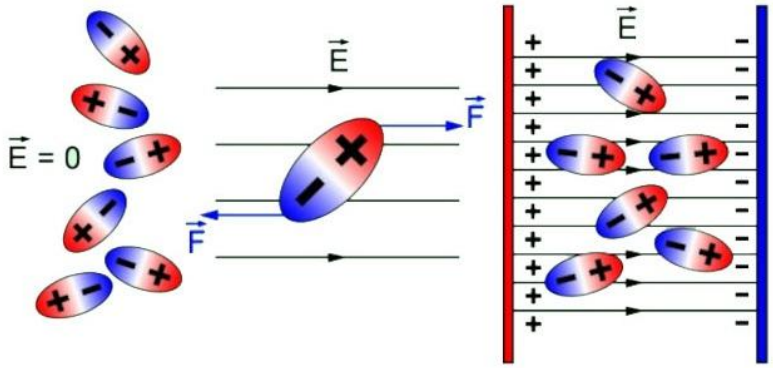
7442

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Ф. УТКИНА

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 3



Рязань 2022

УДК 621.382

Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь электроизолирующих материалов: методические указания к лабораторной работе № 3/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т им. В.Ф. Уткина; сост.: Т.А. Холомина, М.В. Зубков, В.Г. Литвинов, В.В. Гудзев. Рязань, 2022. 16 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов поляризации и явлениях возникновения потерь энергии в диэлектриках. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего емкость и добротность образцов, а также виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины, обучающихся по направлениям 11.03.01, 18.03.01 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 11.05.01, 12.03.01, 11.03.04, 12.03.04, 13.03.02, 24.05.06 дневного отделения.

Табл. 1. Ил. 8. Библиогр.: 6 назв.

Диэлектрики, поляризация, диэлектрические потери

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (зав. кафедрой доктор физ.-мат. наук, доц. В.Г. Литвинов)

Измерение относительной диэлектрической проницаемости
и тангенса угла диэлектрических потерь
электроизолирующих материалов

Составители: Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
З у б к о в Михаил Владимирович
Л и т в и н о в Владимир Георгиевич
Г у д з е в Валерий Владимирович

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение явлений поляризации и диэлектрических потерь, ознакомление с резонансным методом измерения основных параметров ε и tgδ диэлектриков и исследование их частотных зависимостей на измерительном оборудовании, а также с помощью виртуального лабораторного стенда.

1. Краткие теоретические сведения

Фундаментальное явление, определяющее возможность использования диэлектрика для создания емкости конденсаторов электронной аппаратуры, – поляризация диэлектриков. Электрическая поляризация при воздействии поля проявляется в ограниченном упругом смещении связанных зарядов, ориентации дипольных молекул, в результате чего некоторый объем или поверхность диэлектрика приобретает электрический момент. После снятия электрического поля связанные заряды возвращаются в первоначальное состояние.

Для сравнения диэлектриков, имеющих различную степень поляризации, пользуются понятием относительной диэлектрической проницаемости ε. Эта величина представляет собой отношение заряда Q конденсатора с конкретным диэлектриком к заряду Q_0 конденсатора тех же размеров и при том же напряжении, между обкладками которого находится вакуум:

$$\varepsilon = Q/Q_0, \qquad (1)$$

где ε – величина безразмерная и всегда больше единицы, поскольку реальные диэлектрики, в отличие от вакуума, всегда содержат электрические заряды.

Диэлектрики делятся на два класса: полярные и неполярные. У молекул неполярных веществ центры тяжести суммарных положительных и отрицательных зарядов совпадают. Молекулы полярных материалов имеют вид диполей, способных ориентироваться в электрическом поле.

Различают две группы поляризации. Мгновенная поляризация (электронная, ионная) происходит практически без потерь энергии. Замедленные виды поляризации (электронно-, ионно-, дипольно-релаксационная, структурная, спонтанная) сопровождаются потерями электрической энергии. Отдельные виды поляризации различаются временем установления (релаксации) и величиной, обратно пропорциональной времени релаксации, – характеристической частотой, вплоть до которой конкретный вид поляризации способен проявляться.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение

и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около 10^{-15} с), процесс происходит практически без потерь энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков без исключения, поскольку у всех диэлектриков имеются электроны, находящиеся в связанном состоянии.

Ионная поляризация характерна для твердых диэлектриков с ионным строением (слюда, корунд, каменная соль) и проявляется в упругом смещении связанных ионов под действием электрического поля. Время установления поляризации около 10^{-13} с, потерь энергии не происходит.

Электронно- и ионно-релаксационная поляризации сопровождаются диэлектрическими потерями. Электронно-релаксационная поляризация возникает вследствие возбуждения тепловой энергии избыточных (дефектных) электронов и дырок. Ионно-релаксационная поляризация характерна для материалов ионного строения с неплотной упаковкой ионов (например, в неорганических стеклах). При этом виде поляризации слабосвязанные ионы под действием поля перемещаются на одно или несколько атомных расстояний и закрепляются в новом положении, что создает асимметрию распределения зарядов и, следовательно, электрический момент единицы объема. Время релаксации составляет $10^{-8}...10^{-11}$ с для ионов-релаксаторов разных размеров.

Дипольно-релаксационная поляризация обычно наблюдается в полярных органических диэлектриках (полиметилметакрилат, поливинилхлорид и т.д.) и заключается в ориентации, повороте дипольных молекул, дипольных групп под действием электрического поля. Этот вид поляризации сопровождается потерями энергии. Чем ниже температура и крупнее диполи, тем больше время релаксации, изменяющееся в пределах $10^{-6}...10^{-10}$ с.

Структурная (межслойная, миграционная) поляризация обусловлена движением свободных зарядов (положительных и отрицательных ионов, электронов) и их закреплением на дефектах и поверхностях раздела различных компонентов электроизоляционного материала. Этот вид поляризации наблюдается в неоднородных диэлектриках (композиционные пластмассы, гетинаксы, текстолиты, керамика и т.д.), компоненты которых обладают разными электрическими свойствами. Время релаксации может достигать десятков минут, поляризация сопровождается диэлектрическими потерями.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация характерна для сегнетоэлектриков. При температуре ниже точки Кюри, когда энергия теплового движения невысока, ионы, смещаясь друг относительно

друга, создают электрический момент. Области с одинаковым направлением дипольных моментов называются доменами. До действия электрического поля направление дипольных моментов разных доменов хаотично и сумма их равна нулю, поэтому сегнетоэлектрики в целом неполяризованы. Под действием внешнего электрического поля происходит ориентация дипольных моментов доменов в направлении поля. Поэтому диэлектрическая проницаемость при спонтанной поляризации зависит от напряженности электрического поля. Потери энергии при этом незначительны.

Диэлектрическая проницаемость диэлектрика зависит от его агрегатного состояния, структуры и условий эксплуатации (температуры, влажности, напряжения, частоты).

Газообразные диэлектрики из-за низких концентраций заряженных частиц и плотности имеют $\varepsilon \approx 1$.

У жидких неполярных диэлектриков с электронной поляризацией ε также невелика и составляет 2-2,5. Полярные (органические и неорганические с неплотной упаковкой) диэлектрики, для которых характерны релаксационные виды поляризации, имеют ε=3...10. Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков достигает $2 \cdot 10^5$.

Характер зависимости $\varepsilon(T)$ конкретного диэлектрика обусловлен преобладающим видом поляризации. Например, у неполярных материалов (полиэтилен, парафин) ε с ростом температуры снижается из-за уменьшения плотности и соответственно концентрации объектов поляризации заряженных частиц (рис. 1, кривая 1).

Зависимость ε полярных диэлектриков от температуры имеет максимум при определенной температуре T_1 (рис. 1, кривая 2). При увеличении температуры до T_1 ε увеличивается за счет

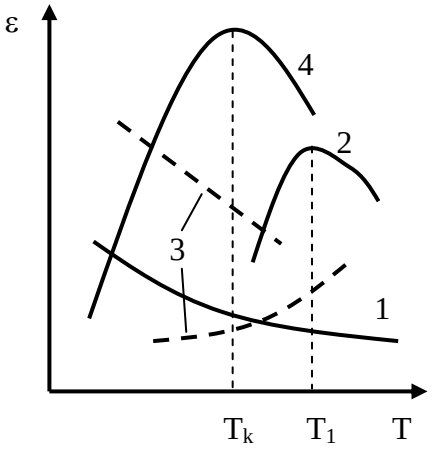


Рис. 1. Зависимость ε от температуры для диэлектриков с электронной (1), дипольно-релаксационной (2), ионной и ионно-релаксационной (3) и спонтанной (4) поляризацией

уменьшения вязкости и облегчения ориентации диполей, далее, при $T>T_1$ (определенной для каждого диэлектрика), ε уменьшается, так как тепловое движение нарушает ориентацию диполя по полю. У большинства неорганических стеклообразных и кристаллических материалов ионного строения ε увеличивается с ростом температуры, а у некоторых уменьшается (рис.1, кривая 3). Это объясняется наличием у диэлектриков как электронной (снижение ε с ростом Т), так и ионной поляризации. Вследствие уменьшения связи между ионами ε при ионной поляризации с ростом температуры увеличивается.

При повышении температуры вплоть до значения точки Кюри (T_K на рис. 1, кривая 4) ε сегнетоэлектриков увеличивается вследствие облегчения процесса поляризации доменов, а выше точки Кюри уменьшается из-за того, что хаотическое тепловое движение молекул с сосредоточенными на них электрическими моментами нарушает доменное строение.

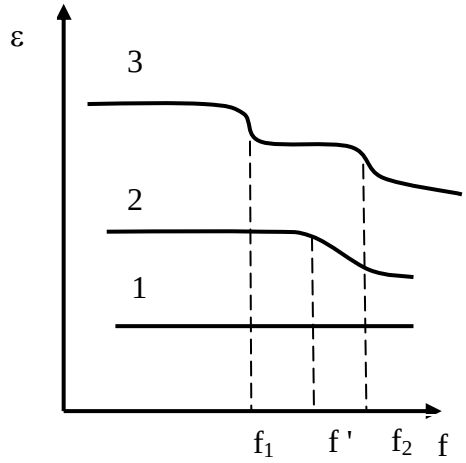


Рис. 2. Частотная зависимость ε диэлектриков с мгновенной (1) и релаксационными (2, 3) видами поляризации

Относительная диэлектрическая проницаемость ε неполярных диэлектриков не зависит от частоты, как показано на рис. 2 (кривая 1), так как им свойственна только мгновенная поляризация, время релаксации которой мало по сравнению с полупериодом действия напряжения. В полярных материалах с дипольно-релаксационной или ионно-релаксационной поляризацией ε до определенной частоты f^1 не меняется (рис. 2, кривая 2). Когда поляризация не будет успевать полностью устанавливаться за один полупериод действия напряжения (f′ - величина, обратная времени релаксации), ε снижается, приближаясь к значению, обусловленному всегда имеющейся электронной поляризацией. Некоторые полярные полимеры имеют ступенчатую зависимость ε(f), аналогичную кривой 3 (рис. 2), обусловлен-

ную наличием набора разных релаксаторов (диполей, групп, сегментов) с соответствующими характеристическими частотами «выбывания» f_1, f_2 и временами релаксации поляризационных процессов. Характеристическую частоту f_x можно рассчитать по формуле

$$f_x = \frac{kT}{8\pi^2 \eta r^3}, \qquad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, η – вязкость среды, r – радиус поляризующегося элемента (макромолекулы, диполя и т.п.).

Из соотношения (2) следует, что характеристическая частота увеличивается с ростом температуры и снижается при увеличении вязкости диэлектрика. Самое значительное влияние оказывают на характеристическую частоту размеры релаксатора (иона, диполя, макроструктурного компонента диэлектрика). Применительно к диполям, т.е. полярным молекулам, f_x соответствует максимальной частоте внешнего электромагнитного поля, которую они способны воспроизвести своими поворотами в нем. За счет таких поворотов (ориентации) достигается максимально возможная компенсация внешнего поля собственным электрическим полем диэлектрика. Важно, что полярные молекулы одинаковых размеров, пребывая в средах с разной вязкостью, обладают неодинаковой характеристической частотой. Поскольку емкость любого конденсатора пропорциональна величине ε, зависимости $C(T)$ и $C(f)$ полностью определяются зависимостями $\varepsilon(T)$ и $\varepsilon(f)$ конкретного диэлектрика.

Диэлектрическими потерями называется энергия, рассеиваемая в единицу времени в диэлектрике, находящемся в электрическом поле, и вызывающая его нагрев. При постоянном поле потери обусловливаются током сквозной проводимости – движением ионов, иногда – свободных электронов. Потери на сквозную электропроводность присущи в большей или меньшей мере всем диэлектрикам без исключения. Величина потерь на сквозную электропроводность определяется удельным сопротивлением ρ_v, а в твердых диэлектриках также и удельным поверхностным сопротивлением ρ_s.

При переменном поле различают следующие виды потерь:

1) на сквозную электропроводность;

2) поляризационные, обусловленные разными видами замедленной (релаксационной) поляризации;

3) ионизационные;

4) обусловленные неоднородностью структуры.

Поляризационные потери характерны для полярных диэлектриков (поливинилхлорид, полиметилметакрилат, полиэтилентерефталат, электроизоляционные стекла и др.). Каждый тип релаксационной по-

ляризации диэлектрика сопровождается характерными поляризационными потерями с определенным временем релаксации и характеристической частотой.

Ионизационные потери характерны для газообразных диэлектриков, а также жидких и твердых, содержащих газовые включения (керамические, слоистые, композиционные и др.). Этот вид потерь характеризуется так называемой кривой ионизации - зависимостью tg δ от приложенного электрического напряжения [2,3].

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, непосредственно связаны с макроструктурной (миграционной) поляризацией и присутствуют в композиционных, керамических, слоистых диэлектриках.

При выводе аналитического соотношения для расчета мощности диэлектрических потерь пользуются эквивалентной схемой диэлектрика, состоящей из последовательно или параллельно включенных активного сопротивления R и емкости C. Эквивалентная схема выбирается так, чтобы расходуемая активная мощность была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а вектор тока был сдвинут относительно вектора напряжения на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

В идеальном конденсаторе (вакуумном) без потерь угол между векторами тока $\vec{I}_c$ и напряжением $\vec{U}_c$ равен 90°. Чем больше рассеиваемая в реальном диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция tg δ (рис. 3).

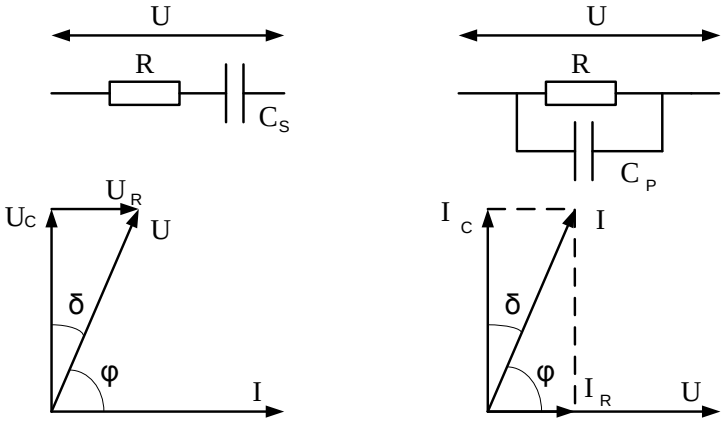
Тангенс угла диэлектрических потерь (tg δ) – параметр, учитывающий все виды потерь в диэлектрике и представляющий собой тангенс угла, дополняющего угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи до 90°. Тангенс угла диэлектрических потерь равен отношению

$$tg\delta = I_a/I_c, \qquad (3)$$

а мощность диэлектрических потерь в переменном электрическом поле

$$P_{\sim} = U^2 \omega C tg\delta, \qquad (4)$$

где U – приложенное напряжение; ω=2πf – частота. Из выражения (4) следует, что диэлектрические потери существенно влияют на работу аппаратуры высокого напряжения, высокочастотной и в особенности - одновременно высокочастотной и высоковольтной.



а б

Рис. 3. Эквивалентные схемы и векторные диаграммы диэлектрика с потерями: а – последовательная; б – параллельная

Тангенс угла диэлектрических потерь зависит от состава и структуры диэлектриков, от агрегатного состояния, а также от условий эксплуатации.

У чистых однородных неполярных диэлектриков диэлектрические потери малы и обусловлены только током сквозной проводимости. Tgδ незначителен, порядка 10^{-4}, с ростом частоты падает (рис. 4, кривая 1), так как I_R от частоты практически не зависит, а реактивный ток I_c увеличивается. Для таких диэлектриков при повышении температуры tgδ возрастает за счет увеличения тока сквозной проводимости (рис. 5, кривая 1).

Полярные диэлектрики, у которых потери обусловлены как сквозной проводимостью (иногда значительной), так и релаксационными видами поляризации, имеют высокий tg δ ~ 10^{-2} - 10^{-1}. Частотная и температурная зависимости tgδ таких диэлектриков имеют максимумы, показанные на рис. 4 (кривая 2) и 5 (кривая 2). Появление максимума на зависимости tgδ(f) объясняется инерционностью диполей и дипольных групп, не успевающих ориентироваться по полю за полупериод его изменения. Общий характер частотной зависимости соответствует кривой 1, рис. 4, т.е. потерям на сквозную электропроводность. При наличии нескольких релаксаторов появляется соответствующее число максимумов tgδ аналогично рис. 2.

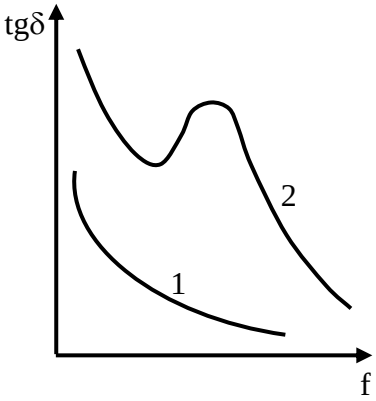


Рис. 4. Частотная зависимость tg δ для диэлектриков с потерями на сквозную электропроводность (1); с потерями на электропроводность и поляризационными потерями (2)

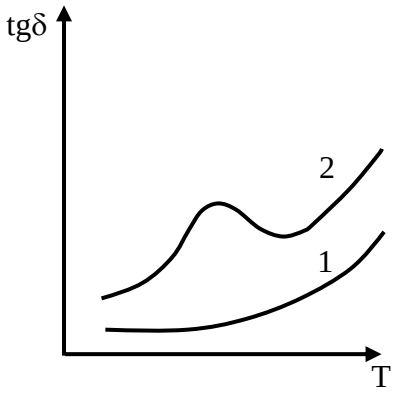


Рис. 5. Зависимость tg δ от температуры для неполярных (1) и полярных (2) диэлектриков

Появление максимумов на температурной зависимости tgδ полярных диэлектриков объясняется тем, что по мере повышения температуры закрепленные диполи получают дополнительную энергию, большую свободу перемещения и ориентации по полю. При этом возрастает мощность диэлектрических потерь и tgδ. Начиная с определенной температуры, соответствующей максимуму tgδ на его температурной зависимости, энергия теплового движения становится выше энергии электрического поля, нарушается ориентация диполей, затрата энергии уменьшается и tgδ снижается. При высоких температурах tgδ полярных диэлектриков возрастает за счет роста тока сквозной проводимости.

У диэлектриков с газовыми включениями tgδ растет при увеличении напряжения вследствие ионизации газа. Поэтому пористые диэлектрики непригодны для высоковольтной аппаратуры. У гигроскопичных материалов tgδ имеет повышенное значение, так как вода является источником свободных ионов.

Величина tgδ неоднородных и композиционных диэлектриков зависит от природы и распределения включений, специальных

наполнителей. Значение tgδ слоистых пластмасс может изменяться в широких пределах в зависимости от количественных соотношений компонентов, достигая нескольких единиц.

Наименьшие потери характерны для диэлектриков с мгновенными видами поляризации, имеющих плотную однородную структуру и минимальное содержание примесей. К таким материалам относятся полистирол, полиэтилен, фторопласт-4, трансформаторное масло, слюда, высокочастотный стеатит и др. Особенно высокие требования предъявляются к диэлектрикам, применяемым на высоких частотах и в высоковольтной аппаратуре.

2. Описание методики измерений

Возможны два варианта выполнения настоящей лабораторной работы. В первом случае это реальный прибор с реальными образцами диэлектрических материалов. Во втором случае используются программная модель прибора - куметр (виртуальный прибор) и программные (виртуальные) модели диэлектрических материалов, при этом работа выполняется на персональном компьютере. Вариант выполнения работы, диэлектрические материалы, диапазоны частот и температур для исследования задаются преподавателем.

Принцип выполнения лабораторной работы с помощью реального и (или) виртуального прибора - куметра остается неизменным. Измеряется емкость образцового конденсатора и добротность контура без образца диэлектрика и с подключенным образцом. Затем по формулам производят расчет параметров диэлектриков. Приведенное далее задание к лабораторной работе остается неизменным в любом варианте ее выполнения.

2.1. Выполнение лабораторной работы на измерительном куметре

Куметром называется прибор, позволяющий измерять добротность колебательного контура, индуктивность катушек, емкость и добротность конденсаторов. Добротность диэлектрической изоляции представляет собой величину, обратную tg δ, т.е.

$$Q=1/\operatorname{tg}\delta.$$

Функциональная схема куметра приведена на рис. 6. Она включает в себя следующие элементы:

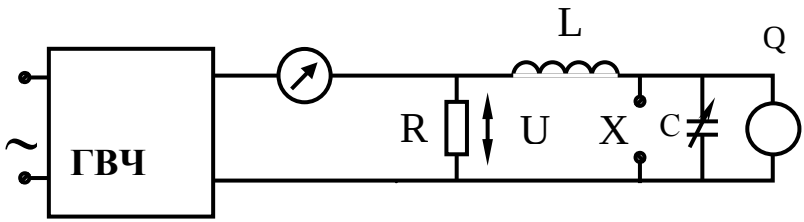


Рис. 6. Функциональная схема куметра

ГВЧ – генератор высокой частоты; R=0.04 Ом – постоянное сопротивление; L – сменные образцовые катушки индуктивности; X – зажимы для подключения образца; C – образцовый конденсатор переменной емкости на 25 – 450 пФ; Q – вольтметр с высоким входным сопротивлением, проградуированный в значениях добротности. С помощью образцового конденсатора переменной емкости можно добиться резонанса на заданной частоте в последовательном контуре L и C с подключенным испытуемым образцом.

