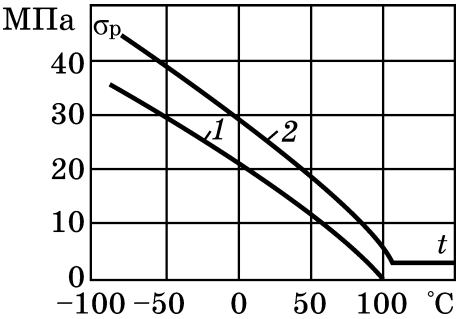


Рис. 11.1

Зависимость от температуры предела прочности при растяжении полиэтилена низкой плотности:

1 — необлученный материал; *2* — облученный.

При повышении температуры и приближении ее к температуре размягчения данного материала пластическое течение материала сильно увеличивается. В ряде случаев большое практическое значение имеют хрупкость, твердость и некоторые другие механические характеристики электроизоляционных материалов.

Хрупкость — способность разрушаться без заметной пластической деформации. Зависит от температуры материала, статической и динамической нагрузки.

Ударная вязкость материала — это затраченная на излом образца энергия, отнесенная к площади поперечного сечения (Дж/м^2).

Вязкость. Динамическая вязкость (или коэффициент внутреннего трения) жидкости в системе СИ измеряется в Паскалях, умноженных на секунды (Па·с).

Кинематическая вязкость υ равна отношению динамической вязкости жидкости к ее плотности: $\upsilon = \eta/\rho$ (м^2/с).

Как правило, закон изменения вязкости с температурой соответствует уравнению экспоненты:

$$\eta = A\exp\frac{\omega}{RT},$$

где А — постоянная, характеризующая данную жидкость; ω — энергия активации, равная работе перехода молекулы из одного устойчивого положения в другое.

Тепловые свойства диэлектриков

Нагревостойкость — способность диэлектрика выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации без недопустимого ухудшения его свойств.

Оценка нагревостойкости производится по методу Мартенса при изгибающем напряжении в 5 МПа или по способу кольца и шара при прохождении шарика через кольцо при вдавливании его в материал.

Температурой вспышки называют температуру жидкости, при нагреве до которой смесь ее паров с воздухом вспыхивает при поднесении к ней пламени.

Температура воспламенения — температура жидкости, при которой жидкость загорается.

Необратимое ухудшение качества изоляции при длительном воздействии повышенной температуры вследствие медленно протекающих химических процессов называется *тепловым старением изоляции*.

$$\ln\tau = A/T + B \text{ — продолжительность старения,}$$

где τ — продолжительность старения; T — абсолютная температура старения; A и B — величины, постоянные для данного материала, данных и условий теплового старения.

Таким образом, зависимость τ (в логарифмическом масштабе) от величины, обратной абсолютной температуре старения, должна выражаться прямой линией (рис. 11.2).

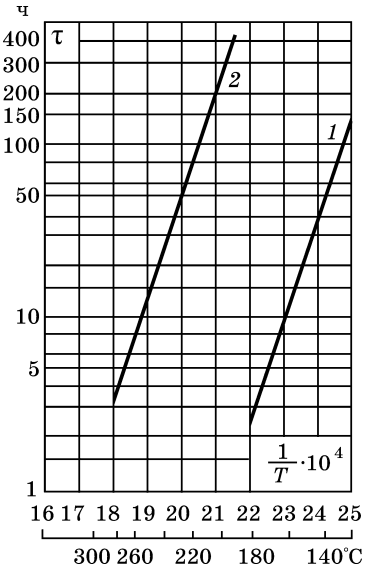


Рис. 11.2

Продолжительность старения τ пленок до появления трещин при изгибе в функции температуры масляно-битумного лака (*1*) и кремний органического лака (*2*)

В большинстве случаев наклон этих прямых таков, что уменьшение τ вдвое соответствует повышению температуры старения в среднем на 10 К. Это можно проверить на рисунке 11.2.

В электрических машинах и аппаратах повышение нагревостойкости, которое обычно определяется нагревостойкостью изоляции, позволяет получать более высокую мощность при неизменных габаритах и уменьшении стоимости изделия.

По ГОСТ 8865-70 можно определить классы нагревостойкости.

Классы нагревостойкости

Y — волокнистые материалы (пряжа, ткани, бумаги и т. п.), наибольшая допустимая рабочая температура 90°С;

А — органические волокнистые материалы (полиамидные пленки, литые полиамидные смолы и т. д.), температура 105°С;

Е — пластические массы с органическим наполнителем и подобные им смолы (гетинакс, текстолит и т. д.), температура 120°С;

В — большое содержание неорганических компонентов (щепаная слюда, асбест и т. п.), температура 130°С;

F — миканиты (изделия на основе стекловолокна без подложки или с неорганической подложкой, с применением органических связующих и пропитывающих материалов повышенной нагревостойкости), температура 155°С;

Н — материалы, полученные при использовании кремнийорганических смол особо высокой нагревостойкости, температура 180°С;

С — чисто неорганические материалы, не содержащие склеивающих и пропитывающих составов (политетрафторэтилен — фторопласт-4), температура 180°С.

Хладостойкость — способность изоляции выдерживать низкие температуры (от 60 до 70°С). Испытания на хладостойкость нередко сопровождают вибрациями.

Теплопроводность — один из видов переноса теплоты от более нагретых частей к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры.

Теплота, выделившаяся вследствие потерь мощности в окруженных электроизоляцией проводниках в магнитопроводах, а также вследствие диэлектрических потерь в изоляции, переходит в окружающую среду через различные материалы. Теплопроводность материалов характеризуют теплопроводностью $\gamma_т$, входящей в уравнение Фурье.

Уравнение Фурье:

$$\Delta P_T = \gamma_T \frac{dT}{dl} \Delta S,$$

где $\gamma_т$ — коэффициент теплопроводности; ΔP_T — мощность теплового потока сквозь площадку ΔS, нормальную к потоку; d_T/dl — градиент температуры.

Значения коэффициента теплопроводности некоторых диэлектриков приведены в таблице 11.2.

Таблица 11.2

Значение теплопроводности некоторых диэлектриков

Материал	$\gamma_т$, Вт/(м), Вт/(м)·К	Материал	$\gamma_т$, Вт/(м), Вт/(м)·К
Воздух (в небольших зазорах)	0,05	Фарфор	1,6
Битумы	0,07	Стеатит	2,2
Бумага	0,10	Двуокись титана	6,5
Лакоткань	0,13	Кристаллический кварц	12,
Гетинакс	0,35	Алюминоксид	530

Продолжение табл. 11.2

Материал	$\gamma_т$, Вт/(м), Вт/(м)·К	Материал	$\gamma_т$, Вт/(м), Вт/(м)·К
Вода	0,58	Окись магния	36
Плавленый кварц	1,25	Окись бериллия	218

Как правило, кристаллические диэлектрики имеют более высокие значения $\gamma_т$, чем аморфные.

Тепловое расширение диэлектриков, как и других материалов, оценивают *температурным коэффициентом линейного расширения* (ТКЛР, измеряется в $К^{-1}$):

$$ТКЛР = \alpha_c = l^{-1}dl/DT,$$

где α_l — температурный коэффициент линейного расширения (табл. 11.3).

Материалы, обладающие малыми значениями ТКЛР, имеют, как правило, наиболее высокую нагревостойкость и наоборот.

Таблица 11.3

Температурный коэффициент линейного расширения некоторых диэлектриков

Материал	$a_l \cdot 10^6$, K^{-1}	Материал	$a_l \cdot 10^6$, K^{-1}
Поливинилацетат	265	Поливинилформаль	64
Поливинилхлорид (пластикат)	160	Эпоксидные смолы	55
Полиэтилен	145	Слюда	37
Ацетат целлюлозы	120	Силикатное стекло	9,2
Найлон	115	Глиноземистая керамика	7
Политетрафторэтилен	100	Стеатит	6,6
Нитроцеллюлоза	100	Фарфор	3,5
Полиметилметакрилат	70	Плавленый кварц	0,55
Полистирол	68		

Вопросы для самопроверки

1. Для чего используются электроизоляционные материалы?
2. Классификация электроизоляционных материалов.
3. Способы получения высокомолекулярных материалов.
4. Что такое полимеризация?
5. Как можно регулировать скорость полимеризации?
6. Что такое деполимеризация?
7. Что такое сополимеризация?
8. Что такое поликонденсация?
9. Чем отличаются линейные полимеры от пространственных?
10. Какие полимеры применяются на практике?
11. От чего зависит прочность материала?
12. Как зависит предел прочности при растяжении от температуры?
13. Что такое хрупкость, ударная вязкость материала?
14. Какие тепловые свойства диэлектриков вы знаете? Определение.
15. Классы нагревостойкости.
16. Что такое теплопроводность?
17. Чем оценивают тепловое расширение диэлектриков?

РАЗДЕЛ 12. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

12.1. Электропроводность диэлектриков

Абсорбционными токами называют токи смещения различных видов замедленной поляризации у технических диэлектриков.

При постоянном напряжении абсорбционные токи протекают только в момент включения или выключения, а при переменном — все время нахождения в электрическом поле.

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению слабых по величине сквозных токов.

$I_{ут} = I_{ск} + I_{аб}$ — плотность тока утечки.

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения D:

$$I_{см} = \frac{\partial D}{\partial \tau} \approx I_{аб}.$$

После завершения процесса поляризации через диэлектрик протекает только сквозной ток.

Истинное сопротивление диэлектрика $R_{из}$, определяющее величину сквозного тока:

$$R_{из} = \frac{U}{i_{ут} - \sum i_{аб}} = \frac{U}{i_{ск}},$$

где U — приложенное напряжение.

На рисунке 12.1 показан характер зависимости тока через диэлектрик от времени.

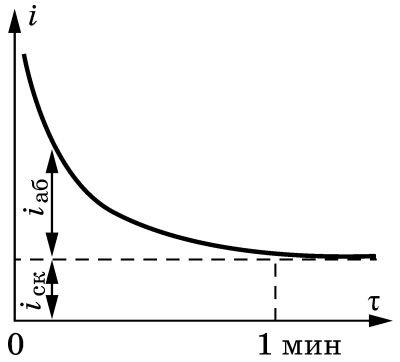


Рис. 12.1

Зависимость тока через диэлектрик от времени:

$i_{аб}$ — ток абсорбции (поляризации); $i_{ск}$ — сквозной ток.

Для твердых диэлектриков различают объемную и поверхностную проводимости. Они связаны с удельным объемным сопротивлением и удельным поверхностным сопротивлением.

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление рассчитывается по формуле

$$\rho = \frac{RS}{h},$$

где ρ — удельное объемное сопротивление, Ом·м; R — объемное сопротивление образца, Ом; S — площадь электрода, м^2; h — толщина образца, м.

Удельная объемная проводимость γ измеряется в См·м$^{-1}$.

Удельное поверхностное сопротивление:

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

где R_s — поверхностное сопротивление, Ом, между параллельно поставленными электродами шириной d, отстоящими друг от друга на расстоянии l.

Удельная поверхностная проводимость γ_s измеряется в сименсах (См).