В момент резонанса напряжение на образцовом конденсаторе U_c в Q раз больше подводимого к контуру напряжения U, т.е.

$$U_c = QU. \qquad (5)$$

Добротность контура при резонансе определяется по формуле

$$Q = \omega L / r_k , \qquad (6)$$

где r_k – активное сопротивление контура, ω – частота.

При подключении испытуемого образца с потерями к зажимам образцового конденсатора происходит возрастание активного сопротивления контура при резонансе и, следовательно, уменьшение его добротности. Добротность контура можно определить, зная напряжения U и U_c. Напряжение U_c измеряют вольтметром с большим входным сопротивлением. Подводимое напряжение находится в пределах 0.01 – 0.02 В. Величина этого напряжения зависит от тока, протекающего через резистор R. Следовательно, и показание вольтметра, проградуированного в единицах добротности, зависит от этого тока. Шкала прибора, регистрирующего ток в цепи с сопротивлением R, проградуирована в значениях добротности. Процесс измерения ε и tg δ состоит в определении добротности контура Q_1 и емкости образцового конденсатора C_1 без испытуемого

образца в момент резонанса при заданной частоте и определении значений Q_2 и C_2 при наличии образца. По этим величинам вычисляют tg δ и емкость испытуемого образца.

В работе измерение ε и tg δ диэлектриков производится при помощи куметра Е9 – 4, принцип работы которого изложен выше.

Процесс измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь состоит в следующем.

1. К клеммам L_x на верхней панели прибора подключают одну из измерительных катушек индуктивностей, к клеммам C_x подсоединяют провода без образца. Провода установлены медные жесткие, в виде круглых шин диаметром 3 – 4 мм, покрытых серебром для уменьшения потерь. Расстояние между проводами в процессе измерения емкости и tg δ поддерживают неизменным. Контакты в местах соединений должны быть надежными.

2. Переключатели рода работ устанавливают в положение «Измерение», ручку «Уровень» - в крайнее левое положение. Включают тумблер питания.

3. Переключатель диапазонов Q устанавливают в положение «60». Переключатель рода работ – в положение «Уст. нуля». Ручками «Нуль» и «Нуль уровня» устанавливают нули приборов.

4. Переводят переключатель рода работ в положение «Калибровка». Ручкой «Уровень» устанавливают стрелку прибора на красную риску, а потенциометром «60» стрелку Q вольтметра – на риску «60». Таким же методом устанавливают нуль и откалибровывают шкалы «200» и «600», регулируя соответствующие потенциометры.

5. Переключатель рода работ устанавливают в положение «Измерение».

6. С помощью основного и подстроечного конденсаторов настраивают контур в резонанс и отсчитывают значение емкости C_1 с точностью до десятых долей пикофарад и добротности Q_1. При этом поддерживают стрелку прибора «Уровень» на красной риске.

7. Подключают образец диэлектрика с помощью соединительных проводов и вновь настраивают контур в резонанс с помощью основного и подстроечного конденсаторов. Резонансная емкость контура остается прежней. Производят отсчет Q_2 и C_2. Так как емкость испытуемого образца C_x и емкость измерительного конденсатора C_2 включены параллельно, то должно быть выполнено условие

$$C_x+C_2=C_1, \qquad (7)$$

где C_1 является резонансной емкостью контура, настроенного на

заданную частоту.

8. Таким образом, емкость испытуемого образца

$$C_x=C_1-C_2. \quad (8)$$

Если производится испытание плоского образца, то относительную диэлектрическую проницаемость можно определить из формулы:

$$C_x=\varepsilon\varepsilon_o S/h, \quad (9)$$

где $\varepsilon_o=8.854*10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная вакуума; S – площадь меньшего электрода, $м^2$; h – толщина образца, м.

Если C_x выразить в пикофарадах, то

$$\varepsilon=0.113C_x h/S. \quad (10)$$

В работе верхний электрод имеет форму цилиндра диаметром $5*10^{-2}$ м, нижний – форму пластины. Испытуемый образец располагается между этими электродами.

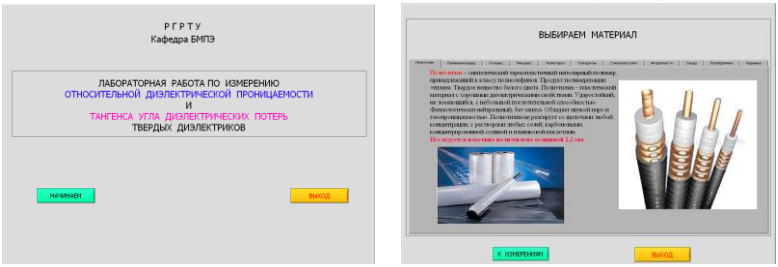
Тангенс угла диэлектрических потерь определяется по формуле

$$\operatorname{tg}\delta=(Q_1-Q_2)C_1/Q_1Q_2(C_1-C_2). \quad (11)$$

2.2. Выполнение лабораторной работы на виртуальном куметре

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков с использованием прибора – измерителя добротности (куметра). Для этого применяется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда диэлектриков в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора куметр. Принцип измерения ε и tgδ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе. Для начала работы необходимо запустить файл «Танг_диэл» на рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.7, а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 7, б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного материала диэлектрика.



а б

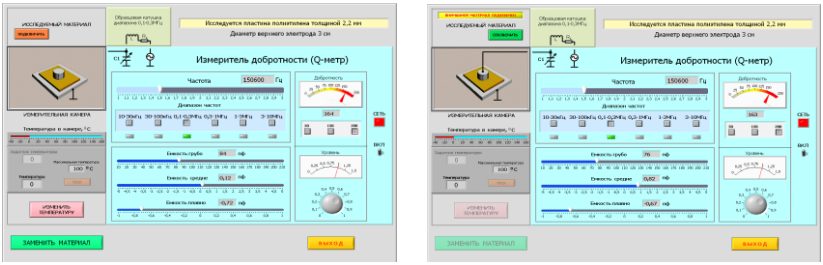
Рис. 7. Внешний вид окна начала работы (а) и выбора материала диэлектрика для исследования (б)

Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения параметров выбранного диэлектрика, показанное на рис. 8. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображаются схема подключения исследуемого образца диэлектрика и используемые при этом электроды.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 0 ^{0}C. Измерение ε и tgδ диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.

1. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на 1.
2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.
3. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1. Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.



а б

Рис. 8. Внешний вид окна для проведения измерений без подключенного к куметру исследуемого образца диэлектрика (а) и с подключенным образцом диэлектрика (б)

4. Подключить образец диэлектрика щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 3. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2, измеренным при подключенном в контур диэлектрике.

5. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с п. 1 - 3 и продолжить в соответствии с п. 4,5.

6. При необходимости выбрать другой диэлектрик, используя кнопку «Заменить материал».

Расчет параметров (C_x, ε и tgδ) по соотношениям (8) - (11) полностью соответствует приведенному в п. 8 раздела 2.1 методических указаний.

3. Задание по выполнению лабораторной работы

1. Произвести измерение тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости материалов по указанию преподавателя.

2. Результаты измерений и расчетные данные свести в таблицу по приведенному ниже образцу.

3. Построить зависимости ε(f), tgδ(f).

Наименование материала	Толщина h, м	Частота, Гц	C_1, пФ	C_2, пФ	C_x, пФ	Q_1	Q_2	ε	tgδ

4. Содержание отчета

1. Наименование работы.

2. Цель работы.

3. Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).

4. Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.

5. Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными.

Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

Контрольные вопросы

1. На какие свойства диэлектрика влияет дипольный момент молекул ?

2.Чем отличается полярная молекула от неполярной?

3.Что такое поляризация и какие свойства диэлектрика характеризует это явление?

4. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости.

5. Охарактеризуйте основные виды поляризации.

6. Какие виды поляризации присущи полярным и неполярным диэлектрикам?

7. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (поливинилхлорида).

8. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (электрофарфора).

9. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного диэлектрика с дипольно-релаксационной, спонтанной поляризациями и неоднородной структурой (сегнетокерамики).

10. Что такое потери энергии в диэлектриках, какими параметрами они характеризуются?

11. Охарактеризуйте основные виды диэлектрических потерь.

12. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (поливинилхлорида).

13. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического поля для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (полиэтилентерефталата).

14. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического поля для неполярного диэлектрика (политетрафторэтилена) и полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (ультрафарфора).

15. Нарисуйте зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты электрического поля для полярного диэлектрика с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (полиметилметакрилата).

16. Нарисуйте зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты электрического поля для полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (радиофарфора).

Библиографический список

1. Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие. - Рязань: РГРТУ, 2015. - 48 с.

2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

3. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 383 с.

5. Вихров С.П., Холомина Т.А. Материаловедение /под ред. Ю.М. Солдака: учеб.пособие.– Рязань: РГРТУ, 2006. –160 с.

6. Справочник по электротехническим материалам / под. ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М.: Энергия, 1974. Т.1. – 583 с.

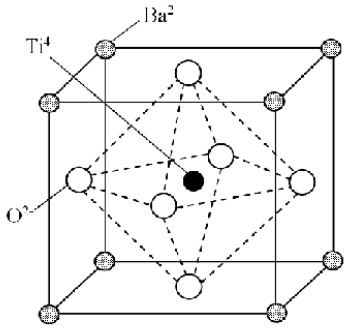
7444

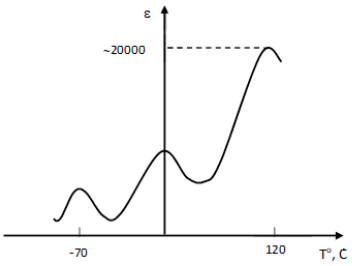
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.Ф. УТКИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 5





Рязань 2022

УДК 621.382

Исследование свойств сегнетоэлектрических материалов: методические указания к лабораторной работе № 5/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т им. В.Ф. Уткина; сост.: М.В.Зубков, Т.А.Холомина, В.Г. Литвинов, Н.Б.Рыбин. Рязань, 2022. 12 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов поляризации в сегнетоэлектрических материалах и температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего эффективную и реверсивную диэлектрическую проницаемости и точку Кюри в сегнетоэлектриках на переменном и постоянном напряжении.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины, обучающихся по направлениям 11.03.01, 18.03.01 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 11.05.01, 12.03.01, 11.03.04, 12.03.04, 13.03.02, 24.05.06 дневного отделения.

Табл. 2. Ил. 7. Библиогр.: 5 назв.

Сегнетоэлектрики, домены, точка Кюри, вариконды

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (зав. кафедрой доктор физ.-мат. наук, доц. В.Г. Литвинов)

Исследование свойств
сегнетоэлектрических материалов

Составители: З у б к о в Михаил Владимирович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
Л и т в и н о в Владимир Георгиевич
Р ы б и н Николай Борисович

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: исследование свойств сегнетоэлектрического материала с помощью осциллографа.

1. Краткие теоретические сведения

Сегнетоэлектриками называют материалы, у которых наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризация. Она возникает под действием внутренних процессов в диэлектрике без влияния внешнего электрического поля, т.е. полностью определяется внутренней структурой вещества.

По типу химической связи и физическим свойствам все кристаллические сегнетоэлектрики принято подразделять на две большие группы: ионные сегнетоэлектрические кристаллы (сегнетоэлектрики типа смещения) и дипольные сегнетоэлектрические кристаллы (упорядочивающиеся сегнетоэлектрики). Свойства ионных и дипольных сегнетоэлектриков существенно различаются.

Для структуры ионных сегнетоэлектриков характерно наличие кислородного октаэдра, из-за чего эти сегнетоэлектрики называют сегнетоэлектриками кислородно-октаэдрического типа. Ионные сегнетоэлектрики имеют структуру элементарной ячейки типа перовскита. К ионным сегнетоэлектрикам относятся титанаты бария $BaTiO_3$, свинца $PbTiO_3$, ниобаты калия $KNbO_3$, лития $LiNbO_3$, танталат лития $LiTaO_3$, йодат калия KIO_3, барий-натриевый ниобат $Ba_2NaNb_5O_{15}$ и др.

К дипольным сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, триглицинсульфат $NH_2CH_2COOH \cdot H_2SO_4$, дигидрофосфат калия KH_2PO_4, нитрит натрия $NaNO_2$ и др.

В материалах одного химического состава спонтанная поляризация может возникать и исчезать в зависимости от фазового состояния вещества и изменения температуры.

Рассмотрим механизм возникновения спонтанной поляризации на примере одного из наиболее важных сегнетоэлектриков – метатитаната бария $BaTiO_3$. На рис. 1 представлена элементарная ячейка его кристаллической структуры при температуре выше 120 ^{0}C.

При такой высокой температуре $BaTiO_3$ имеет кубическую решетку, и интенсивное тепловое движение ионов препятствует возникновению спонтанной поляризации. При уменьшении температуры до 120 ^{0}C (точка Кюри) возникает спонтанная поляризация, ион титана при этом приближается к одному из ионов кислорода, в связи с чем решетка деформируется, вытягиваясь вдоль той оси, по которой сместился ион титана. В точке Кюри при температуре 120 ^{0}C происходит первый фазовый переход решетки из

кубической в тетрагональную, на зависимости $\varepsilon=f(T)$ при этом наблюдается максимум (рис. 2).

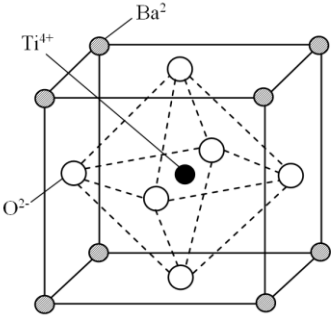


Рис. 1. Элементарная ячейка кристаллической структуры $BaTiO_3$

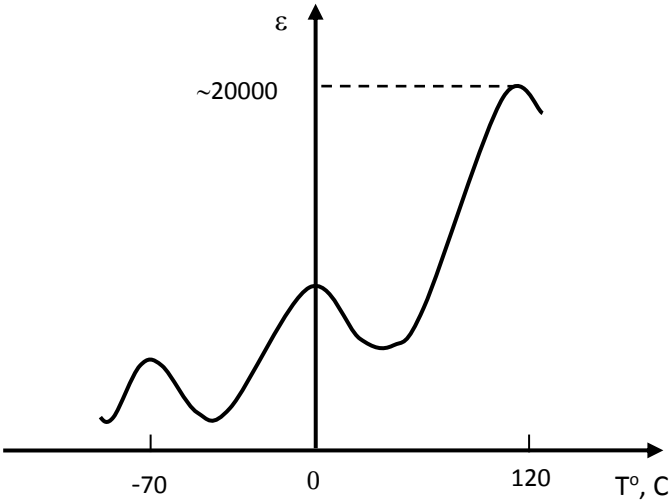


Рис. 2. Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости титаната бария

При дальнейшем охлаждении до температуры 0 ^{0} С наблюдается второй фазовый переход из тетрагональной структуры в орторомбическую. Переход связан со смещением иона титана одновременно к двум ионам кислорода вдоль диагонали грани элементарной ячейки, которая в этом направлении удлиняется. При 0

^{0}C вектор поляризации меняет направление, на зависимости $\varepsilon=f(T)$ наблюдается второй максимум.

При –70 ^{0}C происходит следующий и последний фазовый переход, и решетка приобретает более низкую симметрию, моноклинную или триклинную. Этот переход обусловлен тем, что ион титана смещается одновременно к трем ионам кислорода вдоль объемной диагонали элементарной ячейки, причем вектор спонтанной поляризации опять меняет свое направление и ориентируется вдоль объемной диагонали, по которой сместились ионы титана. На зависимости $\varepsilon=f(T)$ наблюдается третий максимум.

При температурах выше точки Кюри спонтанная поляризация невозможна. В этом случае величина внутреннего поля очень сильно зависит от внешнего приложенного напряжения. Небольшое внешнее напряжение вызывает значительное смещение ионов титана и значительную электронную и ионную поляризации. Поэтому при температурах выше точки Кюри, но вблизи от нее диэлектрическая проницаемость имеет высокое значение. С повышением температуры тепловое движение все больше препятствует направленному смещению ионов титана, в связи с чем диэлектрическая проницаемость резко уменьшается.

Взаимодействие между заряженными частицами соседних элементарных ячеек приводит к согласованному смещению ионов титана либо во всем объеме сегнетоэлектрика, либо в некоторых его областях, называемых доменами. Большие по размеру монокристаллы, а также поликристаллы разбиваются на домены. Каждый домен состоит из миллионов элементарных ячеек (рис.1) с одинаковым направлением вектора поляризации, которые создают собственный электрический момент домена. При этом электрическое поле вне кристалла уменьшается, в связи с чем энергия разделенного на домены монокристалла меньше, чем энергия однодоменного кристалла, что соответствует более устойчивому состоянию вещества с минимумом внутренней энергии. Суммарный электрический момент всех доменных областей без приложения электрического поля к сегнетоэлектрику равен нулю.

При помещении сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле наблюдается его поляризация, характеризующаяся нелинейной зависимостью значения электрической индукции D от значения напряженности электрического поля E (рис. 3).

Эта зависимость выражается кривой, аналогичной петле гистерезиса ферромагнитного материала, и сам процесс поляризации

также во многом идентичен процессу намагничивания ферромагнетика во внешнем магнитном поле.

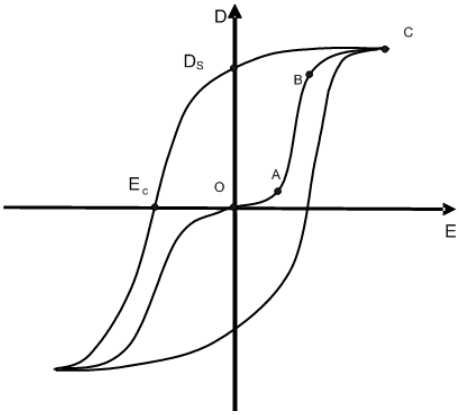


Рис. 3. Зависимость электрического смещения от величины внешнего электрического поля

При увеличении напряженности внешнего электрического поля за счет процессов смещения границ доменов, ориентации вектора электрического момента доменов сегнетоэлектрик поляризуется до технического насыщения (кривая OABC). При уменьшении напряженности внешнего поля до нуля внутренняя индукция падает до величины D_S, которая называется остаточной. Если приложить поле, равное E_c, в противоположном направлении, поляризация (внутренняя индукция) обращается в нуль. Поле E_c называют коэрцитивным полем. Для характеристики работы сегнетоэлектриков в различных режимах эксплуатации широко применяется понятие относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = D/\varepsilon_o E$.

Наиболее часто используют понятие эффективной (или нормальной) диэлектрической проницаемости ε, начальной $\varepsilon_н$, максимальной ε_{max}, дифференциальной $\varepsilon_{диф}$, а также реверсивной (или обратимой) диэлектрической проницаемости. Всего существует более 10 разновидностей диэлектрической проницаемости.

Проводя из начала координат прямые, пересекающие основную кривую поляризации в определенных точках, можно определить значения начальной и максимальной диэлектрической проницаемости. Тангенс угла наклона касательной на участке OA характеризует начальную диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon_н$), а тангенс угла наклона прямой (касательной), проведенный из начала координат в точку верхнего перегиба кривой OABC (точку B, рис. 3), соответствует максимальной диэлектрической проницаемости ε_{max} . Проводя из начала координат прямые, пересекающие основную кривую поляризации OABC в различных точках, и определяя

соответствующие значения тангенса угла наклона указанных прямых, можно построить зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля (рис. 4).

Дифференциальную проницаемость $\varepsilon_{диф}$ определяют как производную (дифференциал) от электрической индукции по напряженности электрического поля для любой точки основной кривой поляризации.

Понятие реверсивной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_р$ используется при разработке разделительных цепей электронных усилителей. Для измерения $\varepsilon_р$ к сегнетоэлектрику прикладывают относительно большое постоянное напряжение ($E_п$) и малое переменное (δE – удвоенная амплитуда переменного сигнала), на котором определяют емкость конденсатора с сегнетоэлектриком (рис. 5). При приложении постоянного напряжения $E_п$ отметим на кривой поляризации точку М. Если теперь на постоянное напряжение наложить переменное напряжение меньшей амплитуды, т. е. вначале увеличить напряжение на величину δE, а затем уменьшить до величины $E_п - \delta E$, то в процессе этого изменения зависимость D от E изобразится частной петлей гистерезиса. Проведем прямую через крайние точки этой петли, лежащие при $E_п + \delta E$ и $E_п - \delta E$. Угол наклона этой прямой $\alpha_р$ соответствует величине реверсивной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_р$:

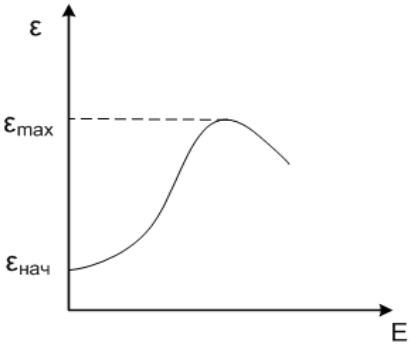


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{m_D}{m_E} \cdot tg\alpha_p \cdot \qquad (1)$$

Спонтанная поляризация находит широкое применение в радиоэлектронике. Благодаря форме петли гистерезиса (два устойчивых состояния +1 и -1), сегнетоэлектрики можно применять в запоминающих устройствах (ЗУ) ЭВМ.

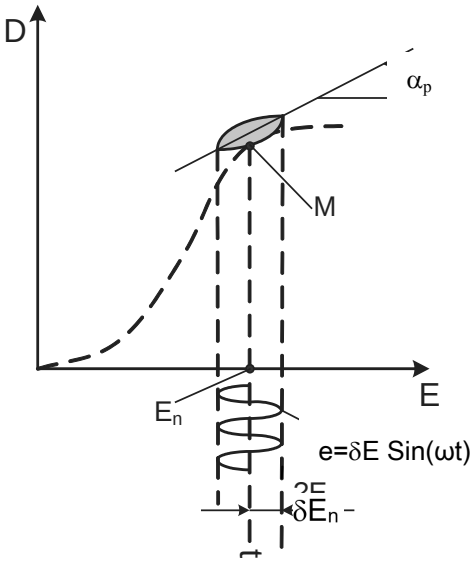


Рис. 5. Определение реверсивной диэлектрической проницаемости по частной петле гистерезиса

Основное требование в этом случае – наличие как можно более прямоугольной петли гистерезиса, что характерно, например, для монокристаллов триглицинсульфата. В отсутствие внешнего поля сегнетоэлектрик имеет два устойчивых состояния, соответствующих двум направлениям остаточной электростатической индукции. Подавая внешнее напряжение различной полярности, сегнетоэлектрик можно переводить из одного логического состояния в другое. На этом основаны запись, считывание и стирание информации. Считывание информации с сегнетоэлектрического ЗУ можно осуществлять, например, оптическим методом или измерением сопротивления тонкой полупроводниковой пленки, нанесенной на поверхность сегнетоэлектрика. Быстродействие сегнетоэлектрического ЗУ может составлять единицы микросекунд.

Существование в сегнетоэлектриках зависимости ε от напряженности электрического поля (рис. 4) приводит к аналогичной зависимости емкости сегнетоэлектрических конденсаторов от напряжения.

Такие конденсаторы называют варикондами и применяют в устройствах стабилизации частоты. Конструктивно вариконды

выполняют в виде плоских керамических конденсаторов. Одна из основных характеристик варикондов – коэффициент эффективной нелинейности, определяемый как отношение максимального значения диэлектрической проницаемости к начальному значению диэлектрической проницаемости. Численное значение указанного выше коэффициента может изменяться в пределах от 4 до 50.

Наличие доменной структуры и диэлектрического гистерезиса приводит к сверхвысоким значениям ε в сегнетоэлектриках (10^4-10^5). Это делает возможным создание малогабаритных конденсаторов большой удельной емкости. Зависимость ε сегнетоэлектриков от температуры (рис. 2) позволяет использовать их в качестве датчиков температуры. Многие сегнетоэлектрики являются одновременно и пьезоэлектриками.

Спонтанная поляризация сопровождается диэлектрическими потерями, при этом площадь петли диэлектрического гистерезиса пропорциональна мощности потерь. Поэтому практическое применение сегнетоэлектриков возможно только в диапазоне низких частот и в ограниченном интервале температур.

В настоящей работе рассматривается метод измерения эффективной и реверсивной диэлектрических проницаемостей нелинейного сегнетоэлектрического конденсатора с помощью осциллографа.

2. Описание установки и методики измерений

Измерение эффективной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика с помощью осциллографа

Исследование свойств сегнетоэлектриков производят на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 6.

Схема содержит следующие элементы: К1 – ключ, включающий питание установки; R1 – реостат для регулирования напряжения; V1 – вольтметр типа В3 – 39; R2, R3 – делители напряжения; C_x – испытуемый сегнетоэлектрический конденсатор; C_o – образцовый конденсатор; 1-2 – горизонтальный вход осциллографа; 3-2 – вертикальный вход осциллографа; 4, 5, 6 – зажимы для подключения вольтметра.

На горизонтальный вход осциллографа подается напряжение с R3, пропорциональное всему приложенному напряжению, которое распределяется между конденсаторами C_x и C_o обратно пропорционально емкости, т.е.

$$C_x/C_o=U_o/U_x, \qquad (2)$$

где U_o – напряжение на образцовом конденсаторе; U_x – напряжение на испытуемом конденсаторе.

На вертикальный вход осциллографа подается напряжение с конденсатора C_o, пропорциональное его заряду.

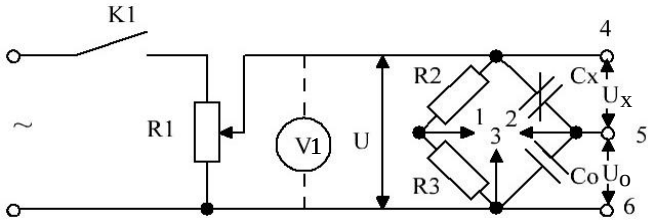


Рис. 6. Принципиальная схема установки
для измерения емкости сегнетоконденсатора

Заряды на конденсаторах C_x и C_o равны, так как они включены последовательно.

Из формулы (2) определяется емкость испытуемого сегнетоконденсатора:

$$C_x=C_oU_o/U_x=Q_o/U_x. \qquad (3)$$

По полученной осциллограмме можно определить горизонтальный масштаб напряжений m_U и вертикальный масштаб зарядов m_q:

$$m_U=2U_x\sqrt{2}/L_o, \quad \text{В/дел.}, \qquad (4)$$
$$m_q=2U_oC_o\sqrt{2}/H_o, \quad \text{Кл/дел.},$$

где L_o и H_o – расстояние по горизонтали и вертикали гистерезисной кривой соответственно.

Зная масштабы зарядов и напряжений, можно при любых других значениях U определить заряды и напряжения на обкладках сегнетоконденсатора:

$$Q_M=m_qH/2,$$
$$U_{XM}=m_UL/2. \qquad (5)$$

Отсюда

$$C_x=m_qH/m_UL=m_cH/L. \qquad (6)$$

Зная емкость сегнетоэлектрического конденсатора и его геометрические размеры, можно определить относительную диэлектрическую проницаемость

$$C_x=\varepsilon\varepsilon_oS/h, \qquad (7)$$

где $\varepsilon_o=8.85\cdot10^{-12}$ Ф/м; C_x – измеряемая емкость, Ф;

h – расстояние между обкладками конденсатора, м;

S – площадь обкладок конденсатора, м^2.

Из соотношения (7):

$$\varepsilon=0.113C_x h\cdot 10^{12}/S. \qquad (8)$$

Достоинство осциллографического метода измерения емкости сегнетоэлектрического конденсатора заключается в его простоте.

Измерение реверсивной диэлектрической проницаемости

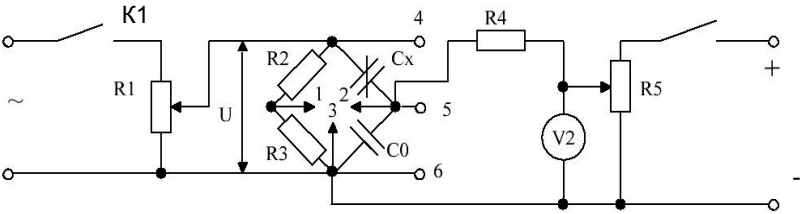


Рис. 7. Принципиальная схема установки для измерения реверсивной емкости сегнетоконденсатора

Измерение реверсивной диэлектрической проницаемости производится на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 7. Она отличается от схемы, приведенной на рис. 6, наличием регулируемого с помощью реостата R5 постоянного напряжения, которое подается на образцовый конденсатор через резистор R4. Постоянное напряжение измеряется вольтметром V2, который находится на панели лабораторного стенда.

Так как оба конденсатора C_o и C_x в цепь постоянного тока включены параллельно, они находятся под одним напряжением.

При измерении реверсивной емкости следует придерживаться той же методики, что и при измерении эффективной емкости, увеличив усиление осциллографа и определив новые масштабы зарядов и напряжений.

3. Описание методики измерения

1. Собрать схему согласно рис. 6.

2. С помощью ключа К1 включить питание установки. Реостатом R1 установить напряжение U, равное 130 В по показанию вольтметра V1, подключив его к зажимам 4, 6 лабораторного стенда. С помощью рукоятки «Усиление» по горизонтали и по вертикали получить на экране трубки устойчивое изображение петли диэлектрического гистерезиса в пределах экрана осциллографа. Вольтметром измерить

напряжения U_o и U_x на зажимах 5, 6 и 4, 5 и вычислить масштабы зарядов и напряжений по формулам (4).

Таблица 1

U, В	L,дел	H,дел	$U_{хм}$,В	$C_э$,Ф	$\varepsilon_э$	$E_{хм}$, В/м
130						
100						
70						
50						
30						

Рукоятки «Усиление» на осциллографе после определения масштабов не сдвигать!

С помощью реостата R1 изменить напряжение U в пределах от 130 до 30 В, как указано в табл. 1, при этом измерить L и H – расстояния по горизонтали и вертикали между вершинами гистерезисной кривой для каждого значения напряжения. Для удобства отсчета показаний рукоятки «Вертикальные пластины», «Горизонтальные пластины» осциллографа установить в положение «Закор.».

По формулам (6) и (8) определить значения $C_э$ и $\varepsilon_э$. Расстояние между электродами конденсатора h, диаметр электродов d указаны на лабораторном стенде. Напряженность электрического поля рассчитывать по формуле

$$E_x = U_{xм}/h. \qquad (9)$$

Все данные занести в табл. 1, по этим данным построить зависимость $\varepsilon_э = f(E_{xм})$.

Реостатом установить напряжение $U=130$ В по вольтметру V1. На экране осциллографа добиться отчетливого изображения петли гистерезиса, не выходящей за пределы экрана трубки. Срисовать петлю на кальку и с помощью миллиметровой бумаги измерить ее площадь. Зная эту площадь, можно определить активную мощность, рассеиваемую в диэлектрике, и tg δ.

$$P = f m_U m_q G, \qquad (10)$$

где f – частота сети, Гц;

G – площадь петли гистерезиса, мм^2.

$$tg\ \delta = 4F/\pi HL. \qquad (11)$$

При вычислении значений P и tg δ необходимо использовать величины m_q и m_U в тех же единицах, что и при вычислении по формуле (6).

3. Собрать схему согласно рис. 7.

Установить переменное напряжение 20 В реостатом R2 и изменять напряжение постоянного тока от нуля до 150 В, как указано в табл. 2.

Определить значения $C_р$ и $\varepsilon_р$. Экспериментальные и расчетные данные свести в табл. 2.

Таблица 2

U, В	L, дел.	H, дел.	$C_р$, Ф	$\varepsilon_р$	E, В/м
0					
50					
100					
150					

Примечание. П. 4 выполняется по заданию преподавателя

4. Определить точку Кюри. Собрать схему согласно рис. 6. Сегнетоконденсатор поместить в ванну с минеральным маслом. Реостатом R1 установить напряжение 20 В. С помощью ручек «Усиление» по горизонтали и вертикали получить на экране изображение петли гистерезиса. Вольтметр V1 подключить к зажимам 5, 6 лабораторного стенда и установить предел измерения напряжения «1В». Включить нагревательную ванну и по термометру определить температуру, соответствующую максимальному напряжению вольтметра V1. Выключить установку.

4. Задание

1. Определить масштабы зарядов и напряжений m_q, m_u.

2. Определить активную мощность, рассеиваемую в сегнетоэлектрике P, и тангенс угла диэлектрических потерь tg δ.

3. Определить значения $\varepsilon_Э$, $C_Э$ при напряжениях U=30-130 В. Результаты измерений и расчетные данные свести в табл. 1.

4. Построить зависимость $\varepsilon_Э=f(E_{XM})$.

5. Измерить и построить зависимость реверсивной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_р$ сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля постоянного тока при неизменном напряжении переменного тока, т.е. $\varepsilon_р=f(E_=)$ при $E=const$. Результаты измерений и расчетные данные свести в табл. 2.

6. Определить точку Кюри.

5. Содержание отчета

1. Принципиальные схемы испытательных установок.

2. Результаты наблюдений и вычислений в виде таблиц, отдельных записей и кривых, а также формул, по которым производились расчеты.

3. Критическая оценка полученных результатов и сопоставление их с литературными данными.

6. Контрольные вопросы

1. Рассказать о физической природе спонтанной поляризации.
2. Объяснить процессы, обусловливающие поляризацию сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле.
3. Дать определение существующим видам диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков и объяснить методы их определения.
4. Объяснить зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от внешних факторов (напряженности поля, температуры, частоты).
5. Назвать основные сегнетоэлектрические материалы и охарактеризовать области их практического применения.
6. Охарактеризовать области практического применения прямого и обратного пьезоэффектов.
7. Чем отличаются нелинейные диэлектрики от линейных?
8. Каковы особенности диэлектрических свойств биологических объектов?
9. Каков принцип работы датчиков температуры на основе сегнетоэлектрических материалов?
10. Почему сегнетоэлектрические конденсаторы обладают высокой удельной емкостью?

Библиографический список

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. С. 262-273.
2. Электрорадиоматериалы / под ред. Б.М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978. С. 208-225.
3. Материаловедение: учеб.пособие/ С.П.Вихров, Т.А.Холомина; под ред. Ю.М.Солдака. Рязань: РГРТУ, 2006. 160 с.
4. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие/ Т.А. Холомина, М.В. Зубков; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. - Рязань, 2015. 48 с.
5. Методические рекомендации по подготовке студентов к текущему и промежуточному контролю освоения компетенций/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост. Т.А.Холомина, Е.Н.Евдокимова. Рязань, 2016. 16 с.

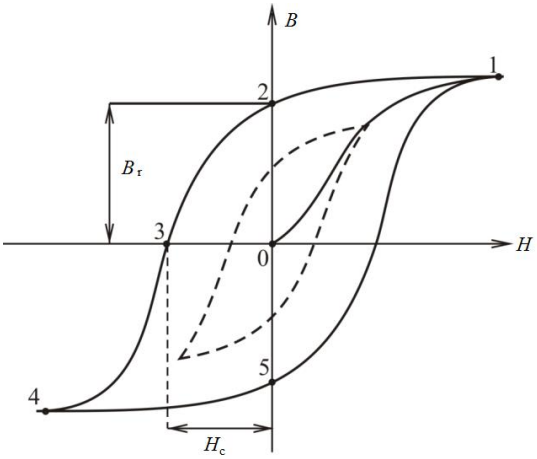
7445

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В.Ф.УТКИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 7



Рязань 2022

УДК 621.382

Исследование свойств магнитных материалов: методические указания к лабораторной работе № 7/ сост.: Т.А. Холомина, М.В. Зубков, В.Г. Литвинов, В.Г. Мишустин / Рязан. гос. радиотехн. ун-т им. В.Ф. Уткина; Рязань, 2022. 20 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов перемагничивания ферромагнетиков и явлениях возникновения потерь энергии в магнитных материалах. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего магнитные характеристики пермаллоя, а также виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины, обучающихся по направлениям 11.03.01, 18.03.01 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 11.05.01, 12.03.01, 11.03.04, 12.03.04, 13.03.02, 24.05.06 дневного отделения.

Табл. 6. Ил. 11. Библиогр.: 4 назв.

Ферромагнетики, парамагнетики, магнитомягкие материалы, магнитные потери

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (зав. кафедрой доктор физ.-мат. наук, доц. В.Г. Литвинов)

Исследование свойств магнитных материалов

Составители: Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
З у б к о в Михаил Владимирович
Л и т в и н о в Владимир Георгиевич
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение свойств ферромагнитных материалов: построение основной кривой магнитной индукции в переменном поле; исследование зависимости магнитной проницаемости от температуры, напряженности и частоты магнитного поля, а также зависимости мощности потерь на вихревые токи и гистерезис от частоты.

1. Краткие теоретические сведения

Все вещества в природе являются магнетиками, т.е. обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств атомов, молекул и их групп.

Магнитные свойства атома в основном определяются магнитными свойствами электронов. Магнитный момент атомного ядра приблизительно в тысячу раз меньше магнитного момента электронной оболочки атома. Магнитный момент электрона возникает вследствие движения электрона по орбите (орбитальный момент) и наличия у него спина (спиновый момент). Магнитный момент многоэлектронного атома представляет собой сумму магнитных моментов всех электронов, включая как орбитальные моменты, так и спиновые.

В соответствии с современными представлениями о магнетизме различают следующие основные типы магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм (нескомпенсированный антиферромагнетизм). Вещества, в которых проявляются эти явления, называются слабомагнитными *(диамагнетики, парамагнетики, антиферромагнетики)* либо сильномагнитными (*ферромагнетики и ферримагнетики).* Схематическое расположение моментов электронов атомов для разных по магнитным свойствам веществ иллюстрируется рис. 1.

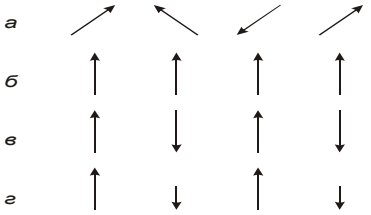


Рис. 1. Схематическое расположение спинов в парамагнитных (*а*), ферромагнитных (*б*), антиферромагнитных (*в*) и ферримагнитных (*г*) веществах. Диамагнетикам свойственна полная взаимная компенсация магнитных моментов атомов.

Основными магнитными параметрами вещества являются: намагниченность M, А/м; $M = \kappa\vec{H}$, где κ – магнитная восприимчивость; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м. Магнитная индукция B, Тл (тесла), характеризует суммарное магнитное поле внутри материала:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1+\kappa)\vec{H} = \mu_0\mu\vec{H} = \mu_a\vec{H}\,, \qquad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, численно равная $4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м, характеризующая магнитную проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума (величина безразмерная); $\mu_a = \mu_0\mu$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Отдельные классы магнетиков различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости, а также по характеру зависимости магнитных характеристик от температуры и напряженности магнитного поля.

Диамагнетиками называют вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов.

Физическая природа диамагнетизма основана на классическом представлении об атоме как системе электронов, движущихся вокруг ядра по определенным замкнутым траекториям-орбитам с некоторой угловой скоростью.

Атомная магнитная восприимчивость κ диамагнетиков имеет порядок $\kappa \approx -(10^{-6} - 10^{-5})$, т.е. соответствует величине, измеряемой экспериментально, и не зависит от температуры. Магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu \approx 0{,}99999$ и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Диамагнетизм является результатом прецессии всех электронов атомов и молекул, поэтому присущ всем веществам, но проявляется только в том случае, если не перекрывается более сильными пара- и ферромагнетизмом.

К диамагнитным веществам относятся водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Cu, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Mg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Парамагнетиками называются вещества, атомы которых обладают небольшими магнитными моментами обычно за счет нечетного количества валентных электронов. Поскольку все заполненные электронные оболочки имеют нулевой полный момент

количества движения, они обладают также нулевым полным магнитным моментом.

При обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты атомов располагаются статистически равновероятно относительно любого направления и суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием сильного внешнего магнитного поля и (или) низкой температуры создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, т.е. тело оказывается намагниченным, однако при обычных полях и температурах намагниченность парамагнетиков очень мала. Магнитная восприимчивость их положительна и имеет значение $\kappa \sim (10^{-5} - 10^{-2})$, относительная магнитная проницаемость $\mu \approx \approx 1{,}001$.

На рис. 2, а показана зависимость намагниченности *M(H)* для диа- и парамагнетиков при слабых полях и при обычных или высоких температурах. В обоих случаях значение *M* пропорционально *H*, что свидетельствует о независимости κ от *H*. Для намагничивания парамагнетиков до насыщения (рис. 2, б), т.е. до состояния, когда все элементарные магнитные моменты будут параллельны внешнему полю, требуется при комнатной температуре поле напряженностью примерно 10^{11} А/м, а при $T = 1$ К - примерно $3 \cdot 10^5$ А/м. Однако в последние годы выяснилось, что в парамагнетиках можно создать высокую намагниченность, не прибегая к сильным магнитным полям, а используя поток квантов света (оптическую накачку).

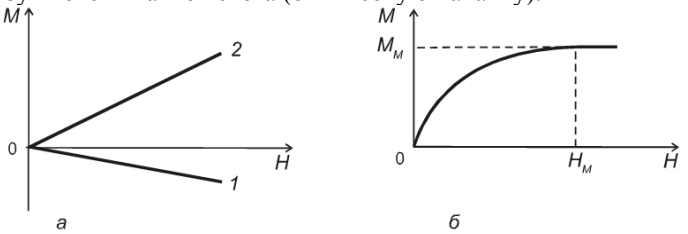


Рис. 2. Зависимость намагниченности *M* от напряженности магнитного поля *H*: *а* - для диамагнетиков *(1)* и парамагнетиков *(2)*; *б*- для парамагнетиков при низких температурах или очень сильных полях

С повышением температуры при неизменной напряженности поля возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул, и поэтому намагниченность убывает. Парамагнетики отличаются тем, что они втягиваются в неоднородное магнитное поле.

К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, Al, Cr, Mo, Mn, Pt, Pb и др.

Парамагнетизм в атомах или ионах не существует в одиночку: одновременно с ним всегда имеют место и диамагнитные свойства. Поскольку оба эти эффекта противоположны друг другу по знаку, суммарные магнитные свойства материала определяются преобладающим. У большинства материалов величина парамагнитной восприимчивости значительно больше диамагнитной, т.е. парамагнетизм обычно преобладает над диамагнетизмом.

Парамагнитные вещества используются в качестве рабочих тел в квантовых парамагнитных усилителях и генераторах.

Антиферромагнетики – это вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, поэтому имеет место их взаимная компенсация. Магнитная восприимчивость антиферромагнетиков мала и составляет $\kappa \approx (10^{-5} - 10^{-3})$. В слабых полях κ и μ практически не зависят от напряженности внешнего магнитного поля, в сильных - являются сложной функцией напряженности поля. В некоторой степени свойства антиферромагнетиков схожи со свойствами парамагнетиков. Пара- и антиферромагнитные вещества объединяют положительная магнитная восприимчивость и компенсация магнитных моментов атомов. Различие заключается в том, что спиновые моменты парамагнетиков ориентированы хаотически, а антиферромагнетиков – параллельно друг другу.

К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, а также Cr и Mn; многие окислы, хлориды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца: MnO, $MnCl_2$, MnF_2, MnS_2 и др., аналогично на основе Fe, Co, Ni, Cr и др.

Ферромагнетиками называют вещества, характеризующиеся намагничиванием недостроенных внутренних оболочек атомов, поскольку магнитные моменты заполненных оболочек равны нулю, а внешние валентные электроны металла обобществлены. Такими элементами являются переходные металлы группы железа, имеющие недостроенную 3*d*-оболочку, и редкоземельные элементы с недостроенной 4*f*-оболочкой. Наличие магнитного момента у атомов обусловлено нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами, поскольку орбитальные магнитные моменты весьма малы.