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению $R_{из}$, складывается из объемной и поверхностной проводимостей:

$$\gamma_{полн} = \gamma + \gamma_s,$$

$\tau_0 = R_{из}C$ — постоянная времени саморазряда конденсатора;

где $R_{из}$ — сопротивление изоляции диэлектрика конденсатора; C — емкость конденсатора.

$$\tau_0 = \rho\varepsilon_0\varepsilon_r,$$

$$U_{\tau 0} = \frac{U_0}{C},$$

где U — напряжение на электродах конденсатора спустя время τ после отключения его от источника напряжения; U_0 — напряжение, до которого был заряжен конденсатор (τ = 0); $R_{из}$ — сопротивление изоляции (сопротивление сквозному току).

12.2. Электропроводность твердых тел

Электропроводность твердых тел обусловлена передвижением как ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а у некоторых и наличием свободных электронов.

В диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена перемещением ионов, освобожденных под влиянием флуктуаций теплового движения (сначала ионы примесей, потом кристаллической решетки).

В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность связана только с наличием примесей, удельная проводимость их весьма мала.

$$n_0 = n_{0\max}\exp(-\frac{\omega_g}{kT}); \quad u = u_{\max}\exp(-\frac{\omega_n}{kT}),$$

где n_{0max} и u_{max} — соответствуют значению T = ∞; ω_g — энергия диссоциации ионов; ω_n — энергия перемещения иона, определяющая переход его из одного неравновесного положения в другое.

$$\gamma = A\exp\left(-\frac{b}{T}\right),$$

где $b = \frac{\omega_0 - \omega_n}{k}$;

$$A = n_{0\max} u_{\max} q.$$

Если разнородные ионы, то:

$$\gamma = \sum A_i \exp(-\frac{\omega_i}{kT}).$$

Для приближенных расчетов используется формула

$$\gamma = \gamma_0 \exp(\alpha t),$$

гдеγ_0, α — постоянные величины для данной жидкости; t — температура, °С.

Выражение зависимости удельного объемного сопротивления от температуры:

$$\rho = B\exp(\frac{b}{T}) \quad \text{или } \rho = \rho_0 \exp(-\alpha t).$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления:

$$TK_\rho = \alpha_\rho = -\frac{b}{T^2};$$

$$TK_\rho = \alpha_\rho = -\alpha.$$

При напряженности поля, превышающей 10–100 МВ/м:

$\gamma_e = \gamma\exp(\beta E)$ — формула Пуля,

где E — напряженность поля; γ — удельная проводимость в области независимости γ от E; β — коэффициент, характеризующий материал.

При напряженности поля E, близкой к пробивочному состоянию, действует формула Френкеля:

$$\gamma_e = \gamma \exp(\beta_1 \sqrt{E}).$$

Поверхностная проводимость твердых тел

Поверхностная электропроводность твердых тел обусловлена наличием на поверхности влаги или загрязнения.

Сильное влияние загрязнения поверхности некоторых диэлектриков на их удельное поверхностное сопротивление показано в таблице 12.1.

Наиболее высокими значениями удельного поверхностного сопротивления обладают неполярные диэлектрики.

Таблица 12.1

Удельное поверхностное сопротивление некоторых материалов при относительной влажности 70%

Диэлектрик	ρ_s при неочищенной поверхности, Ом	ρ_s после очистки поверхности, Ом
Оконное стекло	$2 \cdot 10^8$	10^{11}
Плавленый кварц	$2 \cdot 10^8$	10^{13}
Микалекс	10^8	10^{13}

Вопросы для самопроверки

1. Что называют абсорбционными токами?
2. Из чего складывается полная проводимость твердого диэлектрика?
3. Чем обусловлена электропроводность твердых тел?
4. Влияет ли загрязнение поверхности диэлектриков на удельное поверхностное сопротивление?

РАЗДЕЛ 13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ

13.1. Пробой диэлектриков

Пробой диэлектрика — это явление, когда диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства электроизоляционного материала.

Пробивное напряжение ($U_{пр}$) — это напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика и создается канал проводимости. Является характеристикой электрической прочности диэлектрика. Электрическая прочность определяется пробивным напряжением, отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h} —$$ электрическая прочность,

где h — толщина диэлектрика.

Пробой газа является ударной и фотонной ионизацией.

Одним из важных факторов, способствующих пробою жидкостей в результате ионизационных тепловых процессов, является наличие примесей.

Пробой твердых тел может быть вызван электрическим или тепловым полем.

13.2. Пробой твердых диэлектриков

Различают четыре вида пробоя диэлектриков:

1) электрический пробой макроскопически-однородных диэлектриков;

2) электрический пробой неоднородных диэлектриков;

3) тепловой (электротепловой) пробой;

4) электрохимический пробой.

Электрический пробой макроскопически-однородных диэлектриков

Время пробоя меньше 10^{-7}–10^{-8} с и не обусловлен тепловой энергией.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений (щелочногалоидные вещества и органические полимеры).

Электрический пробой неоднородных диэлектриков характерен для технических диэлектриков с газовыми включениями.

Диэлектрики с высокой электрической прочностью — это диэлектрики, имеющие плотную структуру и не содержащие газовых включений (слюда, бумага, тщательно пропитанная жидким диэлектриком, стекло).

Низкой электрической прочностью отличаются диэлектрики с открытой пористостью (мрамор, непропитанная бумага, дерево, пористая керамика). Значения электрической прочности приведены в таблице 13.1.

Таблица 13.1

Значения электрической прочности некоторых твердых диэлектриков в одном поле при частоте 50 Гц

Материал	$E_{пр.дейст.}$, МВ/м	Особенности структуры
Стекло	100–300	Однородные плотные диэлектрики и слоистые, если поле перпендикулярно слоям
Каменная соль	100–150	
Слюда	100–300	
Пропитанная бумага	100-300	
Органические пленки (полистирол, триацетат целлюлозы)	90–120	
Керамика	10–30	Неоднородные по структуре диэлектрики с закрытыми или сообщающимися между собой капиллярами
Микалекс	10–15	
Пластические массы с наполнителем (фенолоформальдегидные, аминопласты)	10–15	
Мрамор	4–5	Диэлектрики с открытыми крупными порами
Пористая керамика	1,5–2,5	
Дерево	4–6	
Непропитанная кабельная бумага	7–10	

Вопросы для самопроверки

1. Что такое пробой диэлектриков?
2. Что такое пробивное напряжение?
3. Какой фактор способствует пробою жидкостей?
4. Чем может быть вызван пробой твердых тел?
5. Какие существуют виды пробоя диэлектриков?
6. Что называется электрическим пробоем макроскопически однородных диэлектриков?
7. Когда имеет место электрический пробой?
8. Для каких материалов характерен электрический пробой?
9. Какие материалы отличаются низкой электрической прочностью?

РАЗДЕЛ 14. СМОЛЫ

14.1. Разновидности смол

Гетероцептные термопластичные смолы

Полиамидные смолы (*полиамиды*) имеют цепочные молекулы, образованные группами –CH–.

Они обладают высокой механической прочностью и эластичностью. Применяются для изготовления синтетических волокон, гибких пленок и пластических масс.

Полиуретаны — линейные полимеры, в цепочках которых между углеводородными остатками располагаются группы –NHCOO–. Они используются для эмалирования проводов. Особенностью таких проводов является способность обслуживаться без предварительной зачистки изоляции, почему эти «самообслуживающиеся» провода весьма удобны при монтаже.

Полиимиды содержат группу –CO–N–CO–. Они выпускаются в виде лаков, пленок, пластмасс и принадлежат к числу наиболее нагревостойких до 500°C.

Фенолоформальдегидные смолы

Бакелит в последней стадии своего изготовления обладает высокой механической прочностью, мало эластичен, склонен к трекингу.

Новолак — пластичная смола, после нагрева сохраняет плавкость и растворимость. Применяется для изготовления пластмасс.

Крезольные смолы менее полярны по сравнению с фенольными, так как в крезоле углеводородный остаток больше, чем в феноле.

Карбамидоформальдегидные и меламиноформальдегидные смолы обладают высокой трекингостойкостью. Используются для изготовления лаков, клеев, пластмасс.

Полиэфирные смолы

Глифталевые смолы получают из глицерина и фталевого ангидрида. Обладают высокой эластичностью, клейкостью и трекингостойкостью.

Поликарбонаты применяются для изготовления пленок, в качестве связующего для текстолитов, для производства литых изделий.

Полиэфиракрилаты обладают малой вязкостью при нормальной температуре, что особенно удобно в целях пропитки и заливки на холоде. Затвердевают без выделения вредных продуктов.

Эпоксидные смолы

Диановые смолы получают из диана и эпилхлоргидрина.

Циклоалифатические смолы получают эпоксидированием непредельных элементов. Они более трекингостойки и короностойки.

Эпоксидные смолы в чистом виде термопластичны, но с добавлением отвердителя быстро отверждаются. Если это происходит под давлением, то по-

лучается изоляция с высокой электрической прочностью. Они применяются для изготовления лаков, клеев, заливочных компаундов. Оказывают токсичное влияние на человека.

Кремнийорганические смолы

Такие смолы обладают высокой нагревостойкостью и низкой гигроскопичностью и используются в изготовлении лаков, компаундов, пластмасс.

Канифоль

Это хрупкая смола, получаемая из живицы после отгонки скипидара. Канифоль состоит из органических кислот. Электроизоляционные свойства характерны для полярных диэлектриков. Температура размягчения 50...70°С. На воздухе она окисляется, температура размягчения повышается, а растворимость снижается.

14.2. Электроизоляционные лаки и компаунды

Лаки и компаунды имеют большое значение в изоляционной технике, они являются твердеющими материалами.

Лаки — это коллоидные растворы смол, битумов высыхающих масел, составляющих лаковую основу в летучих растворителях. При сушке лака растворитель улетучивается, а лаковая основа переходит в новое состояние, образуя лаковую пленку.

По применению электроизоляционные лаки делятся на:

1) пропиточные;

2) покровные;

3) клеящие.

1. *Пропиточные лаки* применяются для пропитки пористой, и в частности волокнистой, изоляции (бумага, картон, пряжа, ткань, изоляция обмоток электромашин и аппаратов). После пропитки поры изоляции заполняются лаком. В результате пропитки повышаются пробивное напряжение, теплопроводность, уменьшается гигроскопичность и т. д.

Нагревостойкость переходит из класса Y в класс А.

2. *Покровные лаки с*лужат для образования механически прочной, гладкой, блестящей, водонепроницаемой пленки на поверхности твердой изоляции. Защищает изделия от действия влаги, растворителей и химически активных веществ. К покровным принадлежат *пигментированные эмали* — лаки, в состав которых входит пигмент, т. е. порошок неорганического состава (обычно оксиды металлов), придающий пленке определенную окраску, улучшающий ее механическую прочность, теплопроводность и адгезию к поверхности, на которую нанесен лак.

Некоторые покровные лаки наносят сразу на металл (*эмаль-лаки*).

3. *Клеящие лаки* предназначены для склеивания между собой твёрдых изоляций или приклеивания их к металлу.

По режиму сушки различают лаки горячей (печной) сушки ($T_{\text{сушки}} > 100°C$) и лаки холодной сушки (воздушной, примерно 25°С, т. е. при комнатной температуре).

Режим сушки лака определяется и основой, и растворителем.

Смоляные лаки — растворы синтетических, искусственных или природных смол.