Для ферромагнетиков энергетически выгодным в отсутствие внешнего поля является минимальное значение внутренней обменной

энергии, что соответствует параллельному расположению магнитных моментов соседних атомов внутри домена. Домен – это область сильномагнитного материала с суммарным магнитным моментом, складывающимся из элементарных параллельных магнитных моментов соседних атомов. Каждый домен состоит из миллионов элементарных ячеек с одинаковым направлением вектора, которые создают собственный магнитный момент домена. При этом магнитное поле вне кристалла уменьшается, в связи с чем энергия разделенного на домены монокристалла меньше, чем энергия однодоменного кристалла, что соответствует более устойчивому состоянию вещества с минимумом внутренней энергии. Суммарный магнитный момент всех доменных областей без приложения внешнего поля к ферромагнетику равен нулю. При внесении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно наблюдаются процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема).

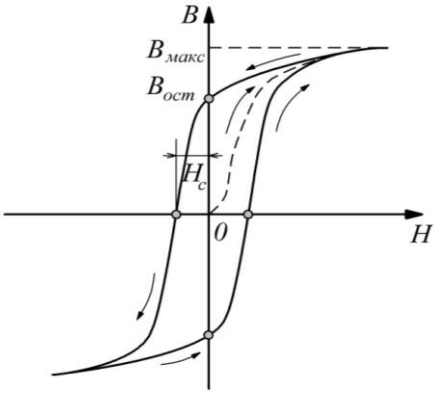


Рис. 3. Зависимость индукции от напряженности магнитного поля ферромагнетиков петля гистерезиса), (H_c - коэрцитивная сила; $B_{ост}$- остаточная индукция)

В слабом поле происходит увеличение объема доменов, у которых магнитный момент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При отключении слабого магнитного поля положение границ доменов восстанавливается, т.е. процесс носит обратимый характер. При усилении поля изменения структуры доменов более значительны, и при отключении внешнего поля положение границ доменов не восстанавливается. Образуется остаточная индукция. При дальнейшем увеличении напряженности поля происходит изменение направления магнитного момента доменов от соответствующего оси легкого намагничивания к направлению, совпадающему с направлением внешнего поля. При этом магнитное состояние материала достигает

технического насыщения. Поведение кривой *B(H)* при циклическом изменении внешнего магнитного поля имеет характерный вид, называемый петлей магнитного гистерезиса, как показано на рис. 3.

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется, его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 4. Сплошная кривая, проходящая по вершинам частных петель гистерезиса, называется нормальной (или основной) кривой индукции.

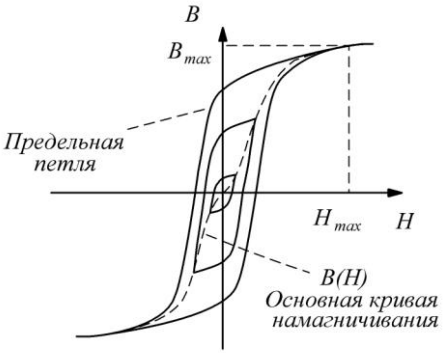


Рис. 4. Предельная петля гистерезиса и основная кривая намагничивания

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы поворота магнитных моментов некоторых доменов и задержка роста зародышей перемагничивания. Под ними понимают небольшие объемы вещества с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Основными параметрами петли гистерезиса являются индукция насыщения B_S (B_{max}), остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_C и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания (рис. 3). Остаточной называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после отключения внешнего поля. Коэрцитивная сила – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике.

По величине коэрцитивной силы различают магнитомягкие материалы с $H_C<100$ А/м и магнитотвердые с $H_C>10^4$ А/м.

Магнитную проницаемость вещества разделяют на абсолютную

$$\mu_a = \frac{B}{H} \qquad (2)$$

и относительную (в дальнейшем слово “относительная” будем опускать)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \qquad (3)$$

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

На рис. 5 представлена зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от напряженности магнитного поля, построенная на основе результатов измерения основной кривой намагничивания материала и соотношения (3). При увеличении напряженности магнитного поля магнитная проницаемость растет, затем при достижении состояния насыщения (максимально возможного значения индукции) снижается вследствие того, что индукция магнитного поля [числитель в соотношении (3)] остается практически неизменной, а напряженность поля (знаменатель) продолжает расти. При подстановке в соотношение (3) конкретных значений B и H получают различные виды магнитной проницаемости, которые применяют в технике (свыше нескольких десятков). Начальная магнитная проницаемость характеризует возможность использования ферромагнетика в слабых магнитных полях.

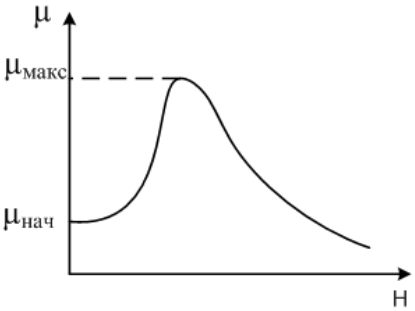


Рис. 5. Зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от напряженности магнитного поля

Максимальная магнитная проницаемость определяет соответствующее значение индуктивности катушки при использовании материала в качестве сердечника. Так, например, типичное значение магнитной проницаемости для листовой электротехнической стали $\mu_{нач}$=250 - 1000, а $\mu_{макс}$= 500 – 30000. Максимальная магнитная проницаемость, например, магнитомягкого сплава супермаллоя (79 % никеля, 5 % молибдена и 16 % железа)

может достигать 10^5.

Магнитная проницаемость сильномагнитных веществ зависит также от температуры и частоты магнитного поля [1,2].

Практический интерес представляет температурная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика. Характер этой зависимости оказывается неодинаковым для магнитной проницаемости, измеренной в слабых и сильных полях (рис. 6). Для начальной магнитной проницаемости наблюдается отчетливый максимум при температуре несколько ниже точки Кюри. Возрастание μ при повышении температуры обусловлено главным образом тем, что при нагревании ферромагнетика ослабляются силы, препятствующие смещению доменных границ и ориентации магнитных моментов доменов. Резкий спад магнитной проницаемости при температурах $T>T_к$ связан с резким уменьшением спонтанной намагниченности доменов вследствие перехода ферромагнетика в парамагнитное состояние (рис. 1, а).

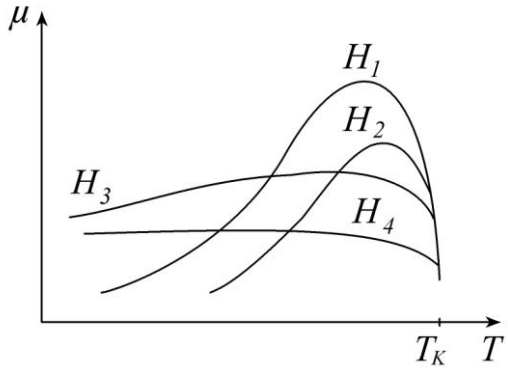


Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от температуры при разной напряженности магнитного поля: $H_1>H_2>H_3>H_4$

Снижение магнитной проницаемости с ростом частоты (рис. 7) связывают с инерционностью процессов смещения доменных границ и увеличением мощности магнитных потерь [соотношения (4,5)] [1]. Видим, что с ростом начальной магнитной проницаемости снижается частота «спада» *f*, т.е. проявления инерционности процессов перемагничивания.

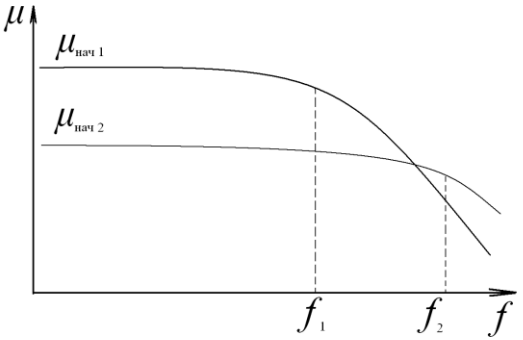


Рис. 7. Зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от частоты

Ферримагнетиками (или нескомпенсированными антиферромагнетиками) называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, однако величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой.

К ферримагнетикам относятся ферриты, представляющие собой магнитную керамику, состоящую из смеси окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов. Структурная формула ферритов $MeO{\cdot}Fe_2O_3$, где Me – двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg и др.). Многие свойства ферримагнетиков качественно аналогичны свойствам ферромагнетиков, однако имеются и существенные различия. Например, ферримагнетики (ферриты) отличаются от ферромагнетиков меньшей величиной индукции насыщения и имеют более сложную температурную зависимость основных магнитных параметров.

Преимущества ферритов при работе в ВЧ- и СВЧ-диапазонах обусловлены тем, что их удельное электрическое сопротивление в 10^6 - 10^{11} раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, так как они являются оксидными материалами, а не металлами. По значению удельного электрического сопротивления ρ они относятся к классу полупроводников или диэлектриков. Вследствие этого вихревые токи (и соответствующая мощность магнитных потерь) [соотношение (5)] в ферритах очень малы, и они применяются в качестве магнитного материала при частотах до сотен

мегагерц, тогда как металлические магнитные материалы применяются при частотах до нескольких десятков мегагерц.

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость ферримагнетиков ниже, чем у ферромагнетиков, и достигают значений нескольких десятков тысяч.

При перемагничивании сильномагнитных материалов в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые ***потери энергии***. Они складываются из потерь на гистерезис и динамических потерь. В свою очередь, динамические потери включают в себя потери на вихревые токи и магнитное последействие. Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_{г} = \frac{f \oint HdB}{D}, \qquad (4)$$

где f – частота тока; D – плотность материала; $\oint HdB$ - площадь петли гистерезиса. Для снижения потерь на гистерезис применяют магнитомягкие материалы, для которых характерна узкая петля магнитного гистерезиса.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_{\text{в.т.}} = \frac{f^2 B_{\text{макс}}^2 d^2 \eta}{D\rho}, \qquad (5)$$

где η – коэффициент формы; d – толщина материала; $B_{макс}$ – максимальная индукция, достигаемая в начале цикла; ρ – удельное сопротивление материала. Следует подчеркнуть, что мощность потерь на гистерезис (перемагничивание) увеличивается пропорционально частоте, а на вихревые токи – пропорционально квадрату частоты электромагнитного поля.

В цепях переменного тока рассеяние мощности в катушках индуктивности иногда оценивают тангенсом угла магнитных потерь

$$\operatorname{tg}\delta_M = \frac{r}{\omega L}, \qquad (6)$$

где L – индуктивность катушки; r – сопротивление, эквивалентное всем видам потерь мощности в магнитном материале.

Частотный диапазон применения магнитных материалов в значительной степени определяется величиной их удельного сопротивления и значением магнитной проницаемости. Для сердечников катушек индуктивности и трансформаторов применяют металлические магнитомягкие материалы (железо, пермаллой). На высоких и сверхвысоких частотах применяют ферриты и

магнитодиэлектрики, обладающие высоким удельным сопротивлением и малым значением коэрцитивной силы. Для изготовления постоянных магнитов, устройств длительного хранения звука, изображения используют магнитотвердые материалы.

2. Описание методики измерений

В лабораторной работе предусмотрено два варианта выполнения. В первом случае это реальная лабораторная установка с образцом магнитного материала – сплавом пермаллой. С помощью осциллографического метода исследуются магнитные характеристики пермаллоя – основная кривая намагничивания, зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля и частоты, а также частотная зависимость мощности магнитных потерь. Во втором случае лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения магнитных свойств вещества на виртуальном стенде. Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В программу заложены модели характеристик ряда магнитных материалов и их зависимости от параметров внешнего магнитного поля.

2.1. Выполнение лабораторной работы с помощью осциллографического метода

Изучение ферромагнитных материалов производится с помощью установки, принципиальная схема которой приведена на рис. 8.



Рис. 8. Принципиальная схема установки для измерения параметров магнитных материалов в переменных магнитных полях

Здесь М – иссследуемый образец из ферромагнитного материала (пермаллой); R_0 - образцовое сопротивление, R_0=30 Ом; r - сопротивление фазовращателя, r =220000 Ом; С – конденсатор фазовращателя, С = 10^{-6} Ф; 2, 3 и 3, 4 – горизонтальный и

вертикальный входы осциллографа соответственно, 1 – вход сигнала с генератора .

Отклонение луча осциллографа по горизонтали пропорционально падению напряжения на R_0 (рис. 8), которое, в свою очередь, пропорционально величине намагничивающего тока.

Так как отклонение луча по горизонтали пропорционально приложенному напряжению, величину отклонения можно выразить в единицах измерения напряженности поля H. Масштаб по горизонтали определяется по формуле

$$h = \frac{\sqrt{2}U_0 n_1}{\pi r_{ср} R_0 x_0}, \qquad (7)$$

где x_0 – расстояние по горизонтали между вершинами гистерезисного цикла, м; U_0 – падение напряжения на R_0; n_1– число витков первичной обмотки испытуемого образца; $r_{ср}$ – средний радиус тороида, м.

Магнитная индукция B пропорциональна выходному напряжению $U_{вых}$, измеренному между точками 3 и 4 вертикального входа усилителя осциллографа. Можно проградуировать отклонение луча по вертикали в единицах измерения магнитной индукции.

Масштаб по вертикальной оси экрана осциллографа

$$b = \frac{2\sqrt{2}U_{вых} r \cdot C}{n_2 S \cdot y_0}, \qquad (8)$$

где y_0 - расстояние между вершинами гистерезисного цикла по вертикали, м.

Данные испытываемого образца:

$r_{ср} = 1{,}9 \cdot 10^{-2}$ м – средний радиус образца;

$D = 8{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3 – плотность материала образца (пермаллой);

$n_1 = 1200$ – число витков первичной обмотки;

$n_2 = 800$ – число витков вторичной обмотки;

$S = 0{,}42 \cdot 10^{-4}$ м^2 – площадь сечения.

Описание методики измерений

Установить регулятор выходного напряжения генератора на нуль.

Выключить внутреннюю нагрузку генератора, а выходное сопротивление поставить на 6000 Ом. Установить частоту 50 Гц. Включить генератор и осциллограф. Рукояткой регулятора выходного напряжения генератора повысить напряжение и довести образец до насыщения, когда с ростом напряженности магнитного поля не наблюдается значительного увеличения магнитной индукции. Регулировкой усиления по горизонтали и вертикали на осциллографе

установить гистерезисную кривую так, чтобы размеры x и y между вершинами гистерезисной петли по горизонтали и вертикали были целочисленными в масштабной сетке используемого осциллографа, а сама петля гистерезиса занимала максимальную площадь на экране, что повысило бы точность измерений. При использовании осциллографа С1 – 64А размер петли – 8 на 8 клеток . В дальнейшем положение ручек усиления изменять нельзя до окончания всех измерений.

Градуировка осей осциллографа

Отключить осциллограф и генератор от схемы. Включить внутреннюю нагрузку генератора, выходное сопротивление поставить на 600 Ом. Соединить выход генератора с горизонтальным входом осциллографа. Рукояткой регулятора выходное напряжение генератора повысить так, чтобы максимальное отклонение луча соответствовало расстоянию между вершинами гистерезисной петли по горизонтали, полученной в режиме насыщения. Отметить напряжение по вольтметру генератора. Это напряжение равно U_0 в формуле (7).

Градуировку вертикальной оси произвести аналогичным образом с тем отличием, что напряжение с генератора подается на вертикальный вход осциллографа. Изменяя напряжение на выходе генератора, необходимо добиться отклонения луча по вертикали на экране осциллографа, соответствующего расстоянию между вершинами гистерезисной петли в режиме насыщения. Это напряжение $U_{вых}$ подставить в формулу (8) для расчета масштаба по вертикальной оси.

Определение потерь в образце ферромагнитного материала

Восстановить схему и зарисовать гистерезисную петлю на кальку. Удельные потери в образце за один период можно определить по формуле

$$W = \frac{P}{f} = \frac{Shb}{D}, \qquad (9)$$

где: P – потери в образце; S – площадь гистерезисной петли; D – плотность материала образца.

То же самое повторить для частот 100, 200, 300, 400 Гц. При этом с помощью регулятора напряжения генератора поддерживают постоянной напряженность магнитного поля таким образом, чтобы расстояние между вершинами петли гистерезиса по горизонтали оставалось неизменным при изменении частоты и соответствовало 8 на 8 клеток.

Результаты наблюдений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

Материал	*f*, Гц	S, м^2	W, Дж/кг	P, Вт/кг	$P_г$, Вт/кг	$P_{в.т}$, Вт/кг

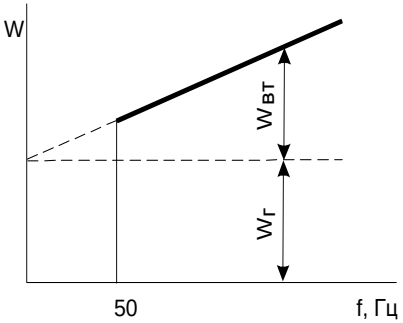


Рис. 9. Графический способ разделения удельных магнитных потерь на составляющие:
$W_{вт}$- удельные потери на вихревые токи;
$W_г$- удельные потери на гистерезис

По данным таблицы построить зависимость *W(f)*. Известно, что величина мощности потерь на гистерезис в ферромагнитном материале $P_г \sim f$, а на вихревые токи $P_{вт} \sim f^2$. Поэтому та часть ***удельных*** потерь, которая от частоты не зависит, характеризует потери на гистерезис, а часть ***удельных*** потерь, которая пропорциональна частоте, характеризует потери на вихревые токи (рис. 9). Построив по экспериментальным данным зависимость W от частоты, можно разделить удельные потери на $W_г$ и $W_{вт}$, после чего определить потери на гистерезис и вихревые токи при различных частотах

$$P_г = W_г \cdot f; \quad (10)$$

$$P_{вт} = W_{вт} \cdot f. \quad (11)$$

Определение точек основной кривой индукции и магнитной проницаемости

С помощью регулятора выходного напряжения генератора постепенно увеличить напряженность магнитного поля от нуля до максимального значения. При этом необходимо выбрать не менее пяти значений напряженности магнитного поля, т.е. фиксировать значения x (расстояния по горизонтали между вершинами

гистерезисного цикла), и точно измерять у (расстояние по вертикали). Определить

H = hx и B = by.

Повторяют измерения для частот 100, 200, 300, 400 Гц. Измерения при фиксированных значениях H позволяют получить частотные зависимости B и μ.

Относительную магнитную проницаемость определяют по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \frac{by}{\mu_0 \cdot hx} = a \cdot \frac{y}{x}, \qquad (12)$$

где $a = \frac{b}{\mu_0 \cdot h}$ - постоянная, равная отношению масштабов по вертикали и горизонтали с учетом магнитной постоянной μ_0. Экспериментальные и расчетные данные заносят в табл. 2.

Таблица 2

Материал	*f*, Гц	x, м	y, м	H, А/м	B, Тл	μ

Задание для выполнения лабораторной работы с помощью осциллографического метода

1. Произвести градуировку осей осциллографа.
2. Определить потери в образце пермаллоя при частотах 50, 100, 200, 300, 400 Гц.
3. Измерить и построить основную кривую индукции на частотах 50, 100, 200, 300, 400 Гц.
4. Рассчитав значение магнитной проницаемости, построить зависимости B(f) и μ(f) при фиксированном значении напряженности магнитного поля.
5. Определить начальную и максимальную магнитные проницаемости и значение коэрцитивной силы ферромагнетика.

2.2. Выполнение лабораторной работы на персональном компьютере

Измерение параметров магнитных материалов осуществляется по внешнему виду петли гистерезиса – зависимости индукции магнитного поля (B, Тл) от величины его напряженности (H, А/м).

Для начала работы необходимо запустить файл «магнитные материалы» на рабочем столе ПК. После запуска файла появится окно, изображенное на рис. 10, а.



а б

Рис. 10. Вид окна начала работы (а) и выбора материала (б)

Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопок управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 10, б. Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлено описание и некоторые характеристики выбранного магнитного материала. После щелчка по кнопке «К измерениям» программа переключается на режим измерения параметров магнитного материала по параметрам петли гистерезиса. На экране отображается окно специализированного измерительного стенда, как показано на рис. 11.

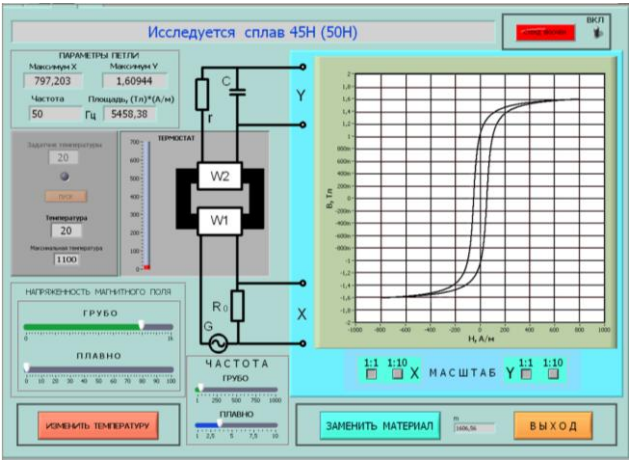


Рис. 11. Окно измерительного стенда

3. Проведение измерений

В окне измерительного стенда отображаются осциллограф, измерительная камера с образцом магнитного материала и элементы управления стендом. Здесь же отображается схема подключения исследуемого образца материала и основные параметры петли гистерезиса.

Необходимо включить стенд щелчком по тумблеру «Вкл». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 ^{0}C.

Измерение параметров сильномагнитного материала необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя движок на шкале грубого и плавного изменения частоты (обычно шаг плавного изменения составляет 1 Гц).

2. Изменяя напряженность магнитного поля движками «Грубо» и «Плавно», получить на графопостроителе нужный вид петли гистерезиса. В левом верхнем углу при этом отображаются координаты максимальных значений частной петли, ее площадь и частота изменения внешнего магнитного поля. Для изменения масштаба отображения петли гистерезиса можно использовать соответствующие кнопки на графопостроителе.

3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру», в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и продолжить измерения.

4. Изменяя значение напряженности внешнего магнитного поля, вновь произвести соответствующие измерения параметров петли гистерезиса. При необходимости изменить частоту и температуру в соответствии с пп. 1 и 3 данного раздела.

5. При необходимости выбрать другой магнитный материал используют кнопку «Заменить материал».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного магнитного материала в указанном диапазоне температур и частот.

2. Построить начальную кривую намагниченности на заданной частоте при температуре 20 ^{0}C. Для этого установить нужную частоту внешнего магнитного поля и, постепенно увеличивая его напряженность, занести значение координат B и H в табл. 3, которая приведена далее. По координатам конечных точек петли гистерезиса

рассчитать относительную магнитную проницаемость μ.

Таблица 3

H, А/м				
B, Тл				
μ				

3. Построить график зависимости B = *f*(H). Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости от величины напряженности магнитного поля, используя соотношение $\mu = B/(\mu_0 H)$. Используя кнопки изменения масштаба на графопостроителе, определить значение коэрцитивной силы H_C для исследуемого материала при максимальном значении напряженности магнитного поля.

4. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от частоты внешнего магнитного поля. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменяя частоту и поддерживая постоянное значение B изменением H, занести данные в табл. 4.

Таблица 4

f, Гц				
H, А/м				
B, Тл				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости от частоты.

5. Исследовать зависимость потерь в материале от частоты магнитного поля. Для этого установить и поддерживать постоянным при изменении частоты значение индукции магнитного поля по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменить частоту и занести полученные значения площади гистерезисной кривой в табл. 5.

Таблица 5

f, Гц				
S, (Тл·А/м)				

6. Рассчитать удельные потери в образце и построить график зависимости удельных потерь в материале от частоты. Удельные

потери (Вт/кг) определяют делением площади петли гистерезиса на плотность вещества с учетом значения частоты изменения магнитного поля.

7. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от температуры на заданной частоте. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца) и поддерживать ее неизменной. Изменять температуру в соответствии с п. 3 раздела 3 методического указания и занести полученные значения координат B и H в табл. 6.

Таблица 6

T, ^{0}C				
H, А/м				
B, Тл				
μ				

8. Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости μ ферромагнитного материала от температуры.

5. Содержание отчета

1. Номер работы и ее название.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения, включающие основные понятия, расчетные соотношения и схему измерения.
4. Результаты измерений и вычислений в виде таблиц и графиков.
5. Сравнение полученных результатов с данными литературы и их критическая оценка.

6. Контрольные вопросы

1. Расскажите о физической природе ферромагнетизма.
2. Назовите основные характеристики ферромагнитных материалов, объясните методы их определения.
3. Какие процессы наблюдаются в материале в различных точках основной кривой намагниченности ферромагнетика?
4. Расскажите об использовании в вычислительной и электронной технике магнитомягких, магнитотвердых материалов. Приведите примеры.
5. Как получают ферриты? Каковы их основные свойства, достоинства и недостатки, области применения?

6. Какими свойствами сильномагнитных материалов определяется возможный частотный диапазон их применения?

7. Дайте определение критической, граничной частоты феррита.

8. Расскажите о потерях в магнитных материалах. От каких факторов они зависят?

9. Расскажите о практических мерах, используемых для снижения потерь на гистерезис и вихревые токи в сильномагнитных материалах.

10. Каковы свойства и области применения тонких ферромагнитных пленок?

11. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от напряженности магнитного поля и объясните физическую природу.

12. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от частоты магнитного поля и объясните физическую природу.

13. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от температуры и объясните физическую природу.

14. Приведите примеры маркировки магнитомягких и магнитотвердых материалов.

15. Расскажите об основных видах магнитной проницаемости.

16. Поясните физический смысл температурного коэффициента магнитной проницаемости.

17. Расскажите о применении в электронной технике магнитострикционных материалов.

18. Расскажите о применении в электронной технике термомагнитных материалов и материалов с прямоугольной петлей гистерезиса.

Библиографический список

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. С. 296-344.

2. Электрорадиоматериалы /под ред. проф. Б.М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978. С. 273–324.

3. Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2015. 48 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Материаловедение / под ред. Ю.М. Солдака: учеб.пособие. Рязань: РГРТУ, 2006. 160 с.

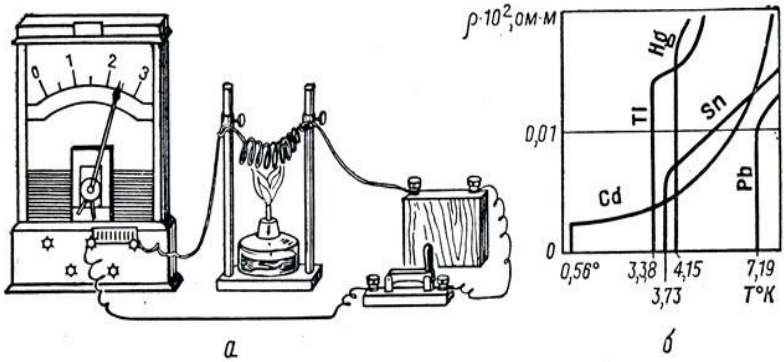
7447

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Ф.УТКИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 20



Рязань 2022

УДК 621.382

Исследование зависимости удельного сопротивления металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов: методические указания к лабораторной работе № 20; сост.: С.И. Мальченко, Т.А.Холомина, В.Г. Мишустин / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2022. 12 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях влияния температуры и концентрации компонентов на величину удельного сопротивления металлических сплавов, а также методика выполнения лабораторной работы при помощи виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины, обучающихся по направлениям 11.03.01, 18.03.01 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 11.05.01, 12.03.01, 11.03.04, 12.03.04, 13.03.02, 24.05.06 дневного отделения.

Табл. 1. Ил. 5. Библиогр.: 5 назв.

Сплавы, удельное сопротивление, температура, концентрация

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: Региональный центр зондовой микроскопии (коллективного пользования) при кафедре микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (директор центра Н.В.Вишняков)

Исследование зависимости удельного сопротивления
металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич

Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: исследование зависимости удельного сопротивления двухкомпонентных металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Природа электропроводности металлов и сплавов

Классическая электронная теория металлов представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из коллективизированных свободных валентных электронов. К электронному газу применялись представления и законы обычных газов. Это привело к выводу законов Ома и Джоуля - Ленца, позволило описать и объяснить ранее обнаруженные экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах.

Однако исчерпывающее объяснение явлений электропроводности оказалось возможным на основе квантовой механики. В соответствии с квантово-механическими представлениями причиной наличия электрического сопротивления твердых тел является не столкновение свободных электронов с атомами решетки (как в классической теории Друде), а рассеяние их на дефектах решетки, вызывающих нарушение периодичности потенциала. Идеально правильная, бездефектная неподвижная решетка не способна рассеивать свободные носители заряда и поэтому должна обладать нулевым сопротивлением.

Подвижность и длина свободного пробега электронов в твердом теле зависят от структуры материала. Чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления ρ. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ. С позиций квантовой механики рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона. Нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн де Бройля. В металлическом проводнике, где длина волны электрона порядка 5Å, микродефекты создают значительное рассеяние. Это уменьшает подвижность и длину свободного пробега электронов и, следовательно, приводят к росту ρ. Так как в металлах концентрация электронного газа практически не зависит от температуры (T), то зависимость удельного сопротивления ρ (и обратной величины удельной электропроводности σ) от температуры полностью определяется температурной зависимостью подвижности (μ) и пропорциональной ей длины свободного пробега электронов (λ).

Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшается среднестатистическая длина свободного пробега λ, уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 1).

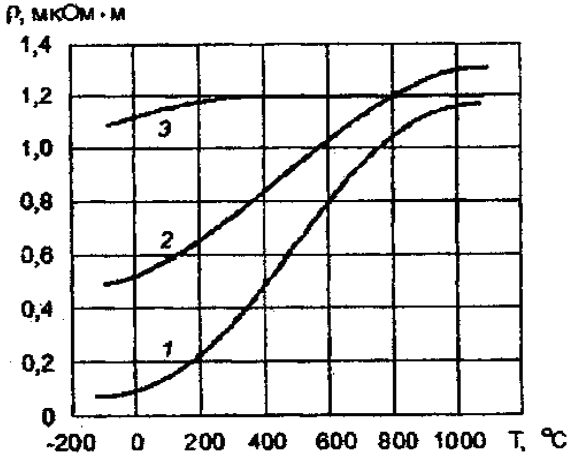


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры: 1 - железо; 2 - электротехническая сталь с содержанием 4 % Si; 3 - сплав Fe-Ni-Cr

1.2. Удельное сопротивление металлов и сплавов

Связь плотности тока J, А/м² и напряженности E, В/м электрического поля в проводнике описывается формулой

$$J = \gamma \cdot E - \qquad (1)$$

дифференциальная форма закона Ома; где γ, См/м – параметр проводникового материала, называемый его *удельной проводимостью.*

В соответствии с законом Ома в области слабых полей γ не зависит от напряженности электрического поля E при изменении последней в весьма широких пределах.

Величина

$$\rho = \frac{1}{\gamma}, \qquad (2)$$

обратная удельной проводимости и называемая *удельным сопро-*

тивлением, для имеющего сопротивление R проводника длиной l с постоянным поперечным сечением S вычисляется по формуле

$$\rho = R\frac{S}{l}\cdot \qquad (3)$$

Диапазон значений удельного сопротивления ρ металлических проводников (при нормальной температуре) довольно узок: от 0,016 Ом·мм²/м для серебра и до примерно 10 Ом·мм²/м для железохромоалюминиевых сплавов, т. е. он занимает всего три порядка [1]. Ниже в таблице приведены значения удельного сопротивления различных металлов, расположенных в алфавитном порядке.

Величину удельного сопротивления металлического проводника на основании электронной теории металлов можно определить следующим образом

$$\rho = \frac{2\cdot m\cdot \upsilon_T}{e^2\cdot n\cdot l_{\text{ср}}}\ , \qquad (4)$$

где m – масса электрона, υ_T - средняя скорость теплового движения электрона внутри металлического проводника, $l_{\text{ср}}$ - средняя длина свободного пробега электрона.

В результате преобразования выражения для удельного сопротивления на основе выводов квантовой волновой механики получают соотношение

$$\rho = \frac{h}{K\cdot e^2\cdot n^{\frac{2}{3}}\cdot l_{\text{ср}}}, \qquad (5)$$

где h - постоянная Планка, К – числовой коэффициент.

Значения удельных сопротивлений проводников

Материал проводника	Удельное сопротивление ρ, $\frac{\text{ом}\times\text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,015
Медь	0,0175
Золото	0,023
Алюминий	0,028
Натрий	0,047
Вольфрам	0,05
Железо	0,13
Свинец	0,2
Никелин (сплав меди, никеля и цинка)	0.42

Для различных проводников скорости хаотического движения примерно одинаковы. Незначительно отличаются также и концентрации свободных электронов, так, например, для меди и никеля разница составляет менее 10 %. Поэтому величина удельного сопротивления в основном зависит от средней длины свободного пробега электрона в данном проводнике, которая в свою очередь зависит от строения проводника, его структуры.

Чистые металлы с совершенной кристаллической решеткой характеризуются наименьшим удельным сопротивлением; примеси, искажая решетку, приводят к его увеличению.

К такому же выводу можно прийти, имея в виду волновую природу электронов. Рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона. В металлическом проводнике, где длина волны электрона около 5Å, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов, а следовательно, приводят к росту удельного сопротивления материала.

Число свободных носителей заряда (концентрация электронов) с увеличением температуры в металлическом проводнике остается неизменным. Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения электронов, т. е. уменьшается длина свободного пробега и подвижность электронов понижается. Поэтому удельное сопротивление металлов с повышением температуры окружающей среды повышается (рис. 2). Скачки удельного сопротивления объясняются изменением агрегатного состояния вещества при изменении температуры.

Изменение зависимости удельного сопротивления от температуры, приведенное на рис. 2, для различных металлов и в разных температурных областях неодинаково. В узкой области 1, составляющей несколько градусов, у ряда металлов может наступить состояние сверхпроводимости и на рисунке виден скачок удельного сопротивления при температуре $T_{СВ}$. У теоретически совершенно чистых металлов удельное сопротивление должно бы стремиться к 0 (пунктирная кривая), а у технически чистых металлов, не обладающих сверхпроводимостью, оно должно определяться только рассеянием носителей заряда на примесях, и так как $\rho_{чист} << \rho_{прим}$, то $\rho \cong \rho_{прим}$ (верхняя кривая на этом участке). Чем чище металл, тем область 1 меньше как по абсциссе, так и по ординате. Зависимость «остаточного» сопротивления от чистоты металлов очень резкая и ее можно использовать для определения наличия примесей в металле, например, по отношению

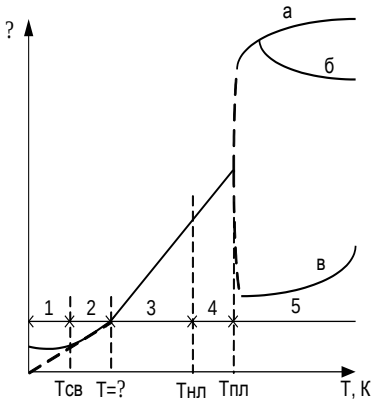


Рис. 2. Теоретическая зависимость удельной электропроводности металлических сплавов от температуры

удельного сопротивления металла при комнатной температуре к его удельному сопротивлению при температуре кипения жидкого гелия (4,2 К). Чем это отношение для одного и того же технического металла больше, тем чище металл.

В пределах области 2 наблюдается быстрый рост удельного сопротивления $\rho \sim T^n$, где n – может быть до 5 и убывает с ростом температуры ~ до 1 при $T = \theta$. В этой области рост удельного сопротивления с ростом температуры определяется включением все новых и новых частот тепловых колебаний (фононов) кристаллической решетки металлов, которое заканчивается при температуре $T = \theta$. Для большинства металлов θ лежит в пределах 100 – 400 К. В области 3 наблюдается практически линейный участок роста удельного сопротивления за счет линейного возрастания с температурой амплитуд колебаний узлов кристаллической решетки.

В области 4, начало которой условно отмечено температурой $T_{НЛ}$, отмечается отступление от линейной зависимости. Для многих металлов этот участок кривой невелик и находится вблизи от температуры плавления ($T_{ПЛ}$) металла. Для некоторых переходных и редкоземельных металлов он может начинаться значительно раньше, чем показано на рисунке, т. е. удельное сопротивление металла как бы приходит к некоторому насыщению. Область 5, начинающаяся с $T_{ПЛ}$, характеризует изменение удельного сопротивления в точке плавления и расплавленного металла.

Примеси и нарушения правильной структуры металлов ведут к

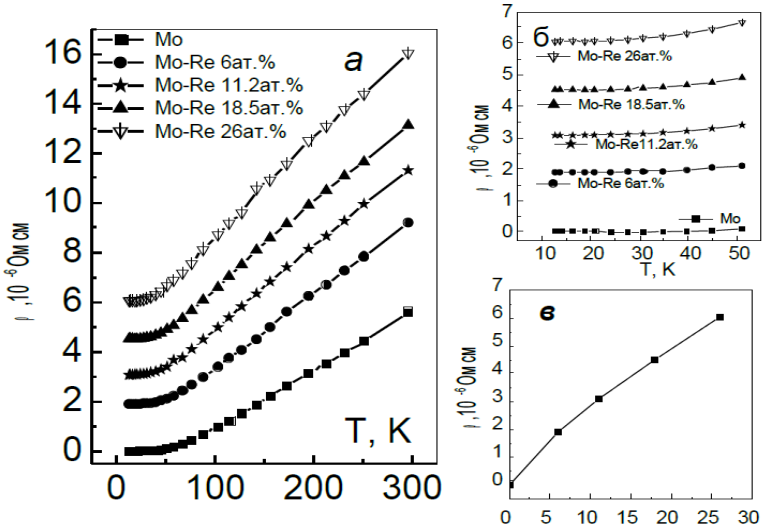


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления сплава молибден-рений от температуры и концентрации компонентов, полученная экспериментально [2]

увеличению их удельного сопротивления. Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют твердый раствор, т.е. создают при отвердевании совместную кристаллизацию и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого. Зависимость удельного сопротивления сплава молибден-рений от температуры и концентрации компонентов, полученная экспериментально, и представлена на рис. 3.

Зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих твердый раствор, от процентного содержания компонентов каждого из них представлена на рис. 4 (кривая а).

Кривая имеет максимум, соответствующий некоторому соотношению содержания компонентов в сплаве; при уменьшении содержания каждого из них ρ падает, приближаясь к соответствующим значениям ρ чистых металлов. Такому изменению соответствует кривая, изображенная на рис. 3 (кривая а).

Обычно наблюдается определенная закономерность и в изменении *ТК*ρ (*ТК* - температурный коэффициент). Относительно высокими значениями *ТК*ρ обладают чистые металлы, а у сплавов *ТК*ρ меньше и даже может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения (рис. 3 , кривая б). Это объясняется тем, что у спла-

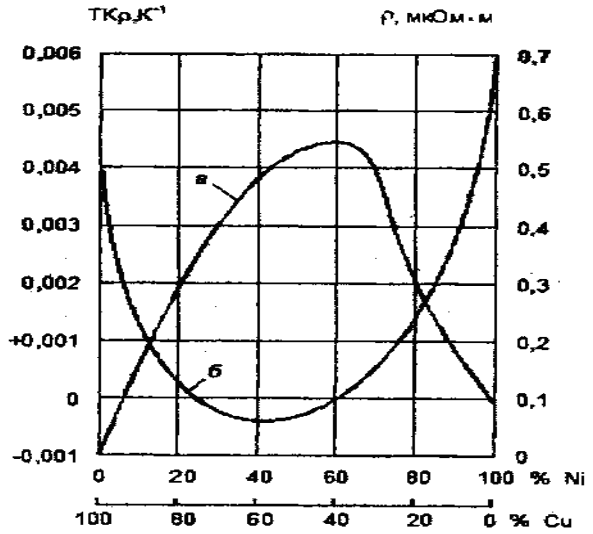


Рис. 4. Зависимость ρ (а) и ТКρ (б) сплавов системы Cu-Ni от состава (в процентах по массе) [1]

вов изменение ρ вызывается не только изменением подвижности носителей заряда, но в некоторых случаях и возрастанием концентрации носителей при повышении температуры.

1.3. Сверхпроводимость

Особое место в теории электропроводности проводников занимает проблема сверхпроводимости. Как уже отмечалось, при понижении температуры удельное сопротивление металлов уменьшается. Большой интерес представляет электропроводность металлов при весьма низких температурах, приближающихся к абсолютному нулю.

В 1911 г. голландский ученый Г. Каммерлинг-Оннес обнаружил, что при охлаждении до температуры 4,2 К сопротивление кольца из замороженной ртути внезапно падает до очень малой, практически не измеряемой величины. Это исчезновение электрического сопротивления, т. е. появление бесконечной удельной проводимости материала, было названо сверхпроводимостью, а критическая температура температурой сверхпроводникового перехода. Переход в сверхпроводящее состояние является обратимым; с повышением температуры выше критической материал приобретает нормальное (не сверхпроводящее) состояние с конечным значением удельной проводимости.

В дальнейшем, помимо ртути, были обнаружены и многие другие материалы, причем не только чистые металлы, но и различные сплавы и химические соединения, способные при охлаждении до достаточно низкой температуры переходить в сверхпроводящее состояние. Такие материалы получили название сверхпроводников. Известно 27 простых сверхпроводников (чистых металлов) и более тысячи сложных (сплавов и соединений)

Явление сверхпроводимости объясняется на основе теории Бардина-Шриффера-Купера, которая предполагает, что при очень низких температурах при помощи частично поляризованных ионов кристаллической решетки образуются связанные между собой пары электронов (куперовские пары). Электроны в парах расположены на расстоянии примерно 1 мкм и характеризуются противоположно направленными спиновыми моментами. Движение пар строго коррелированно и происходит без потерь энергии – сопротивление проводника равно нулю. Электрический ток, однажды наведенный в сверхпроводящем контуре, будет длительно (годами) циркулировать по этому контуру без заметного уменьшения своей силы и притом без всякого подвода энергии извне (если не учитывать неизбежного расхода энергии для работы охлаждающего устройства); этот контур подобно постоянному магниту создает в окружающем пространстве магнитное поле.

Таким образом, обтекаемый электрическим током сверхпроводящий соленоид должен представлять собой «сверхпроводниковый электромагнит», не требующий питания током.

Сверхпроводимость нарушается не только при повышении температуры выше критической, но также и при возникновении на поверхности сверхпроводника магнитного поля со значением магнитной индукции выше некоторого критического значения. В первом приближении безразлично, создается ли индукция током, идущим по самому сверхпроводнику, или сторонним источником магнитного поля.

В 1933 г. немецкие физики В. Майснер и Р. Оксенфельд сделали второе фундаментальное открытие в области сверхпроводимости. Они обнаружили, что при переходе в сверхпроводящее состояние сверхпроводники становятся «идеальными диамагнетиками», т. е. их магнитная проницаемость скачком падает до значения, меньшего единицы. Поэтому внешнее магнитное поле не проникает в сверхпроводящее тело; если же переход тела в сверхпроводящее состояние произошел в магнитном поле, то поле «выталкивается» из сверхпроводника.

Некоторые из твердых сверхпроводников (сплавы и химические соединения) обладают не только сравнительно высокими значениями критической температуры перехода, но и относительно высокими зна-

чениями критической магнитной индукции, что дало возможность применять эти материалы как для производства сверхпроводниковых электромагнитов, создающих сильные магнитные поля, так и для других практических целей.

Помимо сверхпроводниковых электромагнитов, которые производят в большом количестве и применяют для самых разнообразных целей, можно отметить возможности использования сверхпроводников для создания электрических машин, трансформаторов и других устройств малых массы и габаритов и с высоким к. п. д.; кабельных линий для передачи весьма больших мощностей на произвольно большие расстояния; волноводов с особо малым затуханием; накопителей энергии и пр. Ряд устройств памяти и управления основывается на переходе сверхпроводника в сверхпроводящее или нормальное состояние при изменении магнитной индукции (или, соответственно, тока) или температуры.