Бакелитовые — растворы бакелита в спирте. Обладают механической прочностью, но не эластичны и не термостойки, используются для изоляции в аппаратах высокого напряжения.

Глифталевые лаки — растворы глифталевых смол в смесях спирта с жидким углеводородом. У данного вида лаков повышенная гибкость, но пониженная водостойкость.

Кремнийорганические лаки имеют повышенную влагостойкость и нагревостойкость.

Полихлорвиниловые лаки — стойки к химическим веществам.

Шеллачные лаки — растворы шеллака в спирте.

Целлюлозные лаки — растворы эфиров целлюлозы, их пленки термопластичны. Термопластичные лаки холодной сушки, нитролаки механически прочные.

Масляные лаки — основу таких лаков составляют высыхающие масла. В их состав входят сиккативы — вещества, ускоряющие процесс отверждения пленки, и растворители (бензин, керосин). Применяют для производства светлых лакотканей и лакобумаг, а также для пропитки обмоток электромашин и аппаратов.

Черные лаки — в их состав входят битумы, которые и определяют черный цвет как жидкого лака, так и лаковой пленки. Эти лаки дешевы, водостойки, но не эластичны. При нагреве пленки этих лаков склонны к размягчению.

Чисто битумные лаки — растворы битумов в органических растворителях, являются лаками холодной сушки, непригодны в качестве электроизоляционных. Обычно используются в качестве антикоррозийных покрытий металлических изделий.

Масляно-битумные лаки помимо битумов содержат в своей основе высыхающие масла. Имеют свойства битумных и масляных лаков. Растворитель — бензол или толуол. Пленки данных лаков более гибки, менее подвержены действию растворителей и размягчению при нагреве.

Масляно-смоляные лаки — основой являются масло + смола. Применяют для пропитки обмоток маслонаполненных трансформаторов, покрытия изоляции, содержащей фенолоформальдегидные смолы, с целью повышения трекингостойкости изоляции.

Лаки обычно обозначают условными номерами или марками.

Компаунды. Отличаются от лаков отсутствием в составе растворителя. Для разжижения их нагревают.

По применению компаунды делятся на:

– *пропиточные*, назначение аналогично назначению пропиточных лаков;

– *заливочные,* служат для заполнения сравнительно больших полостей, промежутков между различными деталями в электрических машинах и аппаратах, получения сравнительно толстого покрытия на тех или иных электротехнических деталях, узлах, блоках;

– *битумные,* служат для пропитки статорных обмоток. Обеспечивают лучшую водостойкость, так как в них не остается крупных каналов (пор).

В кабельной технике большое значение имеют кабельные компаунды.

Кабельные компаунды

1. *Пропиточные кабельные массы.* Служат для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей. Состав: нефтяное масло + канифоль + синтетическая смола.

2. *Заливочные кабельные массы.* Служат для заливки соединительных, разветвительных и концевых муфт. Состав: битум или нефтяное масло + канифоль.

Описанные выше компаунды термопластичные, они размягчаются (для пропитки и заливки) посредством нагревания, а отвердевают при последующем охлаждении.

Эпоксидные компаунды представляют собой эпоксидную смолу с добавлением наполнителей, пластификаторов и других ингредиентов. Непосредственно перед употреблением в компаунд вводится отвердитель. Применяется в качестве заливочной кабельной массы.

Полиэфирные компаунды. Состав: полиэфирные насыщенные смолы + стирол или метилметакрилат, дают значительную (до 6%) усадку при отвердевании.

Сушка и пропитка изоляции

Этапы пропитки лаком

1. Пропитка.

2. Сушка 5–10 ч при 100...110°С.

3. Погружение в лак при 60...70°С.

Методы сушки

1. В печах.

2. С помощью инфракрасного облучения специальными лампами накаливания с низким накалом нити.

3. На конвейере туннельной печи.

4. Универсальным методом в сушильно-пропиточном устройстве.

Для достижения наилучших результатов требуется от 3 до 5 циклов пропитки.

Методы пропитки

1. Погружение.

2. Капельный способ (для вращающихся обмоток).

При t = 130°С, угол = 20° к горизонтали, ω = 15–20 оборотов в минуту.

3. Вихревое напыление.

Вопросы для самопроверки

1. Что относят к фенолоформальдегидным смолам?

2. Какие полиэфирные смолы вы знаете?

3. Какие эпоксидные смолы вы знаете?

4. Полиамидные смолы. Определение. Применение.

5. Что такое канифоль?

6. Что такое полиуретаны? Их применение.

7. Что такое полиимиды?

8. Понятие электроизоляционных лаков.

9. Применение пропиточных лаков.

10. Применение покрывных лаков.

11. Применение клеящих лаков.

12. Какие вещества могут входить в состав электроизоляционных лаков (для чего их применяют)?

13. Значение и методы сушки.

14. Применение масляных лаков.

15. Особенности черных лаков.

16. Понятие битумных лаков.

17. Отличие масляно-битумных от масляных лаков.

18. Электроизоляционные компаунды в основном состоят из тех же веществ, которые входят в состав лаковой основы электроизоляционных лаков. В чем их отличие?

19. Как делятся электроизоляционные компаунды по применению?

20. Что такое эпоксидные компаунды?

21. Что такое полиэфирные компаунды?

22. Этапы пропитки.

23. Методы сушки.

24. Методы пропитки.

РАЗДЕЛ 15. ВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Волокнистые материалы — материалы, которые состоят преимущественно из частиц удлиненной формы — волокон.

Преимущества: дешевизна, большая механическая прочность и гибкость, удобство обработки. Недостатками являются невысокие электрическая прочность и теплопроводность, высокая гигроскопичность. Поэтому эти материалы в электрической изоляции обычно применяются в пропитанном состоянии.

Дерево. Благодаря своей распространенности, дешевизне и легкости механической обработки дерево явилось одним из первых электроизоляционных и конструкционных материалов, обладает хорошими механическими свойствами. Недостатками являются высокая гигроскопичность, нестандартность свойств, низкая нагревостойкость, а также горючесть. Свойства улучшаются при пропитке парафином, льняным маслом, смолами и т. д. Применяется для изготовления штанг приводов, разъединителей и масляных выключателей, пазовых клиньев электрических машин и т. д.

Бумаги и картон. Это листовые широкорулонные материалы коротковолнового строения, состоящие в основном из целлюлозы. Имеют высокую механическую прочность и более стойки к тепловому старению. Слишком сухая и увлажненная бумага имеет пониженную механическую прочность. Прочность бумаги при растяжении больше в направлении вдоль рулона, чем поперек.

Кабельная бумага. Обозначение: К, КМ, КВ, КВУ, КВМ и КВМУ (к — кабельная, м — многослойная, в — высоковольтная, у — уплотненная). Бумаги марок КМ и К применяются для силовых кабелей напряжением до 35 кВ. КВ и КВУ — 35кВ и выше. КВМ и КВМУ — 110 кВ и выше. Существуют кабели с вязкой пропиткой, масло- и газонапорные.

Телефонная бумага. Объемная масса телефонной бумаги марок КТ и КТУ должна быть малой, чтобы уменьшить емкость изоляции кабелей. Пропиточная бумага марок ЭИП-50, ЭИП-63, ЭИП-75 употребляется для изготовления листового гетинакса. Намоточная бумага марок ЭН-50 и ЭН-70 более тонкая и более плотная.

Конденсаторная бумага (КОН). В пропитанном состоянии она используется как диэлектрик бумажных конденсаторов. Виды: обычная конденсаторная бумага и силикон-бумага для силовых конденсаторов. Обладают наибольшим числом токопроводящих включений и наименьшим пробивным напряжением.

Микалентная бумага. Применяется в качестве подложки. Микалента — одна из немногих разновидностей электроизоляционных бумаг, производимых из длинноволокнистого хлопка.

Картон. Бывает двух типов: воздушные более твердые и упругие, предназначенные для работы на воздухе (прокладки для пазов электрических машин, каркасы катушек, шайбы), и масляные — более рыхлые и более мягкие структуры, предназначенные для работы в трансформаторном масле. Масляные картоны имеют высокую электрическую прочность.

Особая бумага и картон. Бумаги и смеси целлюлозы с полиэтиленовым волокном, имеют меньшую гигроскопичность, большую механическую проч-

ность, чем целлюлозные бумаги. Применяются в изоляции кабелей высокого напряжения. Ацетилированная бумага из целлюлозы имеет лучшие электроизоляционные свойства и меньшую гигроскопичность.

Фибра. Имеет невысокие электроизоляционные свойства, значительную гигроскопичность и механическую прочность. При воздействии электрической дуги фибра разлагается, выделяя большое число газов, способствующих гашению дуги. В связи с этим фибровые трубки применяются для изготовления стреляющих разрядников.

Текстильные материалы. Для ткани свойственно переплетение нитей, поэтому они имеют более высокую механическую прочность, но пропитанные изделия из них намного дороже и обладают меньшей электрической прочностью. Различные волокна имеют сильно различающиеся нагревостойкость, гигроскопичность, электроизоляционные и механические свойства. Пряжу применяют в качестве защитных покровов кабелей и для изоляции обмоточных проводов. Ленты и ткани используют для защиты изоляции электрических машин и аппаратов, изготовления лакотканей и текстолитов.

Природные волокна. К ним относятся хлопчатобумажная пряжа и натуральный шелк. Из шелка получается более тонкая изоляция, но он дороже и поэтому применяются искусственные и синтетические волокна.

Искусственные волокна. Основные типы этих волокон — вискозный и ацетатный шелк. По электроизоляционным свойствам вискозный шелк не имеет преимуществ перед хлопчатобумажным волокном, он более гигроскопичен, но ацетатный шелк превосходит как хлопчатобумажную пряжу, так и натуральный шелк.

Синтетические волокна. К ним относятся полиэтилентерефталатные (лавсан, стерилен, терен, дакрон), полиамидные (капрон, дедерон, нейлон, анид), полиэтиленовые, полистирольные, поливинилхлоридные (хлорин) и политетрафторэтиленовые волокна. Это линейные полимеры с высокой молекулярной массой. Капрон в производстве обмоточных проводов дает большой экономический эффект. Энант превосходит капрон и нейлон по нагревостойкости и механической прочности.

Лакоткани. Гибкий электроизоляционный материал, представляющий собой ткань, пропитанную электроизоляционным лаком. Обеспечивает механическую прочность, а лаковая пленка — электрическую прочность материала. Применяют для изоляции в электрических машинах, аппаратах, кабельных изделиях, в качестве оберток, прокладок и т. д.

Шелковые лакоткани тоньше и имеют более высокую электрическую прочность, чем хлопчатобумажные.

Гетероцепные термопластичные смолы

Полиамидные смолы (полиамиды) имеют цепочные молекулы, образованные группами –CH–. Они обладают высокой механической прочностью и эластичностью. Они применяются для изготовления синтетических волокон, гибких пленок и пластических масс.

Полиуретаны — линейные полимеры, в цепочках которых между углеводородными остатками располагаются группы –NHCOO–. Они используются

для эмалирования проводов. Особенностью таких проводов является способность облуживаться без предварительной зачистки изоляции, поэтому эти «самооблуживающиеся» провода весьма удобны при монтаже.