Часто сверхпроводниковые провода покрывают «стабилизирующей» оболочкой из меди или другого хорошо проводящего электрический ток и тепло металла. Это дает возможность избежать повреждения основного материала сверхпроводника при случайном повышении температуры и нарушении сверхпроводимости в отдельных участках провода. Более того, в ряде случаев с успехом применяют композитные сверхпроводниковые провода, в которых большое число тонких (нитевидных) сверхпроводников заключено в массивную «матрицу» из меди или другого не сверхпроводникового материала.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется на персональном компьютере, на котором специальной программой смоделирована исследовательская установка и сформированы математические модели изменения удельной электропроводности различных сплавов в зависимости от температуры. Предполагается, что исследуется тонкая проволока определенной длины и диаметра из соответствующего сплава помещена в измерительную камеру (в данном случае в виртуальную камеру). В измерительной камере температура изменяется в широких пределах от 10 до 500 К. Через исследуемый образец пропускается стабильный ток от прецизионного генератора тока и милливольтметром измеряется падение напряжения на исследуемом образце. Величина измерительного тока ограничивается джоулевым разогревом исследуемого образца, и для проводника диаметром 0,1 – 0,3 мм ток не должен превышать десятков миллиампер.

Программа запускается двойным щелчком по ярлыку на Рабочем столе с названием «**Уд_сопр_мет**.» Появляется приветственное окно программы и предлагается варианты дальнейших действий. Управление программой происходит по обычным принципам управления, принятым в операционной системой Windows. При желании продолжать выполнение лабораторной работы во вновь появившемся окне следует по указанию преподавателя щелчком левой кнопки мыши по соответствующей закладке выбирать образец для исследования.

Для перехода к измерениям следует использовать кнопку «**К измерениям**». При этом появляется окно с виртуальной установкой (рис. 5) для исследования зависимости удельной электропроводности от температуры. Необходимо щелчком левой кнопки по изображению тумблеров включить все приборы и следовать перечисленным ниже пунктам.

1. Установить на «Цифровом задатчике тока» величину тока для исследования по указанию преподавателя путем ввода в соответствующие окна необходимых значений или использования элементов управления «инкремент – декремент» у соответствующих окон.

2. По указанию преподавателя установить параметры исследуемого образца в соответствующем разделе виртуального стенда. Здесь же можно установить процентный состав исследуемого сплава.

3. Задать необходимую температуру в камере. Для этого щелкнуть



Рис.5. Окно виртуальной установки для исследования

по кнопке «**Изменить температуру**» и в «**Блоке управления температурой в камере**» задать температуру путем прямого ввода данных в окно «**Заданная температура**» или используя элементы управления «**инкремент - декремент**». После этого, используя кнопку «**Пуск**», запустить процесс изменения температуры. Дождаться выхода измерительной камеры на нужную температуру и после этого можно переходить к измерениям.

4. Для проведения измерений достаточно щелкнуть на передней панели милливольтметра по кнопке «**Измерить**» и зафиксировать полученные значения напряжения на образце. После этого необходимо определить сопротивление образца и по его размерам рассчитать удельное сопротивление.

3. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Получить у преподавателя задание на тип исследуемого металлического сплава и диапазон температур для исследования.

2. Запустить файл с программой и выбрать заданный сплав для исследования (раздел 2, п. 1).

3. Перейти в окно виртуальной исследовательской установки, включить все приборы и с учетом рекомендаций раздела 2, п. 1 приступить к выполнению работы.

4. Установить необходимые значения размеров исследуемого образца, процентное содержание компонентов в сплаве, величину тока, температуру в измерительной камере (раздел 2, п.3) и щелкнуть по кнопке «**Измерить**». В процессе измерения необходимо выбирать оптимальный диапазон шкалы прибора.

5. Рассчитать удельное сопротивление образца и занести его значение в таблицу с указанием температуры образца и концентрации компонентов.

6. Построить графическую зависимость удельного сопротивления исследованных образцов от температуры.

7. Построить графическую зависимость удельного сопротивления исследованных образцов от процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре.

8. Оформить полученные результаты в виде таблиц и графиков.

4. Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные

соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).
4. Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
5. Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными [5].

5. Контрольные вопросы

1. Каковы основные отличия проводниковых материалов от непроводниковых?
2. Какие структура и тип химической связи наиболее характерны для металлов и сплавов?
3. Объясните используемую методику измерения зависимости удельного сопротивления проводниковых материалов от температуры и процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре.
4. Объясните физическую природу зависимости удельного сопротивления проводниковых материалов от температуры и процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре.
5. Каковы физическая природа, основные свойства и применение сверхпроводников?
6. Обоснуйте правильность (ошибочность) полученных экспериментальных результатов.
7. Расскажите о применении проводниковых материалов (металлов и сплавов) в приборостроении, радиоэлектронике, медицине.

Библиографический список

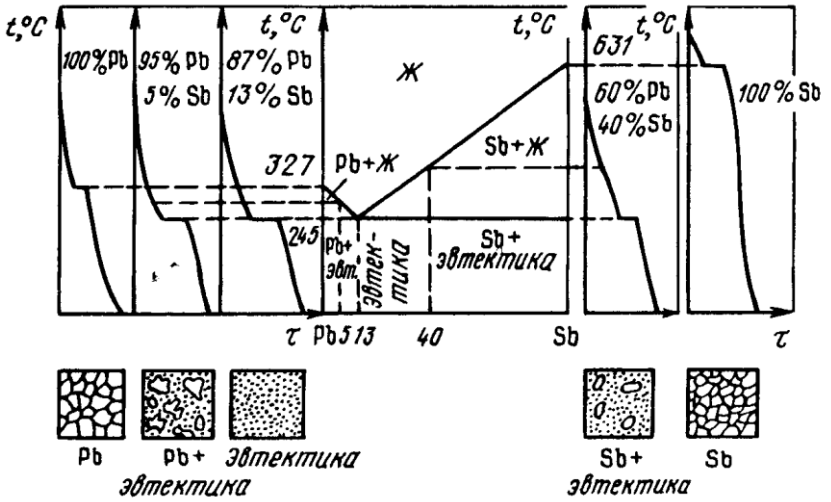
1. Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006.- 383 с.
2. Игнатьева Т.А., Великодный А.Н., Саньков А.А. О температурной зависимости удельного сопротивления сплавов Mo-Re, Mo-Re-Nb// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. - 2004. (14), № 6.- С. 89-92.
3. Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение металлов и сплавов: учеб. пособие. – Рязань: РГРТУ, 2014. – 84 с.
4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб. пособие. – Рязань: РГРТУ, 2013. – 96 с.
5. Справочник по электротехническим материалам/ под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - М.: Энергия, 1974. - 583с.

7448

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. В.Ф. УТКИНА

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПО КРИВЫМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Методические указания
к лабораторной работе № 21



Рязань 2022

УДК 621.382

Построение диаграмм состояния металлических сплавов по кривым охлаждения: методические указания к лабораторной работе № 21; сост.: С.И. Мальченко, Т.А.Холомина, М.В.Зубков / Рязан. гос. радиотехн. ун-т.- Рязань, 2022. 20 с.

Приведены краткие сведения по теории образования, физико-химическим свойствам и особенностям построения диаграмм состояния металлических сплавов на основе данных метода термического анализа, а также методика выполнения лабораторной работы при помощи виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины, обучающихся по направлениям 11.03.01, 18.03.01 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 11.05.01, 12.03.01, 11.03.04, 12.03.04, 13.03.02, 24.05.06 дневного отделения.

Ил. 12. Библиогр.: 7 назв.

Металлические сплавы, термический анализ, диаграммы состояния

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: Региональный центр зондовой микроскопии (коллективного пользования) при кафедре микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (директор центра Н.В.Вишняков)

Построение диаграмм состояния
металлических сплавов по кривым охлаждения

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
З у б к о в Михаил Владимирович

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение метода термического анализа сплавов - зависимости их фазового состояния от температуры и концентрации компонентов при помощи моделирования в среде инженерного графического программирования LabVIEW кривых охлаждения металлических сплавов разного состава и построения диаграмм состояния.

1. Основные теоретические сведения

Диаграммы состояния сплавов показывают фазовый состав сплава данных компонентов при любой концентрации и при любой температуре. Диаграммы строят при медленном охлаждении, поэтому структуры на диаграмме соответствуют равновесному состоянию. Критические точки сплавов - это температуры фазовых превращений.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный жидкий раствор) различают следующие основные типы диаграмм состояния:

1) при образовании компонентами механической смеси;

2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать элементы диаграмм состояния разных типов. [1-5].

Образование сплавов из компонентов, кристаллизующихся в твердом состоянии в **механическую смесь,** происходит, когда элементы обладают ограниченной растворимостью, а также из компонентов, не участвующих в образовании сплава - химического соединения. Механические смеси, таким образом, могут состоять из кристаллов чистых компонентов, твердых растворов и химических соединений. При образовании механической смеси кристаллические решетки отдельных фаз не меняются.

При изучении диаграмм состояния сплавов, компоненты которых в твердом состоянии не растворяются друг в друге (например, свинец—сурьма, олово—цинк), необходимо четко представлять, что такое **эвтектика.** Эвтектический сплав образуется в результате того, что компоненты друг в друге не растворяются, и представляет собой очень тонкую механическую смесь двух фаз. Так как обе фазы кристаллизуются одновременно при одной и той же температуре, отдельные кристаллы обеих фаз не успевают вырасти до значительных размеров и образуют

настолько мелкую механическую смесь, что практически их нельзя разделить. Поэтому эвтектика обладает специфическими, только ей присущими свойствами. Эти свойства резко отличаются от свойств входящих в нее компонентов. Необходимо обратить внимание на то, что температура окончательного затвердевания сплавов, образующих эвтектику, от состава сплава не зависит. На диаграмме образование эвтектики характеризуется горизонтальной линией, при этом состав жидкого сплава при температуре окончательного затвердевания всегда одинаковый. Это означает, что состав эвтектики во всех сплавах один и тот же, количество же эвтектики в разных сплавах разное. Сплавы, состав которых соответствует минимальной температуре кристаллизации (плавления), называются эвтектическими. Сплавы, состав которых соответствует концентрациям компонентов до эвтектического и после эвтектического состояния, называются соответственно до- и заэвтектическими [1-3].

Сплавы – **твердые растворы** могут обладать как ограниченной, так и неограниченной растворимостью компонентов. Существуют сплавы – твердые растворы, создаваемые замещением компонентов или внедрением одного из компонентов в кристаллическую решетку другого [1-3]. Особенности диаграмм состояния сплавов с неограниченной и ограниченной растворимостью компонентов более подробно рассмотрены в [1-2].

Твердые растворы — это сложные, но однородные вещества, поэтому под микроскопом твердые растворы, подобно чистому металлу, представляют собой однородные кристаллические зерна. В сплавах, образующих твердые растворы, в отличие от сплавов с эвтектикой, температуры и начала, и конца затвердевания зависят от состава и все сплавы затвердевают в определенном интервале температур. Если вещества обладают неограниченной растворимостью, то ни в одном сплаве не будет кристаллов свободных компонентов, т.е. все сплавы данной системы однофазны и представляют собой однородный твердый раствор

Подавляющее большинство сплавов обладают ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии, причем предел растворимости уменьшается с уменьшением температуры (например, сплавы свинец—олово, медь—серебро, алюминий—$CuAl_2$). В этих случаях эвтектика появляется только в тех сплавах, в которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости.

В сплавах, у которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости, структура после окончательного затвердевания представляет собой однородный твердый раствор. Уже в твердом состоянии, в связи с уменьшением предела растворимости при понижении температуры, из твердого раствора начинает выделяться

вторая фаза. Например, в сплавах свинец—олово, содержащих менее 19,5 % олова, в сплавах медь—серебро, содержащих менее 7 % серебра, и в сплавах алюминий—$CuA1_2$, содержащих менее 5,67 % меди, при охлаждении ниже кривой растворимости начинает образовываться вторая фаза и при комнатной температуре сплавы получаются двухфазными.

Отметим, что процессы кристаллизации из одного твердого состояния в другое происходят по тем же законам, что и из жидкого, т.е. путем зарождения центров кристаллизации и последующего их роста, поэтому для образования второй фазы охлаждение должно быть медленным. Следует иметь в виду, что продукты вторичной кристаллизации всегда мельче, чем первичной. Важно помнить, что у сплавов, у которых есть превращения в твердом состоянии, можно менять структуру, а значит, и свойства путем нагрева и охлаждения с различной скоростью, т.е. путем термической обработки.

Диаграммы состояния сплавов, образующих устойчивое **химическое соединение** (магний—кальций, цинк—магний), можно рассматривать как состоящие из двух самостоятельных диаграмм, у которых вторым компонентом является химическое соединение [1-4].

Элементы сплавов, образующие химические соединения, обычно резко отличаются по размерам атомов, строению электронных оболочек и параметрам кристаллических решеток. К образованию химических соединений склонны элементы, далеко расположенные друг от друга в периодической таблице Д.И. Менделеева.

В отличие от обычных химических соединений многие металлические соединения имеют переменный состав, который может изменяться в широких пределах. Получение химического соединения A_mB_n с образованием однородного кристаллического вещества возможно только при строго определенных соотношениях концентраций компонентов. При этом образуется кристаллическая решетка, не похожая на решетки сплавляемых компонентов. Примером может служить сплав Cu–Mg при содержании 17 % Mg. Свойства сплава – химического соединения резко отличаются от свойств элементов, образующих его.

Сплавы – химические соединения не всегда встречаются в чистом виде. Например, при избытке растворимого компонента возможно образование химического соединения в комбинации с твердым раствором.

Физические, механические и технологические свойства сплава зависят от его структуры. Зависимость между типом диаграммы состояния сплава и его свойствами установлена в работах Н.С.Курнакова и А.А.Бочвара. Диаграммы состав—свойства для сплавов разных типов приведены в [1-3].

Диаграмма состояния представляет собой графическое

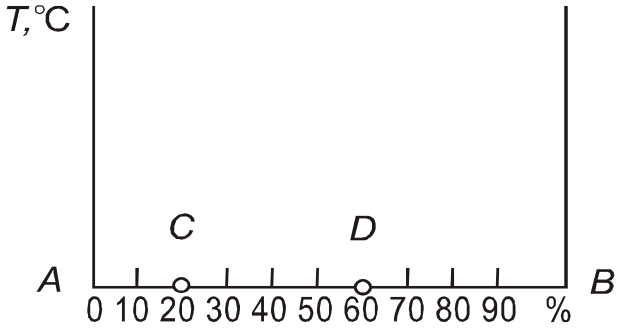


Рис. 1.1. Координаты для изображения диаграммы состояния двухкомпонентной системы

изображение фазового состояния сплавов и критических точек в зависимости от концентрации компонентов и температуры в условиях термодинамического равновесия.

Для того чтобы обеспечить равновесное состояние системы охлаждение сплава из жидкого состояния осуществляют очень медленно. *Равновесными* считаются такие условия, при которых процессы, протекающие в системе, являются обратимыми. В данном случае процессы, происходящие при охлаждении сплава, должны в точности совпадать с процессами, протекающими при его нагреве.

Диаграмму состояния строят в координатах температура–концентрация (рис. 1.1). Для сплавов, состоящих из двух компонентов *A* и *B*, состав характеризуется отрезком прямой, принятым за 100%. Крайние точки *A* и *B* соответствуют 100 % чистых компонентов. Любая точка на этом отрезке характеризует состав двойного сплава. Так, например, точка *C* соответствует сплаву, состоящему из 20 % *B* и 80 % *A*; точка *D* – 60 % *B* и 40 % *A*.

Для построения диаграммы состояния из компонентов изготовляют серию сплавов различного состава и для каждого из них строят кривую охлаждения по результатам термического анализа в координатах температура–время (так же, как для металлов). Особенности поликристалли-

ческого строения сплавов в твердом состоянии изучаются с помощью оптического микроскопа обычно при 100 – 1000-кратном увеличении. Атомная структура сплавов и параметры кристаллических решеток определяются методом рентгеноструктурного анализа.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный жидкий раствор), различают следующие основные типы диаграмм состояния:

1) при образовании компонентами механической смеси;

2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать фрагменты диаграмм состояния разных типов.

1.1. Диаграмма состояния сплавов из компонентов, образующих в твердом состоянии механическую смесь

Экспериментально установлено, что при совместной кристаллизации сплавов, компоненты которых не растворяются друг в друге в твердом состоянии, температура начала кристаллизации всегда ниже, чем у

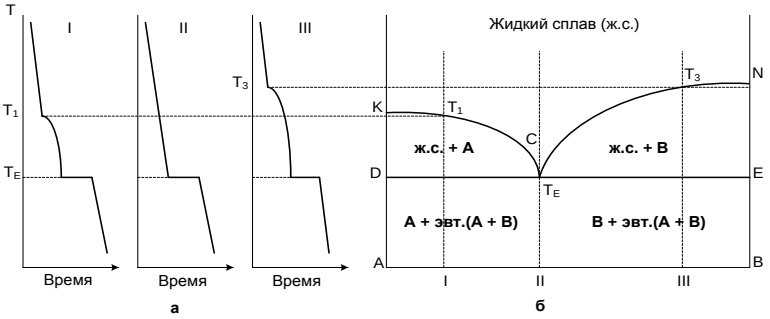


Рис. 1.2. Кривые охлаждения с концентрацией компонентов I, II, III (а) и диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии сплав типа механической смеси компонентов *A* и *B* (б)

исходных компонентов. Температура же окончания процесса перехода в твердое состояние одинакова для сплавов любого состава двухкомпонентной системы.

На рис. 1.2 приведены кривые охлаждения для разных концентра-

ций компонентов *A* и *B*, а также диаграмма состояния сплава. Выше линии *KCN* (рис. 1.2,б) все сплавы двухкомпонентной системы представляют собой однофазный расплав (жидкий сплав - ж. с.). Эта линия называется ***линией ликвидуса*** (с греч. – жидкий), линия DCE – ***линией солидуса*** (с греч. – твердый). Ниже линии DCE все сплавы находятся в твердом состоянии. Сплав, соответствующий точке *C*, называется *эвтектическим* (эвтектикой; с греч. – легко плавящийся).

В доэвтектических сплавах сначала при охлаждении ниже линии ликвидуса КС выделяются кристаллы компонента А, а в заэвтектических – ниже линии CN – кристаллы компонента В. После затвердевания, т.е. ниже линии солидуса ДСЕ, доэвтектические сплавы состоят из кристаллов А и эвтектики, а заэвтектические – из кристаллов В и эвтектики.

1.2. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Рассмотрим построение диаграммы состояния для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии. Например, экспериментально получены кривые охлаждения компонентов *A* и *B* и сплавов I (70 % *A* и 30 % *B*), II (50 % *A* и 50 % *B*) и III (20 % *A* и 80 % *B*) (рис. 1.3,а). Кристаллизация компонента А начинается и заканчивается при постоянной температуре t_A. Аналогично происходит кристаллизация компонента В при температуре t_B. Кристаллизация сплавов I, II и III происходит в некотором интервале температур. Кристаллизация сплава I начинается при температуре t_1 и заканчивается при температуре t_2 с образованием твердого раствора α. Аналогично происходит кристалли-

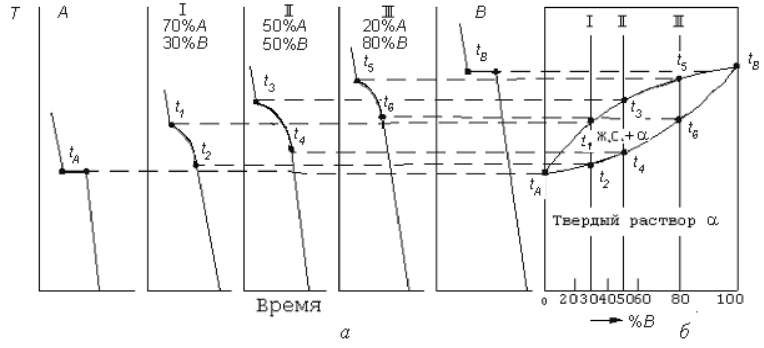


Рис. 1.3. Построение диаграммы состояния сплавов для случая неограниченной растворимости компонентов *A* и *B* в твердом состоянии: а – кривые охлаждения; б – диаграмма состояния

зация и двух других сплавов – при температуре t_3 начинается и при температуре t_4 заканчивается затвердевание сплава II, а сплава III – при температурах t_5 и t_6 соответственно. Разница только в интервале температур начала и конца кристаллизации.

Если на оси абсцисс сетки в координатах температура – концентрация (рис. 1.3, б) отметить точками исследованные сплавы и в каждой из этих точек восстановить перпендикуляры, т.е. провести линии сплавов, затем на эти линии, а также на левую и правую ординаты температур, соответствующие компонентам *A* (левая) и *B* (правая), перенести найденные критические точки от t_A до t_B и одноименные (имеющие одинаковый физический смысл) критические точки соединить плавными кривыми, то получится диаграмма состояния сплавов *A* и *B* с неограниченной растворимостью указанных компонентов *A* и *B* в твердом состоянии (рис. 1.3, б).

На этой диаграмме кривая $t_A t_1 t_3 t_5 t_B$ – кривая начала затвердевания сплавов – *линия ликвидуса*, а кривая $t_A t_2 t_4 t_6 t_B$ – кривая конца затвердевания – *линия солидуса.*

1.3. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Один из видов такой диаграммы состояния показан на рис. 1.4. Число фаз в данной системе три – жидкий раствор, твердый раствор компонента *B* в компоненте *A* (обозначим его α) и твердый раствор

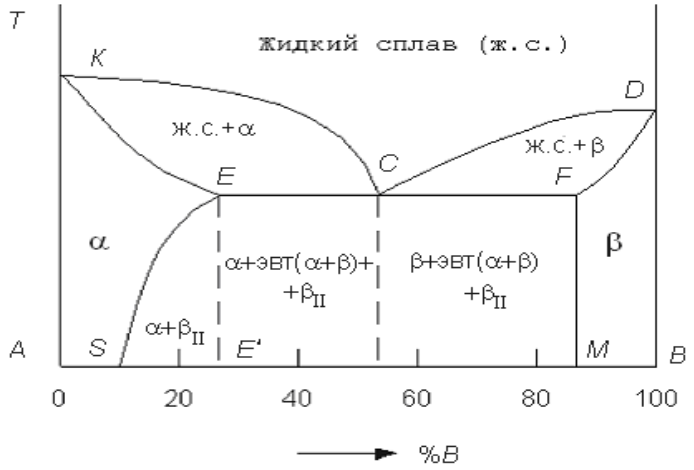


Рис. 1.4. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов *A* и *B* в твердом состоянии

компонента *A* в компоненте В (обозначим его β).