Полиимиды содержат группу –CO–N–CO–. Они выпускаются в виде лаков, пленок, пластмасс и принадлежат к числу наиболее нагревостойких до 500°С.

Фенолформальдегидные смолы

Бакелит в последней стадии своего изготовления обладает высокой механической прочностью, мало эластичен, склонен к трекингу.

Новолак — пластичная смола, после нагрева сохраняет плавкость и растворимость. Применяется для изготовления пластмасс.

Крезольные смолы менее полярны по сравнению с фенольными, так как в крезоле углеводородный остаток больше, чем в феноле.

Карбамидоформальдегидные и меламиноформальдегидные смолы обладают высокой трекингстойкостью. Используются для изготовления лаков, клеев, пластмасс.

Полиэфирные смолы

Глифталевые смолы получают из глицерина и фталевого ангидрида. Обладают высокой эластичностью, клейкостью и трекингстойкостью.

Поликарбонаты применяются для изготовления пленок, в качестве связующего для текстолитов, для производства литых изделий.

Полиэфиркрилаты обладают малой вязкостью при нормальной температуре, что особенно удобно для целей пропитки и заливки на холоде. Затвердевают без выделения вредных продуктов.

Эпоксидные смолы

Диановые получают из диана и эпилхлоргидрина.

Циклоалифатические получают эпоксидированием непредельных элементов. Они более трекингстойки и короностойки.

Эпоксидные смолы в чистом виде термопластичны, но с добавлением отвердителя быстро отверждаются. Если это происходит под давлением, то получается изоляция с высокой электрической прочностью. Эпоксидные смолы применяются для изготовления лаков, клеев, заливочных компаундов. Оказывают токсичное влияние на человека.

Кремнийорганические смолы обладают высокой нагревостойкостью и низкой гигроскопичностью и используются в изготовлении лаков, компаундов, пластмасс.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется волокнистыми материалами? Их преимущества и недостатки.
2. Свойства дерева, его недостатки как электроизоляционного материала.
3. Применение дерева.
4. Свойства бумаги и картона.

5. Кабельная бумага, ее обозначение и применение.
6. Применение телефонной бумаги.
7. Использование и свойства конденсаторной бумаги.
8. Применение микалентной бумаги.
9. Виды и свойства картонов, применение.
10. Особая бумага: свойства и применение.
11. Свойства фибры и ее применение.
12. Текстильные материалы, их свойства и применение.
13. Что относится к природным волокнам?
14. Свойства искусственного волокна.
15. Синтетические волокна: свойства и применение.
16. Что представляет собой лакоткань? Ее свойства и использование.

РАЗДЕЛ 16. ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ

16.1. Характеристика и свойства пластмасс

Пластмассы (пластики) характеризуются способностью под влиянием внешнего давления (часто при одновременном нагреве) приобретать определенную форму, соответствующую очертаниям пресс-формы, используемой для изготовления (прессования) изделий.

Пластмассы широко применяют в электротехнике как в качестве электроизоляционных, так и в качестве чисто конструкционных материалов. Многие пластмассы имеют высокую механическую прочность и хорошие электроизоляционные свойства; к числу их преимуществ принадлежит также легкость (плотность пластмасс обычно от 0,9 до 1,8 Мг/м^3).

В большинстве случаев пластмассы состоят из двух основных компонентов: связующего и наполнителя. *Связующее* — обычно органический полимер, обладающий способностью деформироваться под воздействием давления (иногда применяется и неорганическое связующее — стекло в микалексе, цемент в асбоцементе). *Наполнитель*, прочно сцепляющийся со связующим веществом, может быть порошкообразным, волокнистым, листовым; наполнитель существенно удешевляет пластмассу и в то же время может улучшать ее механические характеристики (увеличивать прочность, уменьшать хрупкость). В пластмассах, от которых требуются высокие электроизоляционные свойства, наполнитель чаще всего отсутствует. В состав пластмасс иногда вводят *пластификаторы*, увеличивающие пластичность и уменьшающие хрупкость материала, *красители*, придающие пластмассе определенную окраску, и др. В зависимости от вида связующего различают пластмассы горячей прессовки, требующие при прессовке нагрева, и пластмассы холодной прессовки, которые прессуются при нормальной температуре. Большинство электроизоляционных пластмасс с органическим связующим требует горячего прессования. Эти пластмассы разделяются на *термопластичные* (термопласты) и *термореактивные* (реактопласты). К термопластичным принадлежат пластмассы на основе поливиниловых и полиамидных смол, эфиров целлюлозы и др., а к реактопластам — пластмассы на основе фенолоформальдегидных, карбамидных и других термореактивных смол.

Пресс-порошки — отвешенные в нужных соотношениях, точно измельченные, высушенные и тщательно перемешанные составные части пластмасс, служат исходным материалом для изготовления большинства изделий самой разнообразной формы. Пресс-порошки могут изготовляться либо сухим способом, либо мокрым (лаковым).

Прессование фасонных изделий. Обычно его производят на гидравлических прессах, обеспечивающих создание достаточно большого давления. Все операции технологического процесса прессования (отвешивание пресс-порошка, таблетирование, закладка таблеток в пресс-форму, разогрев, подача давления, выдержка в пресс-форме, удаление готовых изделий и т. д.) при массовом производстве автоматизируются.

Литье под давлением. Для получения изделий из термопластов часто используют способ литья под давлением; материал размягчают вне пресс-формы в обогреваемом цилиндре и затем вдавливают в пресс-форму движущимся в цилиндре поршнем (плунжером). Литье под давлением — прерывный процесс, при ходе плунжера в одну сторону происходит загрузка полости машины, при ходе в другую сторону — прессование. При выдавливании размягченной нагревом термопластичной массы через наконечник нужной формы посредством червяка (шнека) осуществляется непрерывный процесс изготовления изделия. Этот способ (шприцевание, экструзия) дает возможность изготовления стержней, лент, труб и тому подобных изделий, имеющих неизменное по всей длине поперечное сечение. Экструзия широко применяется также для наложения изоляции и защитных оболочек из полиэтилена, поливинилхлорида и других термопластов на кабельные изделия.

Сварка и склеивание. Многие термопластичные пластмассы могут хорошо соединяться сваркой, наподобие сварки металлов. Нагрев при сварке пластмасс осуществляется струей горячего воздуха; с успехом используется сварка с применением нагрева в поле высокой частоты. Применяется также склеивание пластмасс друг с другом и с другими материалами при помощи соответствующих клеев.

Свойства термопластиков. Пластмассы из полиэтилена, полистирола и других неполярных полимеров без наполнителей обладают весьма малым tg δ, но недостатком большинства этих пластмасс, за исключением полипропилена и сшитого полиэтилена, является их сравнительно низкая нагревостойкость. Винипласт обладает ничтожной гигроскопичностью и высокой стойкостью ко многим растворителям и химически активным веществам. Винипласт применяется для изоляции в разного рода электрической аппаратуре, в частности, работающей в условиях высокой влажности и воздействий химически активных веществ, но при относительно невысокой рабочей температуре.

16.2. Слоистые пластики

Широкое применение в качестве конструкционных и электроизоляционных материалов имеют слоистые пластики, в которых наполнителем является листовой волокнистый материал. К этим материалам относятся гетинакс, текстолит и др.

Гетинакс получается посредством горячей прессовки бумаги, пропитанной бакелитом. Для производства гетинакса берется прочная и нагревостойкая пропиточная бумага. Слоистая структура гетинакса приводит к заметной анизотропии свойств в направлениях, перпендикулярном и параллельном слоям. Гетинакс нашел применение в высоко- и низковольтном аппарато-приборостроении, а также в технике связи.

Фольгированный гетинакс. Он применяется для изготовления печатных схем низковольтных цепей аппаратуры. Он представляет собой гетинакс, облицованный с одной или с двух сторон электролитической красномедной фольгой толщиной 0,035–0,05 мм.

Текстолит. Этот пластик аналогичен гетинаксу, но изготовляется из пропитанной ткани. Текстолит имеет повышенную удельную ударную вязкость, стойкость к истиранию и сопротивление раскалыванию. Текстолит в 5–6 раз дороже гетинакса, так как стоимость ткани значительно выше стоимости бумаги, и применяется лишь в отдельных случаях для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или работающих на истирание (детали переключателей). Текстолит на основе синтетической (лавсановой) ткани с пропиткой эпоксидно-фенолформальдегидной смолой более влагостоек, но его нагревостойкость понижена (до 85°С).

Другие виды слоистых пластиков

К ним относятся *текстогетинакс* — комбинированный слоистый пластик с внутренними слоями бумаги и наружными (с обеих сторон) слоями хлопчатобумажной ткани; *древеснослоистые пластики* (ДСП) типа фанеры на бакелитовой смоле, более дешевые, чем гетинакс, но с худшими электроизоляционными свойствами и более гигроскопичные; более нагревостойкие слоистые пластики — на неорганических основах: *асбогетинакс* на основе асбестовой бумаги и *асботекстолит* на основе асбестовой ткани; наиболее нагревостойкие, влагостойкие и механически прочные слоистые пластики — *стеклотекстолиты* на основе неорганической стеклянной ткани с нагревостойкими связующими. Наряду со стеклотекстолитами выпускаются и более дешевые слоистые пластики на основе не стеклоткани, а стекловаты, получаемые без тканья, т. е. без переплетенья нитей друг с другом.

Вопросы для самопроверки

1. Из каких компонентов состоят пластмассы?
2. Применение пластмасс.
3. Какие компоненты могут добавляться в пластмассы и с какой целью?
4. Какие бывают пластмассы в зависимости от вида связующего?
5. Какие пластмассы относятся к термопластичным?
6. Какие пластмассы относятся к термореактивным?
7. Что из себя представляют пресс-порошки?
8. Какие операции включает процесс прессования фасонных изделий?
9. Как осуществляется литье под давлением?
10. Можно ли сваривать и склеивать пластмассы?
11. Свойства термопластиков.
12. Что представляют собой слоистые пластики? Применение.
13. Получение и применение гетинакса.
14. Что представляет собой фольгированный гетинакс? Для чего он применяется?
15. Основные свойства и применение текстолита.
16. Какие еще виды слоистых пластиков вы знаете?

РАЗДЕЛ 17. ФАСОННЫЕ И НАМОТАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Это изделия, известные под названием гетинаксовых (бакелитовых) трубок ($d_{вн}$ = 10–30 мм) и цилиндров ($d_{вн}$ = 30–600 мм). Они изготовляются из лакированной с одной стороны намоточной бумаги, более плотной и тонкой, чем пропиточная бумага, которая идет на производство листового гетинакса.

Свойства намотанных изделий уступают свойствам листового гетинакса. Текстолит применяется и как конструкционный материал, например для изготовления подшипников и бесшумных зубчатых передач. Зубчатые колеса для таких передач прессуются из набранных в стопки заготовок, отштампованных из пропитанной ткани.

Вопросы для самопроверки

1. Изготовление фасонных и намотанных изделий.
2. Применение фасонных и намотанных изделий.

РАЗДЕЛ 18. СТЕКЛА

18.1. Характеристика и свойства стекол

Стекла — неорганические вещества — представляют собой смеси оксидов. Основу большинства стекол составляет SiO_2.

Плотность

Стекла имеют плотность от 2 до 8,1 Мг/м^3. Плотность обычного оконного стекла составляет ~2,5 Мг/м^3.

Механические свойства

Прочность стекол на сжатие составляет 6000–21 000 МПа, на разрыв — 100–300 МПа, при растяжении — 100–300 МПа.

Тепловые свойства

Стекла не имеют ярко выраженной температуры плавления. Температура размягчения большинства стекол колеблется в пределах от 400 до 1600°С. Чем больше в составе стекла щелочных оксидов, тем ниже температура размягчения.

При внезапном нагреве или охлаждении стекла вследствие неравномерного распределения температур в наружном слое материала возникают механические напряжения, которые могут явиться причиной разрушения стекла.

Тонкое стекло более стойко к термоударам, чем толстое стекло.

Оптические свойства

Обычные стекла прозрачны для лучей видимой части спектра. Некоторые добавки (оксиды) придают стеклам определенную окраску. Это используется для получения цветных стекол, эмалей и глазурей.

Показатель преломления n различных стекол колеблется от 1,47 до 1,96. Высокие значения n имеют хрустали.

Гидролитическая стойкость

Гидролитическая стойкость — это стойкость к действию воды. Наивысшей гидролитической стойкостью обладает кварцевое стекло. Гидролитическая стойкость сильно уменьшается при введении в стекло щелочных оксидов.

Силикатные стекла практически стойки к действию кислот, но малостойки к действию щелочей.

Электрические свойства

Электрические свойства зависят от состава стекол. Стекло является в большинстве своем диэлектриком.

Получение и обработка стекол

Стекла изготавливаются (варятся) в стекловаренных печах. Сырьем для получения стекла являются кварцевый песок SiO_2, сода $NaCO_3$, известняк $CaCO_3$ и т. д.

Сырье измельчается, перемешивается, а затем загружается в стеклоплавильную печь. В печи сырье плавится, летучие составные удаляются, а оставшиеся окислы реагируют между собой, в результате чего получается однородная стекломасса, которая и идет на выработку стеклянных изделий.

Типы стекол

Конденсаторные стекла применяются в качестве диэлектрика в конденсаторах.

Установочные стекла служат для изготовления установочных деталей, изоляторов (телеграфных, антенных и т. д.).

Ламповые стекла применяют для баллонов и ножек электрических ламп.

К *стеклам с наполнителем* принадлежит пластмасса горячей прессовки из стекла и слюдяного порошка.

По химическому составу стекла делятся на:

1) щелочные стекла без тяжелых окислов;

2) щелочные стекла с большим содержанием тяжелых окислов;

3) бесщелочные стекла.

18.2. Стеклоэмали

Стеклоэмали — это стекла, наносимые тонким слоем на поверхность металлических и других предметов с целью защиты от коррозии, придания определенной окраски и улучшения внешнего вида.

18.3. Стекловолокно

Стекло в толстом слое — хрупкий материал. Тонкие стеклянные изделия обладают повышенной гибкостью. Весьма тонкие стеклянные волокна имеют уже настолько высокую гибкость, что могут обрабатываться приемами текстильной технологии.

Световоды

Это жгуты, скрученные из волокон, имеющих сердцевину и оболочку из стекла с разным показателем преломления n, причем n_1 сердцевины больше n_2 оболочки.

Ситаллы

Изготовляются путем кристаллизации стекол специального состава. Они занимают промежуточное положение между стеклом и керамикой.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое стекла?
2. Основные свойства стекол.
3. Получение и обработка стекол.
4. Какие существуют типы стекол?
5. Дайте определение стеклоэмали.
6. Что такое стекловолокно?

РАЗДЕЛ 19. ФАРФОР

Фарфор — изоляционный материал. Для изготовления фарфора применяют специальные сорта глин (каолин (высококачественная глина большой чистоты) и другие виды огнеупорных пластичных глин) и минералы (кварц и полевой шпат).

Сущность технического процесса изготовления фарфора сводится к очистке от примесей всех составных частей, тщательному измельчению и перемешиванию в однородную массу с водой.

Одна из операций — *глазуровка.* Глазурь защищает фарфор от проникновения влаги внутрь, улучшает внешний вид фарфора и позволяет придавать фарфоровым изделиям окраску в желаемый цвет. К гладкой поверхности глазури менее пристают различные загрязнения, глазурь уменьшает ток утечки по поверхности изоляторов и повышает их напряжения перекрытия.

Глазурь должна иметь температурный коэффициент линейного расширения α_L, близкий к расширению фарфора.

Обжиг — операция, придающая фарфору высокую механическую прочность, водостойкость и хорошие электроизоляционные свойства.

Печи для обжига фарфора бывают двух типов: прерывного (горны) и непрерывного (туннельные печи) действия.

При рассмотрении в микроскоп образца обожженного фарфора устанавливается его структура: фарфор состоит из кристаллов муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ и кварца SiO_2, промежутки между которыми заполнены стеклообразным материалом, образовавшимся в результате расплавления полевого шпата.

Электротехнический фарфор содержит примерно 70% SiO_2 и 25% Al_2O_3 (прочее K_2O, Na_2O, Fe_2O_3 и другие оксиды).

Обожженный фарфор имеет плотность 2,3–2,5 Мг/м^3, его α_L (температурный коэффициент линейного расширения) составляет $(3–4{,}5)\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$. Предел прочности при сжатии (400–700 Мпа), значительно меньше предела прочности при растяжении (45–70 Мпа) и при изгибе (80–150 Мпа). Удельная ударная вязкость — 1,8–2,2 кДж/м^2.

Электрические свойства фарфора при нормальной температуре удовлетворительны для его использования при низких частотах: его ρ составляет 10^{12}–10^{13} Ом·м, E_r = 6,0–8, Tg δ = 0,015–0,025, $E_{пр}$ = 10–30 МВ/м.

Недостатки фарфора — сравнительно высокий угол диэлектрических потерь, быстро растущий при повышении температуры.

Классификация керамических диэлектриков

Керамика с низкой диэлектрической проницаемостью. Радиокерамические материалы в зависимости от назначения (согласно ГОСТ 5458-64) бывают следующих типов:

А — высокочастотные для конденсаторов;

Б — низкочастотные для конденсаторов;

В — высокочастотные для установочных изделий и других радиотехнических деталей.

Радиофарфор представляет собой фарфор, стекловидная фаза которого облагорожена введением в него тяжелого оксида BaO. У радиофарфора $\operatorname{tg}\delta$ значение меньше, а ρ больше, чем у обычного электротехнического фарфора, а электроизоляционные свойства фарфора еще лучше.

Ультрафарфор представляет собой дальнейшее усовершенствование радиофарфора, характеризуется большим содержанием Al_2O_3.

Высокоглиноземистая керамика (алюминоксид) состоит из оксида алюминия Al_2O_3.

Стеатит — вид керамики, изготовляемый на основе минерала талька $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$.

Вопросы для самопроверки

1. Что применяют для изготовления фарфора?
2. В чем заключается сущность процесса изготовления фарфора?
3. Что такое глазуровка?
4. Какую роль выполняет глазурь?
5. Для чего применяется отжиг?
6. Как изменяются свойства фарфора после отжига?
7. Какие существуют типы радиокерамических материалов?
8. Что представляет собой радиофарфор и ультрафарфор?

РАЗДЕЛ 20. СЛЮДА И СЛЮДЯНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

20.1. Виды и свойства слюды

Слюда — важнейший природный электроизоляционный материал, обладающий высокой электрической прочностью, нагревостойкостью, влагостойкостью, механической прочность и гибкостью. Применяется в изоляции электрических машин высокого напряжения и большой мощности, а также как диэлектрик в конденсаторах.

Слюда в природе встречается в виде кристаллов, обладает характерной способностью расщепляться по параллельным плоскостям.

По химическому составу слюды относятся к водным алюмосиликатам. Важнейшие разновидности слюды — это мусковит и флогопит.

Мусковиты бывают бесцветными или имеют красноватый, зеленоватый и другие оттенки.

Флогопиты имеют темные оттенки (янтарные, золотистые, от коричневых до почти черных).

Примерные значения ρ, ε и $\operatorname{tg}\delta$ мусковита и флоголита приведены в таблице 20.1.

Таблица 20.1

Электрические свойства слюды

Вид слюды	ρ, Ом·м	ε	tg 6 10^4 при частоте		
			50 Гц	1 кГц	1 МГц
Мусковит	10^{12}–10^{16}	6–8	150	25	3
Флогопит	10^{11}–10^{12}	5–7	500	150	15

По электрическим свойствам мусковит лучше, чем флогопит.

Приведенные в таблице 20.1 данные относятся к случаю, когда электрическое поле перпендикулярно плоскостям спайности. Вдоль плоскостей спайности электроизоляционные свойства слюд значительно хуже.

Слюда относится к электроизоляционным материалам высшего класса нагревостойкости.

Миканиты — листовые рулонные материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы, иногда с применением волокнистой подложки из бумаги или ткани, наклеенной с одной или двух сторон. Используются в конденсаторах, изоляции электрических машин, электронике и осветительных лампах.

Важнейшие виды миканитов различаются как областью применения, так и составом и технологией изготовления, и таким образом получают условные обозначения, состоящие из трех и более букв.

Первая буква обозначает тип миканита:

К — коллекторный; П — прокладочный; Ф — формовочный; Г — гибкий; М — микафолий; П — микалента.

Вторая буква обозначает тип примененной при изготовлении миканита слюды:

М — мусковит; Ф — флогопит; С — смесь мусковита и флогопита.

К *твердым миканитам* принадлежат коллекторный и прокладочный миканиты. Они являются твердыми как при нормальной, так и при повышенной (около 100°С) температуре, и применяются для плоских, не подвергающихся изгибу, электроизоляционных прокладок.

Коллекторный миканит применяется в виде штампованных заготовок, которые прокладываются между медными пластинами коллекторов электрических машин. Он хорошо выдерживает высокое давление и повышенную температуру.

Прокладочный миканит применяют для разного рода электроизоляционных прокладок, шайб.

Формовочный миканит при нормальной температуре тверд, но при нагреве принимает ту или иную форму, а при охлаждении сохраняет эту форму. Его применяют при изготовлении коллекторных манжет, а также фланцев, каркасов, катушек, трубок и других фасонных изделий.

Микафолий (разновидность формовочного миканита) имеет с одной стороны подложку из бумаги, стеклоткани или стеклосетки и применяется для изготовления твердой изоляции стержней, якорных обмоток, машин высокого напряжения, где требуется большое усилие при намотке. Средняя электрическая прочность микафолия, изготовленного из флогопита, не менее 13 МВ/м, а из мусковита не менее 15 МВ/м.

Гибкие миканиты обладают гибкостью при нормальной температуре. Предназначены для изоляции различных частей электрических машин и аппаратов.

Микалента (разновидность гибких миканитов) клеится из щепаной слюды крупных размеров только в один слой, с перекрытием пластин примерно на 1/3; она имеет с обеих сторон подложки из стеклоткани, стеклосетки или бумаги. Образует основную изоляцию обмоток многих электрических машин высокого напряжения.

Нагревостойкий миканит не содержит органических веществ, применяется для изоляции электрических нагревательных приборов.

20.2. Слюдиниты и слюдопласты

Слюдиниты — слюдяная бумага толщиной 10–150 мкм. При соприкосновении с водой разрушается.