На этой диаграмме линия *KCD* – линия ликвидуса, линия *KECFD* – линия солидуса. По линии ликвидуса *KC* из жидкого сплава выделяются кристаллы α, а по линии *CD* – кристаллы β. На линии солидуса *KE* сплавы затвердевают с образованием кристаллов α, на линии *DF* – кристаллов β. На линии солидуса *ECF* происходит одновременная кристаллизация α- и β-фаз с образованием эвтектики. Сплав состава, соответствующего точке *C,* после затвердевания состоит только из одной эвтектики α+β. Аналогично ранее рассмотренному случаю сплавы, по своему составу находящиеся левее эвтектической точки *C* (на линии *EC*), после затвердевания имеют структуру α+эвтектика (α+β) и являются доэвтектическими. Сплавы, по своему составу лежащие правее точки *C* (на линии *CF*), после затвердевания имеют структуру β+эвтектика (α+β) и являются заэвтектическими.

Линия *ES* показывает ограниченную растворимость в твердом состоянии компонента *B* в компоненте *A*, уменьшающуюся с понижением температуры, а линия *FM* – растворимость компонента *A* в *B*, не изменяющуюся с понижением температуры.

Точка *E* характеризует предельную растворимость компонента *B* в компоненте *A*, а точка *F* – то же для *A* в *B*. Если кристаллизуются сплавы, состав которых находится левее точки *S* (или правее точки *M*), то при любой температуре в твердом состоянии все количество компонентов *B* (или *A*) находится в твердом растворе и структура таких сплавов состоит из зерен α (или β). В сплавах, состав которых находится между точками *S* и *E'*, т.е. за пределом растворимости *B* в *A*, образовавшиеся при затвердевании кристаллы α при понижении температуры ниже линии *ES* пересыщены компонентом *B* и поэтому происходит выделение из них избыточных кристаллов, которыми являются кристаллы β концентрации, соответствующей точке *M*, называемые вторичными (β_{11}). После полного охлаждения эти сплавы имеют структуру, состоящую из кристаллов α состава точки *S* и кристаллов β_{11} – α + β_{11}. В сплавах состава линии *EC*, имеющих после затвердевания структуру α + эвтектика (α+β), из кристаллов α тоже выделяются кристаллы β и после полного охлаждения будет структура α + эвтектика (α+β)+β_{11}.

Процесс выделения вторичных кристаллов из твердого раствора называется *вторичной кристаллизацией*, в отличие от образования кристаллов в жидком сплаве (*первичная кристаллизация*).

1.4. Диаграмма состояния сплавов с образованием химического соединения

Химическое соединение обозначают A_mB_n. Это означает, что в данном соединении на m атомов компонента A приходится n атомов компонента B. Диаграмма состояния для случая образования компонентами сплава - химического соединения, состав которого при нагреве и охлаждении не изменяется, приведена на рис. 1.5.

Данная диаграмма составлена как бы из двух диаграмм: компонент A – химическое соединение A_mB_n и компонент B – химическое соединение A_mB_n. В сплавах левее точки C (соответствующей по составу химическому соединению A_mB_n) компонента A имеется больше, чем входит в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах левее точки C образуется эвтектика $\alpha + A_mB_n$. В сплавах правее точки C компонента B больше, чем может входить в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах образуется эвтектика $A_mB_n+\beta$.

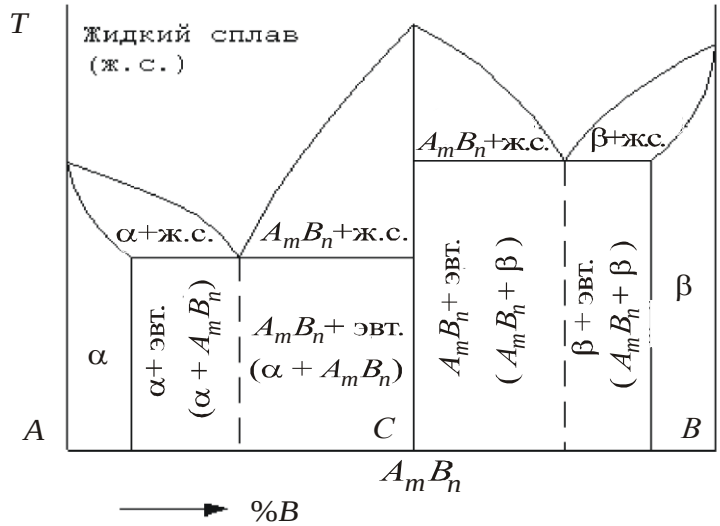


Рис. 1.5. Диаграмма состояния сплавов для случая образования компонентами А и В сплава - химического соединения

1.5. Диаграмма состояния сплава железо цементит (Fe–Fe_3C)

Стали и чугуны, относящиеся к черным сплавам (в отличие от цветных), составляют около 95% мирового выпуска металлопродукции. Поэтому изучение диаграммы состояния сплава железо-цементит (Fe–Fe_3C) имеет большое значение для технических специалистов.

Диаграмма состояния Fe–Fe_3C (в несколько упрощенном виде) при-

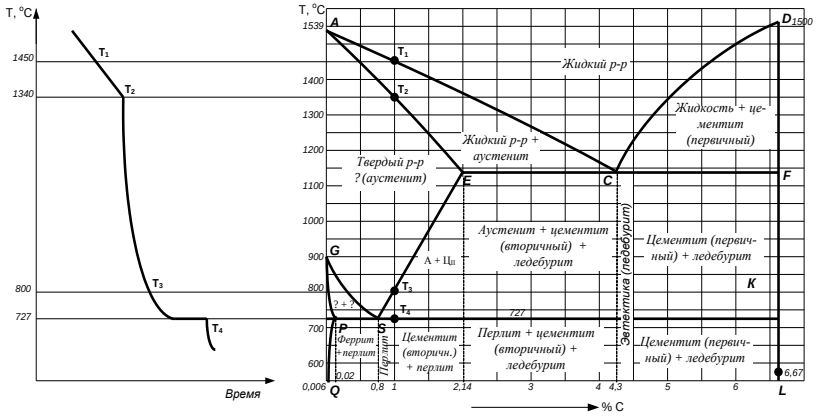


Рис.1.6.Диаграмма состояния Fe–Fe_3C и кривая кристаллизации, соответствующая содержанию углерода в стали 1 %

ведена на рис. 1.6,1.7. Анализ диаграммы состояния показывает, что она

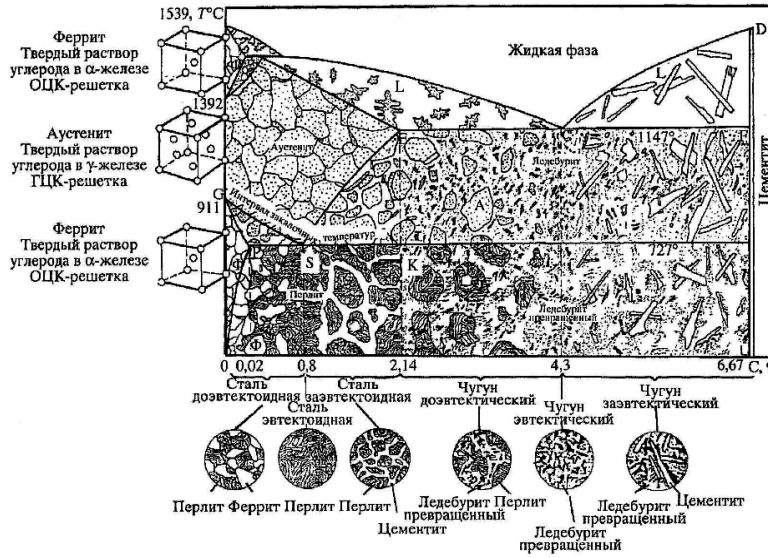


Рис. 1.7. Диаграмма состояния сплава железо - цементит

содержит фрагменты диаграмм состояния сплавов, которые создаются при образовании компонентами механической смеси; твердых растворов внедрения с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии; образовании компонентами химического соединения.

Подробное рассмотрение особенностей сплавов на основе железа и углерода приведено в учебных пособиях [1-4,7]. Разнообразие свойств сплавов обусловлено прежде всего полиморфизмом железа. В сплавах имеются три твердые фазы – феррит, цементит и аустенит и эти же фазы в структурно связанном состоянии: эвтектоид – перлит и эвтектика – ледебурит (рис.1.7).

В сплавах железо–углерод при распаде аустенита возможна кристаллизация углерода в свободном состоянии в виде графита.

Графит является неметаллической фазой, он мягок и обладает низкой пластичностью, располагается в основной массе сплава, имеет развитую объемную форму в виде пластинок.

Диаграмма состояния системы железо–цементит используется на практике для определения видов и режимов термической обработки стали с целью придания сплаву необходимых свойств.

1.5. Термическая обработка стали

Термической обработкой называют процессы, связанные с нагревом и охлаждением, вызывающие изменения внутреннего строения сплава и обусловленные этим изменения физических, механических и других свойств.

Основой процессов термической обработки является полиморфизм железа и его твердых растворов на основе модификаций железа α– и γ–Fe. В результате полиморфизма происходит изменение кристаллической структуры сплавов в твердом состоянии. Следует отметить, что нагрев или охлаждение однокомпонентного металла (железа) не оказывает значительного влияния на его структуру и свойства. Между тем, термическая обработка углеродистой стали при определенных условиях позволяет изменять структуру материала и его физико-механические свойства в широких пределах.

Термической обработке с целью требуемого изменения структуры и свойств (твердости, обрабатываемости и др.) подвергают как полуфабрикаты (заготовки), так и готовые изделия (детали, инструмент). В зависимости от структурного состояния стали, получаемого в результате применения термообработки, последняя подразделяется на отжиг (первого и второго рода), нормализацию, закалку и отпуск.

Технологический процесс термообработки включает три последовательно выполняемые операции:

1) нагрев до определенной температуры;
2) выдержку при этой температуре;
3) охлаждение с заданной скоростью.

Отжигом называется процесс термической обработки, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и последующее, как правило, медленное охлаждение (в печи) с целью получения более равновесной структуры стали. В результате отжига устраняются внутренние напряжения, измельчается зерно, повышается пластичность стали.

Отжиг первого рода – это термическая обработка, при которой, как правило, не происходит фазовых превращений (перекристаллизации), а если они имеют место, то не оказывают влияния на конечные результаты, предусмотренные целевым назначением. Разновидностями отжига первого рода являются диффузионный и рекристаллизационный.

Целью ***диффузионного*** отжига (гомогенизации) является выравнивание химического состава и удаление дендритной структуры кристаллов в фасонных отливках и слитках легированной стали.

Целью ***рекристаллизационного*** отжига является устранение наклепа и образование новых равноосных зерен из деформированных, т.е. получение зерна определенной величины и формы.

Целью ***отжига второго рода*** являются фазовые превращения – перекристаллизация стали с достижением практически равновесного структурного (фазового) состояния. Различают следующие разновидности отжига второго рода: полный, неполный, изотермический.

Изотермический отжиг обычно применяют для легированных сталей с целью полного распада аустенита и образования ферритно–перлитной структуры. Нагрев осуществляется при температуре, применяемой для полного отжига. Затем производят сравнительно быстрое охлаждение (переносом в другую печь) до температуры, лежащей ниже 650°С, и начинают изотермическую выдержку, необходимую для полного распада аустенита, после чего следует охлаждение на воздухе.

Преимущество изотермического отжига состоит в снижении продолжительности процесса по сравнению с полным отжигом.

Нормализация – это термическая обработка, включающая нагрев до температуры, соответствующей температуре полного отжига, и охлаждение на воздухе.

Нормализация применяется обычно для исправления структуры перегретой и литой стали, измельчения зерна, смягчения стали перед обработкой и резанием.

Закалка стали применяется для значительного повышения

прочности и твердости материала. Закалка производится нагреванием на 30–50 градусов выше температур, соответствующих линии аустенитного превращения (*GSK*) диаграммы состояния Fe–C, затем осуществляется выдержка в течение необходимого времени. Охлаждение после закалки проводится с высокой скоростью 100–500 град/с. На практике применяют следующие охлаждающие среды: вода, 10%-е растворы NaCl, H_2SO_3, Na_2CO_3 в воде, машинное масло, трансформаторное масло, эмульсия масла в воде, мыльная вода, керосин, воздух.

Кроме высоких прочности и твердости, закаленная сталь приобретает и повышенную хрупкость. В основном закалке подвергают низкоуглеродистые стали.

Отпуском называют нагрев закаленной стали до определенной температуры с выдержкой при этой температуре и с последующим сравнительно медленным охлаждением на воздухе. Целью отпуска является частичное или полное устранение внутренних напряжений, снижение твердости и повышение вязкости. В зависимости от температуры различают низко- средне- и высокотемпературный виды отпуска[1-4,7].

2. Описание лабораторной работы

Работа выполняется на персональном компьютере (ПК), на котором сформирована программа, моделирующая установку для термического анализа сплавов. При работе с программой используются обычные приемы управления, характерные для операционной системы Windows. Для начала работы следует запустить на исполнение файл **Терм_анал_спл.** На экране появится окно с названием лабораторной работы, как показано на рис. 2.1,

Для продолжения работы следует использовать кнопку «Продолжить». Если передумали, то кнопку «Выход». Если работа будет продолжена, то появится окно с элементами теории (рис. 2.2), в котором изложены основы термического анализа. Используя кнопку «Начинаем», можно приступить к выполнению работы. При этом на экране монитора появится виртуальная лабораторная установка для термического анализа сплавов, как показано на рис.2.3.

В установке предусмотрено исследование восьми различных образцов сплавов, каждый из которых имеет восемь различных процентных составов компонентов. Вначале необходимо выбрать образец для исследования и его состав. Щелкнуть мышкой по кнопке «Образец - X», что позволяет выбрать необходимый образец, а по кнопке «Состав - X» процентный состав образца. Процентный состав после выбора образца отображается в соответствующих окнах. Окончательный результат подтверждается щелчком по кнопке «Выбран». После этого необходимо



Рис.2.1. Окно приветствия лабораторной работы

включить приборы щелчком по соответствующим тумблерам. Если приборы не включены перед началом работы, то появится предупреж-

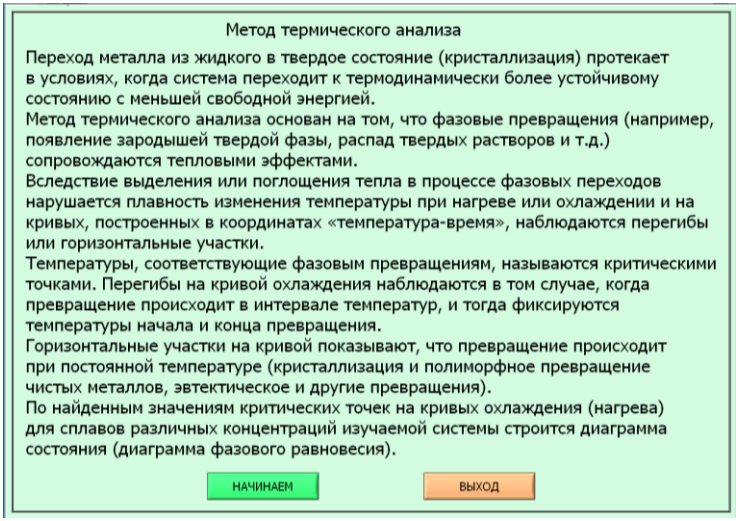


Рис. 2.2. Окно с описанием метода термического анализа

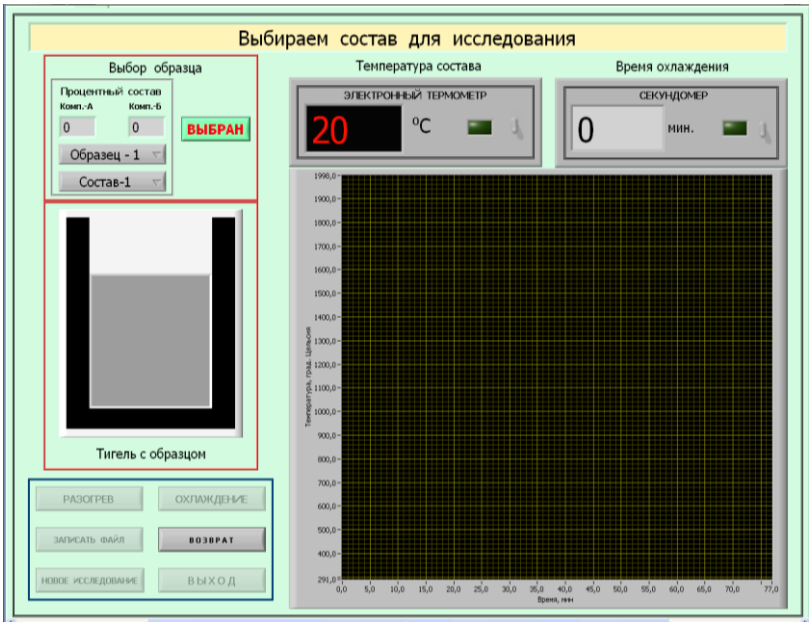
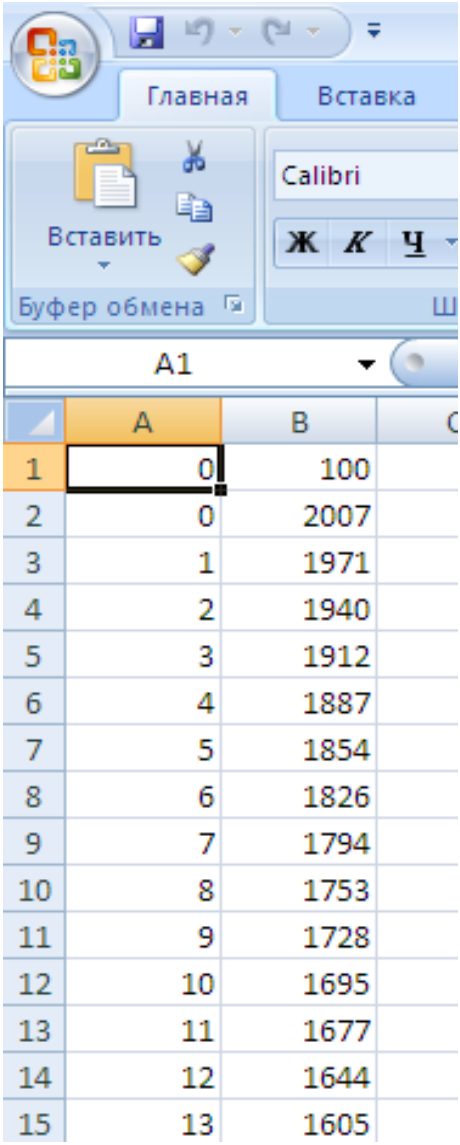


Рис. 2.3. Окно виртуальной лабораторной установки для проведения термического анализа

дающее сообщение программы. На табло в верхней части окна отображается информация о режимах работы установки. Работа начинается с разогрева образца в виртуальном тигле до температуры 2000 ^{0}C. Для этого следует щелкнуть по кнопке «Разогрев». В этом случае включается «электронагреватель» и температура расплава возрастает. При достижении температуры 2000^{0}C установка переходит в режим ожидания. Для охлаждения состава следует щелкнуть по кнопке «Охлаждение» и предполагается, что тигель с расплавом начинает охлаждаться естественным образом за счет теплообмена с окружающей средой. На графической панели отображается по вертикали температура расплава, а по горизонтали время в минутах. В программе для удобства использован режим ускорение времени при проведения анализа.

На графической панели строится график зависимости температуры сплава от времени. После окончания построения графика массив данных можно записать в файл для дальнейшего анализа. Для этого следует использовать кнопку «Записать в файл».

ВНИМАНИЕ! Файл всегда записывается в папку «Student» на рабочем столе с раширением ***.txt**. Имя файла может быть любым. Реко-



	A	B
1	0	100
2	0	2007
3	1	1971
4	2	1940
5	3	1912
6	4	1887
7	5	1854
8	6	1826
9	7	1794
10	8	1753
11	9	1728
12	10	1695
13	11	1677
14	12	1644
15	13	1605

Рис. 2.4. Массив данных, загруженный в программу Excel для анализа

мендуется делать его уникальным с указанием номера группы и процентным составом (можно указать и фамилию одного из студентов бригады), например **322Иванов-4-7.txt**. Студент Иванов, группа 322, образец 4 состав 7. Таким образом, после выполнения лабораторной работы в этой папке будет восемь различных файлов с разными составами для одного образца. Эти файлы можно загрузить в программу Excel для дальнейшей обработки.

Возможен вариант, когда на графике охлаждения расплава, на графической панели (рис. 2.3) фиксируются особые точки охлаждения расплава с известной концентрацией компонентов и затем, составив соответствующую таблицу, можно приступить к анализу диаграммы состояния расплава и ее построению.

Для работы в программе Excel необходимо **Открыть** файл с Вашими данными и указать вариант расширения ***.txt**. В дальнейшем указать **Формат данных** (*с разделителями*) «**Далее**», **Символом разделителя является** (*знак табуляции*) «**Далее**», **Формат данных столбца** (*общий*) «**Готово**» (такая последова-

тельность команд характерна для Excel 2003). После этого в программе отобразится массив данных, как показано на рис. 2.4. В первых строчках столбцов указывается процентный состав вещества А и В, а ниже идут данные взятые из Ваших файлов. Слева время в минутах, а справа температура в градусах Цельсия.

Затем, используя эти массивы данных, можно в программе Excel построить графики изменения температуры при охлаждении расплава. Для этого следует выделить оба столбца (кроме первых строк) и **Вставить** в программу **Точечную диаграмму** любого вида. На экране появится график охлаждения расплава. Пример такого графика показан на рис. 2.5 перед разделом «Содержание отчета».

Таким образом, можно построить восемь графиков охлаждения расплавов с различной процентной концентрацией компонентов. Затем их можно использовать для построения диаграммы состояния образца сплава.