Слюдопласты — бумага толщиной 0,4–0,2 мм с пределом прочности при растяжении до 90 МПа даже без применения связывающих. Применяются во всех типах электрических машин.

Микалекс — твердый материал с большим содержанием слюды и легко плавким стеклом вместо связывающих. Обладает высокой нагревостойкостью, дугостойкостью, большой механической прочностью, допускает механическую обработку. Из него изготовляют держатели мощных ламп, гребенки катушек индуктивности, платы и др.

Физические свойства

Плотность — 2,6–3,0 Мг/м^3

Допустимая рабочая температура, °С — 300–350
Температурный коэффициент линейного расширения — $8 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$
Предел прочности при:
при растяжении — 30–70 МПа
при сжатии — 100–400 МПа
при изгибе — 70–140 МПа
Удельное объемное сопротивление — 10^{1}–10^{12} Ом·м
Диэлектрическая проницаемость — 6,0–8,5
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости — $3 \cdot 10^{-4}$ $К^{-1}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при 1 МГц — 0,003–0,01
Электрическая прочность — 10–20 МВ/м

20.3. Синтетическая слюда

Обладает более высокой химической стойкостью, чем природный флогопит. Синтетическая слюда дороже природной, получается в виде кристаллов меньших размеров, труднее расщепляется. Так как материал обладает высокими электрическими свойствами и большой однородностью он представляет собой перспективный материал.

Вопросы для самопроверки

1. Свойства и применение слюды.
2. Что представляют собой миканиты?
3. Какие существуют типы миканитов?
4. Маркировка миканитов.
5. Свойства и применение твердых миканитов.
6. Для чего применяют коллекторный миканит?
7. Что представляет собой микафолий? Где он применяется?
8. Как и из чего изготавливается микалента?
9. Механические свойства микалекса, его применение.
10. Физические свойства микалекса.

ЧАСТЬ 3
ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

РАЗДЕЛ 21. КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВ

21.1. Классификация проводниковых материалов

Разделяются на металлы (высокой проводимости (провода)) и сплавы (высокого сопротивления (резисторы)).

Жидкие проводники — расплавленные металлы и различные электролиты.

Электролиты — растворы, щелочи (2-го рода) — переносят как электроны, так и ионы.

Механизм прохождения тока в металле, как в твердом, так и в жидком состоянии обусловлен дрейфом свободных электронов под воздействием электрического поля.

Металлами называются проводники с электронной проводимостью или проводниками 1-го рода.

Проводниками 2-го рода или электролитами являются растворы кислот, щелочей и солей.

Плазма — сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема. Представляет собой особую проводящую среду.

Электропроводимость металлов заключается в том, что при столкновении электронов с узлами кристаллической решетки энергия накапливается; при ускорении электронов энергия передается основаниям металла, а следовательно, увеличивается температура.

21.2. Электропроводность металлов (классическая электронная теория)

Классическая электронная теория металлов рассматривает твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из свободных электронов.

Некоторые опыты подтвердили гипотезу об электронном газе в металле, а именно:

1) при длительном пропускании электрического тока через цепь, состоящую из одних металлов проводников, не наблюдается проникновения атомов одного металла в другой;

2) при нагреве металла до высоких температур скорость теплового движения свободных электронов увеличивается, наиболее быстрые из электронов могут вылетать из металла;

3) в момент неожиданной остановки быстро двигающегося проводника происходит смещение электрического газа по закону инерции в направлении движения;

4) исследование поведения металлических проводников в магнитном поле установило, что вследствие искривления траектории электронов в металли-

ческой пластинке, помещенной в поперечное магнитное поле, появляется поперечное ЭДС и изменяется электрическое сопротивление проводника.

Выявились и противоречия некоторых выводов теории с опытными данными:

1) расхождение температурной зависимости удельного сопротивления;

2) несоответствие значений теплоемкости металлов (теоретических и опытно полученных данных).

Наблюдаемая теплоемкость металлов меньше теоретической, как будто электронный газ не поглощает теплоту при нагреве металла проводника.

Разногласия преодолели, рассматривая с позиций квантовой механики.

21.3. Свойства проводников

Параметры, характеризующие свойства проводников:

1) удельная проводимость γ или обратная ей величина — удельное сопротивление ρ;

2) температурный коэффициент удельного сопротивления ТК ρ или α_ρ;

3) коэффициент теплопроводности $\gamma_т$;

4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС);

5) работа выхода электронов из металла;

6) предел прочности при растяжении $\sigma_р$ и относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$;

7) удельная проводимость и удельное сопротивление проводников.

Удельная проводимость металлических проводников согласно классической теории металлов может быть выражена следующим образом:

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2m\upsilon_T}, \qquad (21.1)$$

где e — заряд электрона; n_0 — число свободных электронов в единице объема металла; λ — средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки; m — масса электрона; $\upsilon_Т$ — средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле.

Преобразование выражения (21.1) на основе положений квантовой механики приводит к формуле

$$\gamma = Ke^2 n^{2/3} \lambda h, \qquad (21.2)$$

где K — численный коэффициент; h — постоянная Планка (прочие обозначения — прежние).

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов:

$$TK_\rho = \alpha_p \rho \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, \qquad (21.3)$$

где ρ — удельное сопротивление.

Число носителей заряда в металле при повышении температуры практически не изменяется. Усиление колебаний узлов решетки больше препят-

ствий ⇒ уменьшение λ удельной проводимости и возрастание удельного сопротивления.

Изменение удельного сопротивления металла при плавлении. При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение удельного сопротивления ρ. Однако у некоторых металлов ρ при плавлении уменьшается.

Изменение ρ металлов при плавлении иллюстрируется данными таблицы 21.1.

Таблица 21.1

Изменение удельного сопротивления некоторых металлов при плавлении

Металл	**Mg**	**Cu**	**Au**	**Zn**	**Sn**	**Ag**	**Al**	**Na**	**Ca**	**Bi**
$\frac{\rho_{жидк.}}{\rho_{тверд.}}$	3,2	2,4	2,28	2,19	2,1	1,9	1,64	1,45	0,58	0,43

Удельное сопротивление увеличивается при плавлении у тех металлов, у которых при плавлении увеличивается объем (Hg, Au, Zn, Sn), т. е. уменьшается плотность; и, наоборот, у металлов, уменьшающих свой объем при плавлении, удельное сопротивление уменьшается (у Ga на 53%, у Sb на 29%, у Bi на 54%).

Изменение удельного сопротивления металлов при деформации (растяжении/сжатии) равен 0:

$$\rho = \rho_0 (1 + S\delta),$$

где ρ — удельное сопротивление металла при механическом напряжении, изменяется из-за изменения амплитуды колебаний узлов кристаллической решетки металла; δ — удельное сопротивление металлов, не подверженных механическим воздействиям; *S* — коэффициент механического напряжения, характеризующий данный метал, знаки «+» или «–» — соответственно растяжение или сжатие. При растяжении амплитуда металла увеличивается, а при сжатии уменьшается.

Увеличение амплитуды приводит к уменьшению подвижности зарядов, а следовательно, к увеличению температурного коэффициента удельного сопротивления (ρ). Чтобы снизить ρ, нужно рекриаризировать (расплавить) метал.

Удельное сопротивление сплавов

Примеси и нарушения правильной структуры металла увеличивают удельное сопротивление сплавов. Рост величины ρ наблюдается при сплавлении двух металлов, если они образуют твердый раствор.

Удельное сопротивление имеет максимум, соответствующий некоторому определенному соотношению компонентов в сплаве.

Если раствор твердый и ρ увеличивается в сплавах, то, следовательно, атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого.

Изменение теплопроводности сплава обуславливается изменением подвижности носителей заряда и частичного возрастания процента носителей пара при повышении температуры. Уменьшение подвижности носителей заряда с увеличением температуры сплава компенсируется за счет увеличения их концентрации,

а следовательно, сплав будет иметь нулевой температурный коэффициент удельного сопротивления.

Многие интерметаллы — не вещества с металлическим характером электропроводности, а электронные полупроводники, которые по терминологии академика А. Ф. Иоффе являются неметаллическими проводниками с «электронным механизмом тока».

Теплопроводность металлов

Передачу теплоты осуществляют свободные электроны, они же определяют и электропроводность металла. Поэтому коэффициент теплопроводности $\gamma_т$ металла меньше $\gamma_т$ диэлектриков. Очевидно, что чем больше удельная электрическая проводимость γ металла, тем выше его коэффициент теплопроводимости. При повышении температуры, когда подвижность электронов и удельная проводимость уменьшается, отношение коэффициента теплопроводности металла к его удельной проводимости $\gamma_т/\gamma$ должно возрастать. Математически это выражается законом Видемана — Франца — Лоренца:

$$\gamma_т/\gamma = L_0 T,$$

где T — термодинамическая температура (в °К); L_0 — число Лоренца.

Термоэлектродвижущая сила

При соприкосновении двух различных металлов проводников между ними возникает контактная разность потенциалов. Из электронной теории металлов следует, что контактная разность потенциалов между металлами А и В:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e}\ln\frac{n_{0A}}{n_{0B}},$$

где U_A, U_B — потенциалы соприкасающихся металлов; n_{0A}, n_{0B} — концентрация элетронов в металлах А и В; e — абсолютная величина заряда электрона; k — постоянная Больцмана.

Можно записать при разности температур металла:

$$U = \psi(T_1 - T_2),$$

где ψ — постоянная для данной пары проводников коэффициент термо-ЭДС, т. е. термо-ЭДС должно быть пропорционально разности температур спаев.

Температурный коэффициент линейного расширения проводников

$$Tkl = \alpha_l = \frac{1}{l}\cdot\frac{dl}{dT}$$

как для металлов, так и для проводников.

Необходим для расчета коэффициента электрического сопротивления проводника

$$TkR = \alpha_R = \alpha_P - \alpha_l.$$

Для чистых металлов $\alpha_l << \alpha_P$, так что α_l можно пренебречь и считать $\alpha_R \approx \alpha_\rho$.

Для сплавов, имеющих малый α_ρ, формула имеет существенное значение. Значение α_l металла растет при повышении температуры.

При нормальной температуре легкоплавкие металлы имеют сравнительно высокие, а тугоплавкие — сравнительно низкие α_l.

Механические свойства проводников

Характеризуются пределом прочности при растяжении σ_p и относительным удлинением перед разрывом $\frac{\Delta l}{l}$, а также хрупкостью, твердостью и т. д.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется металлом?
2. Что такое плазма?
3. Классическая электрона теория.
4. Какие параметры характеризуют свойства проводников?
5. Изменяется ли число носителей заряда в металле при повышении температуры?
6. Как изменяется удельное сопротивление металла при деформации?
7. Что увеличивает удельное сопротивление сплавов?

РАЗДЕЛ 22. СВЕРХПРОВОДНИКИ И КРИОПРОВОДНИКИ

Сверхпроводники

В 1911 г. Х. Каммерлин-Оннес обнаружил, что при охлаждении до температуры 4,2 К сопротивление кольца из замороженной ртути внезапно падает до практически нулевого значения.

Сверхпроводимость — исчезновение электрического сопротивления, т. е. появление практически бесконечной проводимости материала.

Температура сверхпроводникового перехода (T_c) — температура, при охлаждении до которой совершается переход вещества в сверхпроводящее состояние. Переход в сверхпроводящее состояние является обратимым.

Сверхпроводники — металлы, их сплавы и химические соединения, способные при охлаждении до достаточно низкой температуры переходить в сверхпроводящее состояние.

Известно 27 простых сверхпроводников (чистых металлов) и более тысячи сложных сверхпроводников (сплавов и соединений). Некоторые примеры сверхпроводников приведены в таблице 22.1.

Таблица 22.1

Ориентировочные значения параметров некоторых сверхпроводников

Мягкие сверхпроводники			**Твердые сверхпроводники**		
Материал	**Критическая температура перехода, T_{C0}, К**	**Критическая магнитная индукция, B_{C0}, Т**	**Материал**	**Критическая температура перехода, T_{C0}, К**	**Критическая магнитная индукция, B_{C0}, Т**
Алюминий (Al)	1,2	0,010	Сплав 44% Nb + 56% Ti	8,7	12
Ртуть (Hg)	4,2	0,041	Сплав 50% Nb + 50% Zr	9,5	11
Тантал (Ta)	4,5	0,083	Галлид ванадия (V_3Ga)	14	50
Свинец (Pb)	7,2	0,080	Галлид ниобия (Nb_3Ga)	15	7
Ниобий (Nb)	9,4	0,195	Станнид ниобия (Nb_3Sn)	18	22

Сверхпроводниками могут также быть соединения металлов, обладающие сверхпроводимостью с несверхпроводящими элементами, а также соединения, в состав молекул которых входят исключительно атомы элементов, не являющихся сверхпроводниками. Сказанное иллюстрируется рисунком 22.1, изображающим изменение сопротивления при глубоком охлаждении образцов ртути, являющейся типичным сверхпроводником, и платины, не являющейся сверхпроводником (по оси абсцисс отложена абсолютная температура в кельвинах, а по оси ординат — отношение сопротивления образца при данной температуре $R_т$ к сопротивлению R_{273} при температуре T = 273 К (равной 0°С)).

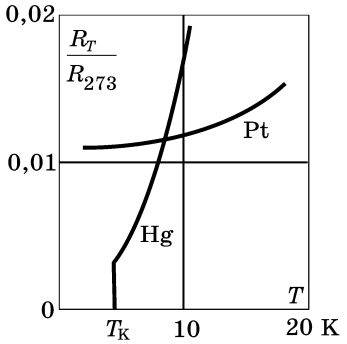


Рис. 22.1

Изменение сопротивления образцов ртути и платины при глубоком охлаждении

Сверхпроводимость разрушается не только при повышении температуры до значений, превышающих T_C, но и при возникновении на поверхности проводника магнитного поля с магнитной индукцией, превышающей индукцию перехода B_C. Это поясняется диаграммой состояния сверхпроводника, изображенной на рисунке 22.2.

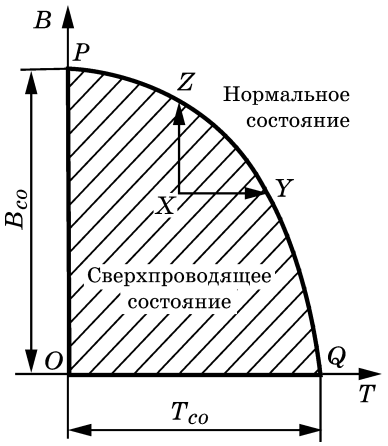


Рис. 22.2

Диаграмма состояния мягкого сверхпроводника

Заштрихованная область OPQ — сверхпроводящее состояние материала, а не заштрихованная область вне кривой PQ — нормальное состояние материала.

В 1993 г. немецкие физики В. Майснер и Р. Оксенфельд обнаружили, что сверхпроводники при переходе в сверхпроводящее состояние становятся идеальными диамагнетиками, т. е. их магнитная проницаемость скачком падает с $\mu \approx 1$ до $\mu \approx 0$.

Когда впервые стали известны простые сверхпроводники (чистые металлы), названные мягкими, они имели весьма малые значения B_{CO} (рис. 22.3), поэтому технически явление сверхпроводимости не использовали.

Сейчас, когда Р. Оксенфельдом В. Майснером открыты сверхпроводники и их свойства и, внешнее магнитное поле не может проникать в сверхпроводя-

щее тело. Если же переход в сверхпроводящее состояние происходит в магнитном поле, то поле «выталкивается» из сверхпроводника. Этот эффект был продемонстрирован в 1935 г. В. К. Аркадьевым в его опыте с висящим магнитом.

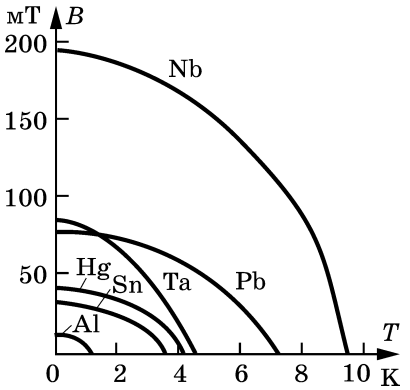


Рис. 22.3
Диаграммы состояния некоторых сверхпроводников

В 50-х гг. XX века были открыты новые сверхпроводники, представляющие собой не чистые металлы, а сплавы или химические соединения — сверхпроводники 2 рода.

Твердые сверхпроводники обладают рядом особенностей:

1) охлаждение из нормального состояния в сверхпроводящее происходит постепенно;

2) между нижним B_{C1} и верхним B_{C2} существует промежуточное состояние («фаза А. И. Шальникова»);

3) эффект Майснера — Оксенфельда — Аркадьева выражен не полностью, и замечается тенденция к рассеянию энергии при пропускании через них переменного тока.

Помимо понижения температуры появлению сверхпроводимости способствует повышение давления.

Сверхпроводники используют сверхпроводниковые магниты для создания электрических машин, трансформаторов и тому подобных устройств малой массы и габаритов, но с высоким КПД; линий электропередачи весьма больших мощностей на далекие расстояния и пр.

Материалы для изготовления обмоток сверхпроводимых магнитов:

1) сравнительно легко деформируемые (дуктильные);

2) трудно поддающиеся деформации из-за хрупкости.

Криопроводники

Криопроводимость — достижение металла весьма малого значения удельного сопротивления при криогенных температурах (но без перехода в сверхпроводящее состояние).

Металлы, обладающие криопроводимостью, называются криопроводниками.

Криопроводники, у которых при изменении температуры в широком диапазоне удельное сопротивление ρ меняется плавно, без скачков, не могут использоваться в триггерных устройствах. Также не обнаруживается эффект Майснера — Оксфельда и др.

Преимущества криопроводников:

1) использование в качестве хладагента жидкого водорода или азота (вместо дорогого жидкого гелия) упрощает и удешевляет выполнение тепловой изоляции устройства и уменьшает расход мощности на охлаждение;

2) повышение температуры ведет лишь к постепенному плавному увеличению сопротивления;

3) рисунок 22.4 показывает изменение удельного сопротивления ρ как функции от температуры при изменении последней в пределах 10–300 К для некоторых металлов (меди, алюминия, бериллия).

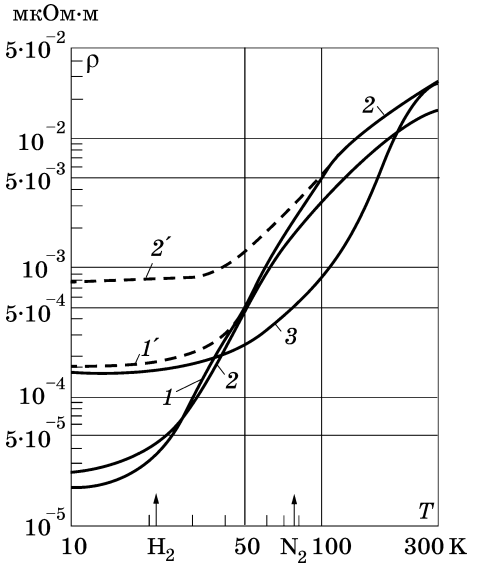


Рис. 22.4

Зависимость удельного сопротивления ρ от температуры (в области пониженных температур) для меди:

1 — чистая медь; *1′* — обычная проводниковая медь; *2* — чистый алюминий; *2′* — обычный проводниковый алюминий; *3* — бериллий.

Сплошные кривые относятся к особо чистым металлам, штриховые — к обычным проводникам — меди и алюминию. Стрелками отмечены температуры снижения азота и водорода.

Во всех случаях для получения высококачественных криопроводников требуется исключительно высокая чистота металла (отсутствие примесей) и отсутствие наклепа (отожженное состояние).

Вопросы для самопроверки

1. Когда появились сверхпроводники?
2. Что такое сверхпроводимость? Как разрушается сверхпроводимость?

3. Что такое температура сверхпроводникового перехода?

4. Что такое сверхпроводник?

5. Каковы особенности твердых сверхпроводников?

6. Как используют сверхпроводники?

7. Какие используют материалы для изготовления обмоток сверхпроводимых магнитов?

8. Открытие В. Майснера и Р. Оксенфельда.

9. Применение сверхпроводников.

10. Что такое криопроводимость?

11. Что такое криопроводники?

12. Преимущества криопроводников.

13. Применение криопроводников.

РАЗДЕЛ 23. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ

Электрические изделия. Из числа твердых неметаллических проводниковых материалов наибольшее значение имеют материалы на основе углерода. Из угля изготовляют щетки электрических машин, электроды для прожекторов, электроды для дуговых электрических печей, электрических ванн и др. В качестве сырья используют сажу, графит или антрацит.

Угольные заготовки проходят процесс обжига. При высоких температурах достигается искусственный перевод углерода в форме графита, вследствие чего такой процесс носит название графитирования.

Угольные электроды, работа которых будет протекать при высоких температурах, обжигаются при температуре вплоть до 3000°С.

Угольные электроды, как и другие угольные изделия, имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления.

Щетки служат для образования скользящего контакта между неподвижной и вращающейся частями электрической машины. Различают щетки угольно-графитные (УГ), графитные (Г), электрографитированные, т. е. подвергнутые температурной электрообработке — графитированию (ЭГ), медно-графитные с содержанием металлической меди.

Важнейшие характеристики щеток приведены в таблице 23.1.

Таблица 23.1

Параметры угольных щеток

Тип щетки	Удельное сопротивление, мкОм. м	Допустимая плотность тока, МА/м^2	Допустимая линейная скорость, м/с
Т 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

Угольные порошки для микрофонов изготовляются из антрацита. Удельное сопротивление порошка зависит от крупности зерен, режима обжига и плотности насыпки (порошок не должен слеживаться с течением времени). Обжиг порошков увеличивает электрическое сопротивление.

Непроволочные резисторы отличаются от проволочных уменьшенными размерами и высоким верхним пределом номинального сопротивления. Находят применение в автоматике, измерительной и вычислительной технике и др.

Природный графит представляет собой одну из модификаций чистого углерода слоистой структуры с большой анизотропией как электрических, так и механических свойств. Чистый углерод в модификации алмаза представляет собой диэлектрик с весьма высоким сопротивлением.

Основные свойства графита и пиролитического углерода приведены в таблице 23.2.

Лаки, в состав которых в качестве пигмента введена сажа, обладают малым удельным сопротивлением и используются для выравнивания электрического поля в электрических машинах высокого напряжения.

Таблица 23.2

Параметры графита и пиролитического углерода

Материал	Удельное сопротивление ρ, мкОм·м	Плотность, Мг/м^3	Температурный коэффициент удельного сопротивления $\alpha_\rho \cdot 10^4$, К$^{-1}$	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^6$, К$^{-1}$
Поликристаллический 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	2,1	–2	6,5–7,0

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

Сажи представляют собой мелкодисперсный углерод с примесями слоистых веществ.

Бороуглеродистые пленки обладают малым температурным коэффициентом удельного сопротивления.

Существуют проводниковые материалы особо высокой нагревостойкости, имеющие рабочие температуры $T = 1500...2000$°С. Используют в МГД-генераторах.

Вопросы для самопроверки

1. Что относится к неметаллическим проводникам?
2. Какие бывают щетки?
3. Из чего изготавливают угольные порошки?
4. Чем отличаются непроволочные резисторы от проволочных?
5. В чем особенность структуры пиролитического углерода?
6. Что представляют собой сажи?

РАЗДЕЛ 24. ПРИПОИ

Припои представляют собой специальные сплавы, применяемые с целью создания механически прочного соединения или постоянного электрического контакта с малым переходным сопротивлением.

Припои принято делить на две группы: мягкие и твердые. К мягким относятся припои с температурой плавления до 400°С, а к твердым — припои с температурой плавления выше 500°С.

Тип припоя выбирают в соответствии с родом спаиваемых металлов, требуемой механической прочностью, коррозионной стойкостью, стоимостью и удельной электропроводимостью припоя (при пайке токоведущих частей).

Мягкими припоями в основном являются оловянно-свинцовые припои с содержанием олова от 18 до 90%. Удельная проводимость стандартной меди $\alpha_1 = (26–27)\cdot 10^{-6}\ К^{-1}$.

Существуют также мягкие припои с добавлением алюминия, серебра, висмута и кадмия. Механическая прочность их очень незначительная. Висмутовые припои обладают большой хрупкостью.

Наиболее распространенные твердые припои — медно-цинковые (ПМЦ) и серебренные (ПСр). Обобщение характеристики некоторых припоев приведены в таблице 24.1.

Таблица 24.1

Состав и свойства припоев

Тип припоя	Марка припоя	Основные компоненты	Свойства			Материалы, спаиваемые данным припоем
			Плотность, Мг/м³	Предел прочности при растяжении, МПа	Температура плавления, °С	
Припои оловянно-свинцовые	От ПОС-18 до ПОС-90	Sn 18–90% Sb 0,15–2,5% Pb — остальное	7,6–10,2	28–43	190–277	Медь и ее сплавы, серебро, оцинкованное железо
Припои оловянно-свинцово-кадмиевые	ПОСК-47	Sn 47–50% Pb 32–36% Cd 17–18%	—	—	145–180	Медь и ее сплавы, серебро, нанесенное методом вжигания на керамику
Припои оловянно-свинцово-серебряно-кадмиевые	ПСрК	Sn 30% Pb 63% Cd 5% Ag 2%	—	—	225	То же

Продолжение табл. 24.1

Тип припоя	Марка припоя	Основные компоненты	Свойства			Материалы, спаиваемые данным припоем
			Плотность, Мг/м^3	Предел прочности при растяжении, МПа	Температура плавления, °С	
Сплав Вуда	—	Sn 12,5% Pb 25% Cd 11,5% Bi 50%	—	—	60,5	Различные спаиваемые при особо низких температурах
Припои оловянно-кадмиево-цинковые	—	Sn 40–55% Cd 20% Zn 25% (Al 15%)	—	—	200–250	Алюминий и его сплавы
Припои медно-цинковые	ПМЦ-36 ПМЦ-54	Cu 36–54% Zn — остальное	7,7–8,3	220	825–860	Медь и ее сплавы, сталь
Припои медно-серебряно-цинковые	От ПСр-25 до ПСр-70	Cr 26–40% Ag 25–70% Zn 4–35%	8,9–9,8	280–350	720–765	Медь и ее сплавы; серебро, платина, вольфрам, сталь

Не относятся к припоям особые виды металлических материалов, применяемые в электровакуумной технике для вводов, вплавляемых в стекло и работающих при сравнительно низких температурах, где использование особо тугоплавких, но дорогих металлов (вольфрам, молибден, платина) не требуется. Для этих материалов важную роль играет температурный коэффициент линейного расширения α_l, который для получения вакуум-плотного ввода должен согласоваться с α_1 стекла.

Ковар (марка 29НК) применяется для впая в твердые стекла; это сплав примерного состава Ni 29%, Co 18%, остальное Fe.$\alpha_1 = (26–27)\cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$.

Платинит представляет собой биметаллическую проволоку с сердечником из меди. Содержание меди в платине — 25–30% общей массы проволоки $\alpha_1 \approx \alpha_L$ платины.

Вопросы для самопроверки

1. Что представляют собой припои?
2. Какие бывают припои?
3. Как выбирают тип припоя?
4. Что не относят к припоям?

РАЗДЕЛ 25. ФЛЮСЫ

Флюсы — это вспомогательные материалы для получения надежной пайки.

Назначение флюсов в том, что они должны:

1) растворять и удалять окислы и загрязнения с поверхности металлов;
2) защищать в процессе пайки поверхность материала от окисления;
3) уменьшить поверхностное натяжение расплавленного припоя;
4) улучшать растекаемость припоя.

По действию, оказываемому на металл, флюсы делятся на:

1) активные, или кислотные флюсы, которые активно растворяют оксидные пленки на поверхности металлов, чем обеспечивается высокая механическая прочность спая. При монтажной пайке электрических радиоприборов активные флюсы не применяются;

2) бескислотные флюсы (канифоль) и флюсы, приготовляемые на ее основе с добавлением неактивных веществ;

3) активированные флюсы — флюсы, приготовляемые на основе канифоли с добавлением салициловой кислоты, солянокислого диэтиламина;

4) антикоррозионные флюсы — флюсы на основе фосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений и растворителей, а также флюсы на основе органических кислот.

Вопросы для самопроверки

1. Классификация флюсов.
2. Для чего используются флюсы?
3. Свойства флюсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуляев, А. П.* Металловедение : учебник для вузов. — 7-е изд., перераб. и доп. / А. П. Гуляев, А. А. Гуляев. — М. : Альянс, 2012. — 643 с.

2. *Богородицки, Н. П.* Электротехнические материалы : учебник для вузов. — 7-е изд., перераб. и доп. / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. — Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. — 304 с.

3. *Арзамасов В. Б.* Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебник для студентов высших учебных заведений / В. Б. Арзамасов, А. Н. Волчков, В. А. Головин [и др.]. — М. : ИЦ «Академия», 2007. — 446 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ЧАСТЬ 1. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ 3
РАЗДЕЛ 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ 4
1.1. Общие понятия в материаловедении 4
1.2. Общие свойства металлов 5
1.3. Кристаллическое строение металлов и сплавов 5
1.4. Дефекты кристаллического строения 5
1.5. Виды соединений 6
РАЗДЕЛ 2. МАРКИРОВКА СТАЛЕЙ 10
РАЗДЕЛ 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ 12
3.1. Твердость металлов и сплавов 12
3.2. Определение прочности материала 13
3.3. Эксплуатационные свойства 14
РАЗДЕЛ 4. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ «ЖЕЛЕЗО — ЦЕМЕНТИТ» 17
РАЗДЕЛ 5. ЧУГУНЫ 23
РАЗДЕЛ 6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ 25
РАЗДЕЛ 7. МЕДЬ И ЕЕ СПЛАВЫ 26
7.1. Общие сведения 26
7.2. Полезные и вредные примеси 26
7.3. Свойства меди. Сравнительный анализ с золотом и серебром 27
7.4. Маркировка, механические и физические свойства, применение 27
7.5. Сплавы меди с оловом: структура, свойства, маркировка, применение 28
7.6. Сплавы меди с алюминием, кремнием и другими элементами: структура, свойства, маркировка, применение 31
РАЗДЕЛ 8. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ 37
8.1. Свойства алюминия 37
8.2. Постоянные примеси алюминия 38
8.3. Классификация алюминиевых сплавов 40
8.4. Дюралюминий: механические и физические свойства, применение 42
8.5. Силумины: маркировка, свойства, применение 45
8.6. Жаропрочные сплавы: маркировка, свойства, применение 47
8.7. Краткая характеристика свариваемости алюминиевых сплавов 48
РАЗДЕЛ 9. НИКЕЛЬ И ЕГО СПЛАВЫ 49
РАЗДЕЛ 10. ЦИНК 59
ЧАСТЬ 2. ДИЭЛЕКТРИКИ 61
РАЗДЕЛ 11. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ 61
11.1. Диэлектрические материалы 62
11.2. Общие сведения об органических полимерах 63
11.3. Механические свойства диэлектриков 64
РАЗДЕЛ 12. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ 69
12.1. Электропроводность диэлектриков 69
12.2. Электропроводность твердых тел 70
РАЗДЕЛ 13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ 73
13.1. Пробой диэлектриков 73
13.2. Пробой твердых диэлектриков 73

РАЗДЕЛ 14. СМОЛЫ 75
14.1. Разновидности смол 75
14.2. Электроизоляционные лаки и компаунды 76
РАЗДЕЛ 15. ВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ 80
РАЗДЕЛ 16. ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ 84
16.1. Характеристика и свойства пластмасс 84
16.2. Слоистые пластики 85
РАЗДЕЛ 17. ФАСОННЫЕ И НАМОТАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ 87
РАЗДЕЛ 18. СТЕКЛА 88
18.1. Характеристика и свойства стекол 88
18.2. Стеклоэмали 89
18.3. Стекловолокно 89
РАЗДЕЛ 19. ФАРФОР 90
РАЗДЕЛ 20.СЛЮДА И СЛЮДЯНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 92
20.1. Виды и свойства слюды 92
20.2. Слюдиниты и слюдопласты 93
20.3. Синтетическая слюда 94
ЧАСТЬ 3 ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ 95
РАЗДЕЛ 21. КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВ 96
21.1. Классификация проводниковых материалов 96
21.2. Электропроводность металлов (классическая электронная теория) 96
21.3. Свойства проводников 97
РАЗДЕЛ 22. СВЕРХПРОВОДНИКИ И КРИОПРОВОДНИКИ 101
РАЗДЕЛ 23. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ 106
РАЗДЕЛ 24. ПРИПОИ 108
РАЗДЕЛ 25. ФЛЮСЫ 110
ЛИТЕРАТУРА 111

Михаил Васильевич РАДЧЕНКО

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебник

Зав. редакцией
инженерно-технической литературы *Е. А. Яковлева*
Ответственный редактор *В. В. Яески*
Подготовка макета *Е. С. Жукович*
Корректор *Е. Е. Егорова*
Выпускающий *В. А. Плотникова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, д. 1, лит. А
Тел./факс: (812) 336-25-09, 412-92-72
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 04.04.22.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 70×100 $^{1}/_{16}$.
Печать офсетная/цифровая. Усл. п. л. 9,43. Тираж 30 экз.

Заказ № 571-22.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного оригинал-макета в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.