3. Выполнение работы

1. Получить у преподавателя задание (номер образца) на проведение термического анализа указанного образца сплава.
2. Запустить на исполнение файл с лабораторной работой, как указано в разделе 2 методического пособия. Рекомендуется ознакомиться с общетеоретической частью работы, и затем перейти в режим термического анализа расплава.
3. Выбрать указанный преподавателем образец сплава для исследования.
4. Выбрать «Состав-1» и после этого щелчком по кнопке «Выбран» подтвердить факт выбора образца и состава компонентов.
5. Включить все приборы и произвести разогрев сплава до температуры 2000^0С щелчком по кнопке «Разогрев». Дождаться остановки разогрева расплава.
6. Приступить к охлаждению расплава щелчком по кнопке «Охлаждение». На графической панели будет отображаться график изменения температуры при охлаждении расплава.
7. После достижения минимальной температуры сплава следует записать полученный массив данных в файл для дальнейшей обработки, как показано в разделе 2 методических указаний используя кнопку «Записать в файл». Имя файла задавать, как рекомендовано в разделе 2 методического указания. Щелчком по кнопке «Новое исследование» перейти к исследованию нового состава сплава.
8. Повторить пункты с 4 по 7 методических указаний для каждого состава сплава.

9. Используя программу Excel построить восемь графиков охлаждения сплава с разными составами компонентов.

10. Используя полученные графики, построить диаграмму состояния исследуемого сплава.

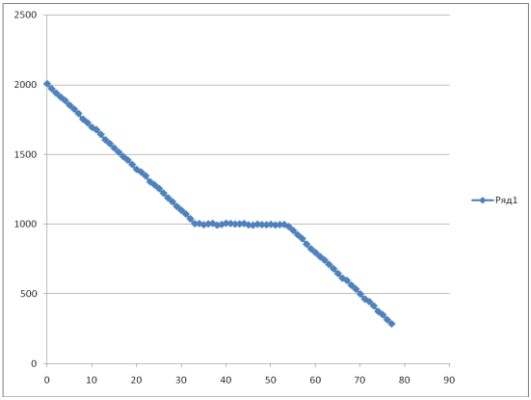


Рис. 2.5. График охлаждения расплава, построенный в программе Excel

11. Оформить полученные результаты в виде таблиц и графиков.

4. Содержание отчета

1) Наименование работы.

2) Цель работы.

3) Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).

4) Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.

5) Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными

5. Контрольные вопросы

1. Чем обусловлен горизонтальный участок на кривых охлаждения металлов и сплавов?

2.Что такое критическая точка на кривых охлаждения или нагревания металлов и сплавов?

3. По каким признакам легированный металл отличается от сплава?

4. Какой метод называется термическим анализом металлов и сплавов?

5. Какое явление называется полиморфизмом?

6. Что происходит при перекристаллизации металлов в твердом состоянии?

7. Что такое диаграмма состояния сплава?

8. Что такое линия ликвидуса?

9. Что такое линия солидуса?

10. Какие свойства характерны для эвтектического сплава?

11. Какие сплавы называются заэвтектическими?

12. Что такое твердая эвтектика?

13. Что такое эвтектоид?

14. Какие фазы содержит сплав с ограниченной растворимостью компонентов А и В в твердом состоянии (по диаграмме состояния)?

15. Какие фазовые состояния сплава типа «механическая смесь компонентов» иллюстрирует диаграмма состояния?

16. Какие фазовые состояния сплава типа «механическая смесь компонентов» иллюстрирует диаграмма состояния?

17. Поясните особенности основных типов диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов.

18. Какие фазы входят в структуры сплавов железа с углеродом в соответствии с диаграммой состояния при нормальной температуре?

19. Какой сплав называется аустенитом?

20. Какой сплав называется ферритом?

21. Какой сплав называется цементитом?

22. По диаграмме Fe—Fe_3C определите максимальное содержание углерода в аустените при 800°С.

23. Расскажите о классификации и маркировке углеродистых сталей.

24. Какая группа материалов называется сталями?

25. Из каких компонентов состоит структура заэвтектоидной стали?

26. Расскажите о классификации и маркировке легированных сталей.

27. Из каких фаз состоит перлит?

28. Изобразите схему охлаждения сплава Fe—Fe_3C с 3% С, отметив на ней структурные состояния сплава.

29. Расскажите об особенностях методов химико-термической обработки стали.

30. Какие технологические операции включает процесс термической обработки стали?

31. Какова цель термической обработки стали?

32. Каковы основные виды термообработки стали?

33. От чего зависит температура превращения перлита в аустенит железо-углеродистых сплавов в реальных условиях нагрева?

34. Какова цель закалки стали?

35. Каковы преимущества изотермического отжига стали по

сравнению с полным?

36. Какова цель полного отжига стали?

37. Какова цель рекристаллизационного отжига как метода термической обработки стали?

38. Какова цель отжига 1-го рода, 2-го рода как метода термической обработки стали?

39. Расскажите о фазовых превращениях в сплаве при охлаждении и заданной концентрации компонентов

6. Библиографический список

1.Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.- 383 с.

2. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учеб. для вузов. – М.: Высш шк., 2004. – 519 с.

3.Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение металлов и сплавов: учеб.пособие. – Рязань: РГРТА, 2014. – 84 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб.пособие. – Рязань: РГРТА, 2013. – 96 с.

5.Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - М.: Энергия, 1974. - 583с.

6.Богородицкий Н.П., Пасынков В.В. Электротехнические материалы: Учебник для электротехнических и энергетических специальных вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304с

7.Кузьмин Б.А., Абраменко Ю.Е., Ефремов В.К. Технология металлов и конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 351с.

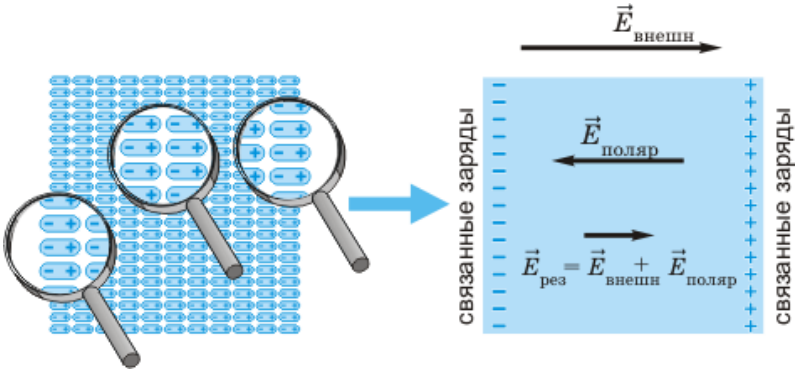
5081

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 3



Рязань 2016

УДК 621.382

Измерение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь электроизолирующих материалов: методические указания к лабораторной работе № 3/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т.сост.: Т.А. Холомина, М.В. Зубков, С.И. Мальченко. Рязань, 2016. 16 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов поляризации и явлениях возникновения потерь энергии в диэлектриках. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего емкость и добротность образцов, а также виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Табл. 1. Ил. 8. Библиогр.: 6 назв.

Диэлектрики, поляризация, диэлектрические потери

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав.кафедрой Т.А.Холомина)

Измерение относительной диэлектрической проницаемости
и тангенса угла диэлектрических потерь
электроизолирующих материалов

Составители: Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
З у б к о в Михаил Владимирович
М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович

Редактор М.Е. Цветкова
Корректор Н.А. Орлова
Подписано в печать 10.11.16. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение явлений поляризации и диэлектрических потерь, ознакомление с резонансным методом измерения основных параметров ε и tgδ диэлектриков и исследование их частотных зависимостей на измерительном оборудовании, а также с помощью виртуального лабораторного стенда.

1. Краткие теоретические сведения

Фундаментальное явление, определяющее возможность использования диэлектрика для создания емкости конденсаторов электронной аппаратуры, – поляризация диэлектриков. Электрическая поляризация при воздействии поля проявляется в ограниченном упругом смещении связанных зарядов, ориентации дипольных молекул, в результате чего некоторый объем или поверхность диэлектрика приобретает электрический момент. После снятия электрического поля связанные заряды возвращаются в первоначальное состояние.

Для сравнения диэлектриков, имеющих различную степень поляризации, пользуются понятием относительной диэлектрической проницаемости ε. Эта величина представляет собой отношение заряда Q конденсатора с конкретным диэлектриком к заряду Q_0 конденсатора тех же размеров и при том же напряжении, между обкладками которого находится вакуум:

$$\varepsilon = Q/Q_0, \qquad (1)$$

где ε – величина безразмерная и всегда больше единицы, поскольку реальные диэлектрики, в отличие от вакуума, всегда содержат электрические заряды.

Диэлектрики делятся на два класса: полярные и неполярные. У молекул неполярных веществ центры тяжести суммарных положительных и отрицательных зарядов совпадают. Молекулы полярных материалов имеют вид диполей, способных ориентироваться в электрическом поле.

Различают две группы поляризации. Мгновенная поляризация (электронная, ионная) происходит практически без потерь энергии. Замедленные виды поляризация (электронно-, ионно-, дипольно-релаксационная, структурная, спонтанная) сопровождаются потерями электрической энергии. Отдельные виды поляризации различаются временем установления (релаксации) и величиной, обратно пропорциональной времени релаксации, – характеристической частотой, вплоть до которой конкретный вид поляризации способен проявляться.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установ-

ления электронной поляризации ничтожно мало (около 10^{-15} с), процесс происходит практически без потерь энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков без исключения, поскольку у всех диэлектриков имеются электроны, находящиеся в связанном состоянии.

Ионная поляризация характерна для твердых диэлектриков с ионным строением (слюда, корунд, каменная соль) и проявляется в упругом смещении связанных ионов под действием электрического поля. Время установления поляризации около 10^{-13} с, потерь энергии не происходит.

Электронно- и ионно-релаксационная поляризации сопровождаются диэлектрическими потерями. Электронно-релаксационная поляризация возникает вследствие возбуждения тепловой энергии избыточных (дефектных) электронов и дырок. Ионно-релаксационная поляризация характерна для материалов ионного строения с неплотной упаковкой ионов (например, в неорганических стеклах). При этом виде поляризации слабосвязанные ионы под действием поля перемещаются на одно или несколько атомных расстояний и закрепляются в новом положении, что создает асимметрию распределения зарядов и, следовательно, электрический момент единицы объема. Время релаксации составляет $10^{-8}...10^{-11}$ с для ионов-релаксаторов разных размеров.

Дипольно-релаксационная поляризация обычно наблюдается в полярных органических диэлектриках (полиметилметакрилат, поливинилхлорид и т.д.) и заключается в ориентации, повороте дипольных молекул, дипольных групп под действием электрического поля. Этот вид поляризации сопровождается потерями энергии. Чем ниже температура и крупнее диполи, тем больше время релаксации, изменяющееся в пределах $10^{-6}...10^{-10}$ с.

Структурная (межслойная, миграционная) поляризация обусловлена движением свободных зарядов (положительных и отрицательных ионов, электронов) и их закреплением на дефектах и поверхностях раздела различных компонентов электроизоляционного материала. Этот вид поляризации наблюдается в неоднородных диэлектриках (композиционные пластмассы, гетинаксы, текстолиты, керамика и т.д.), компоненты которых обладают разными электрическими свойствами. Время релаксации может достигать десятков минут, поляризация сопровождается диэлектрическими потерями.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация характерна для сегнетоэлектриков. При температуре ниже точки Кюри, когда энергия теплового движения невысока, ионы, смещаясь друг относительно друга, создают электрический момент. Области с одинаковым направ-

лением дипольных моментов называются доменами. До действия электрического поля направление дипольных моментов разных доменов хаотично и сумма их равна нулю, поэтому сегнетоэлектрики в целом неполяризованы. Под действием внешнего электрического поля происходит ориентация дипольных моментов доменов в направлении поля. Поэтому диэлектрическая проницаемость при спонтанной поляризации зависит от напряженности электрического поля. Потери энергии при этом незначительны.

Диэлектрическая проницаемость диэлектрика зависит от его агрегатного состояния, структуры и условий эксплуатации (температуры, влажности, напряжения, частоты).

Газообразные диэлектрики из-за низких концентраций заряженных частиц и плотности имеют $\varepsilon \approx 1$.

У жидких неполярных диэлектриков с электронной поляризацией ε также невелика и составляет 2-2,5. Полярные (органические и неорганические с неплотной упаковкой) диэлектрики, для которых характерны релаксационные виды поляризации, имеют ε=3...10. Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков достигает $2 \cdot 10^5$.

Характер зависимости ε(T) конкретного диэлектрика обусловлен преобладающим видом поляризации. Например, у неполярных материалов (полиэтилен, парафин) ε с ростом температуры снижается из-за уменьшения плотности и соответственно концентрации объектов поляризации заряженных частиц (рис. 1, кривая 1).

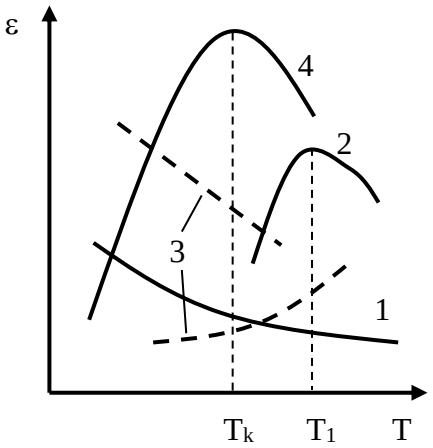


Рис. 1. Зависимость ε от температуры для диэлектриков с электронной (1), дипольно-релаксационной (2), ионной и ионно-релаксационной (3) и спонтанной (4) поляризацией

Зависимость ε полярных диэлектриков от температуры имеет максимум при определенной температуре T_1 (рис.1, кривая 2). При увеличении температуры до T_1 ε увеличивается за счет уменьшения вязкости и облегчения ориентации диполей, далее, при

$T>T_1$ (определенной для каждого диэлектрика), ε уменьшается, так как тепловое движение нарушает ориентацию диполя по полю. У большинства неорганических стеклообразных и кристаллических материалов ионного строения ε увеличивается с ростом температуры, а у некоторых уменьшается (рис.1, кривая 3). Это объясняется наличием у диэлектриков как электронной (снижение ε с ростом Т), так и ионной поляризации. Вследствие уменьшения связи между ионами ε при ионной поляризации с ростом температуры увеличивается.

При повышении температуры вплоть до значения точки Кюри (T_K на рис. 1, кривая 4) ε сегнетоэлектриков увеличивается вследствие облегчения процесса поляризации доменов, а выше точки Кюри уменьшается из-за того, что хаотическое тепловое движение молекул с сосредоточенными на них электрическими моментами нарушает доменное строение.

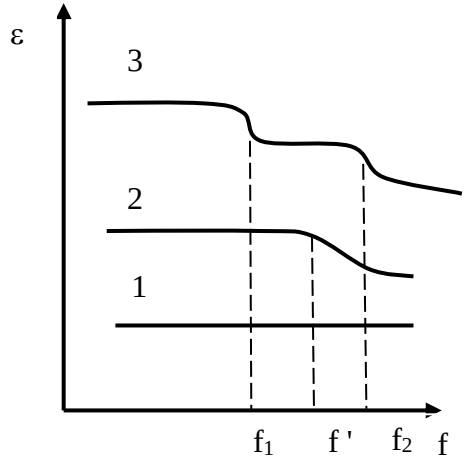


Рис. 2. Частотная зависимость ε диэлектриков с мгновенной (1) и релаксационными (2, 3) видами поляризации

Относительная диэлектрическая проницаемость ε неполярных диэлектриков не зависит от частоты, как показано на рис. 2 (кривая 1), так как им свойственна только мгновенная поляризация, время релаксации которой мало по сравнению с полупериодом действия напряжения. В полярных материалах с дипольно-релаксацион-ной или ионно-релаксационной поляризацией ε до определенной частоты f^1 не меняется (рис. 2, кривая 2). Когда поляризация не будет успевать полностью устанавливаться за один полупериод действия напряжения (f′ - величина, обратная времени релаксации), ε снижается, приближаясь к значению, обусловленному всегда имеющейся электронной поляризацией. Некоторые полярные полимеры имеют ступенчатую зависимость ε(f), аналогичную кривой 3 (рис. 2), обусловленную наличием набора разных релаксаторов (диполей,

групп, сегментов) с соответствующими характеристическими частотами «выбывания» f_1, f_2 и временами релаксации поляризационных процессов. Характеристическую частоту f_x можно рассчитать по формуле:

$$f_x = \frac{kT}{8\pi^2 \eta r^3}, \qquad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, η – вязкость среды, r – радиус поляризующегося элемента (макромолекулы, диполя и т.п.).

Из соотношения (2) следует, что характеристическая частота увеличивается с ростом температуры и снижается при увеличении вязкости диэлектрика. Самое значительное влияние оказывают на характеристическую частоту размеры релаксатора (иона, диполя, макроструктурного компонента диэлектрика). Применительно к диполям, т.е. полярным молекулам, f_x соответствует максимальной частоте внешнего электромагнитного поля, которую они способны воспроизвести своими поворотами в нем. За счет таких поворотов (ориентации) достигается максимально возможная компенсация внешнего поля собственным электрическим полем диэлектрика. Важно, что полярные молекулы одинаковых размеров, пребывая в средах с разной вязкостью, обладают неодинаковой характеристической частотой. Поскольку емкость любого конденсатора пропорциональна величине ε, зависимости $C(T)$ и $C(f)$ полностью определяются зависимостями $\varepsilon(T)$ и $\varepsilon(f)$ конкретного диэлектрика.

Диэлектрическими потерями называется энергия, рассеиваемая в единицу времени в диэлектрике, находящемся в электрическом поле, и вызывающая его нагрев. При постоянном поле потери обусловливаются током сквозной проводимости – движением ионов, иногда – свободных электронов. Потери на сквозную электропроводность присущи в большей или меньшей мере всем диэлектрикам без исключения. Величина потерь на сквозную электропроводность определяется удельным сопротивлением ρ_v, а в твердых диэлектриках также и удельным поверхностным сопротивлением ρ_s.

При переменном поле различают следующие виды потерь:

1) на сквозную электропроводность;

2) поляризационные, обусловленные разными видами замедленной (релаксационной) поляризации;

3) ионизационные;

4) обусловленные неоднородностью структуры.

Поляризационные потери характерны для полярных диэлектриков (поливинилхлорид, полиметилметакрилат, полиэтилентерефталат, электроизоляционные стекла и др.). Каждый тип релаксационной по-

ляризации диэлектрика сопровождается характерными поляризационными потерями с определенным временем релаксации и характеристической частотой.

Ионизационные потери характерны для газообразных диэлектриков, а также жидких и твердых, содержащих газовые включения (керамические, слоистые, композиционные и др.). Этот вид потерь характеризуется так называемой кривой ионизации - зависимостью tg δ от приложенного электрического напряжения [2,3].

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, непосредственно связаны с макроструктурной (миграционной) поляризацией и присутствуют в композиционных, керамических, слоистых диэлектриках.

При выводе аналитического соотношения для расчета мощности диэлектрических потерь пользуются эквивалентной схемой диэлектрика, состоящей из последовательно или параллельно включенных активного сопротивления R и емкости C. Эквивалентная схема выбирается так, чтобы расходуемая активная мощность была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а вектор тока был сдвинут относительно вектора напряжения на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

В идеальном конденсаторе (вакуумном) без потерь угол между векторами тока $\overrightarrow{I_c}$ и напряжением $\overrightarrow{U_c}$ равен 90°. Чем больше рассеиваемая в реальном диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция tg δ (рис. 3).

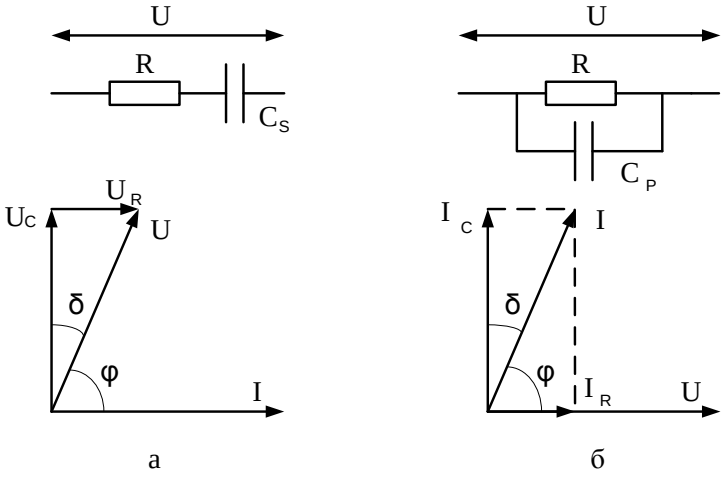
Тангенс угла диэлектрических потерь (tg δ) – параметр, учитывающий все виды потерь в диэлектрике и представляющий собой тангенс угла, дополняющего угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи до 90°. Тангенс угла диэлектрических потерь равен отношению

$$tg\delta = I_a/I_c, \qquad (3)$$

а мощность диэлектрических потерь в переменном электрическом поле

$$P_{\sim} = U^2 \omega C tg\delta, \qquad (4)$$

где U – приложенное напряжение; ω=2πf – частота. Из выражения (4) следует, что диэлектрические потери существенно влияют на работу аппаратуры высокого напряжения, высокочастотной и в особенности - одновременно высокочастотной и высоковольтной.



а б

Рис. 3. Эквивалентные схемы и векторные диаграммы диэлектрика с потерями: а – последовательная; б – параллельная

Тангенс угла диэлектрических потерь зависит от состава и структуры диэлектриков, от агрегатного состояния, а также от условий эксплуатации.

У чистых однородных неполярных диэлектриков диэлектрические потери малы и обусловлены только током сквозной проводимости. tgδ незначителен, порядка 10^{-4}, с ростом частоты падает (рис. 4, кривая 1), так как I_R от частоты практически не зависит, а реактивный ток I_c увеличивается. Для таких диэлектриков при повышении температуры tgδ возрастает за счет увеличения тока сквозной проводимости (рис. 5, кривая 1).

Полярные диэлектрики, у которых потери обусловлены как сквозной проводимостью (иногда значительной), так и релаксационными видами поляризации, имеют высокий tg $\delta \sim 10^{-2}$ - 10^{-1}. Частотная и температурная зависимости tgδ таких диэлектриков имеют максимумы, показанные на рис. 4 (кривая 2) и 5 (кривая 2). Появление максимума на зависимости tgδ(f) объясняется инерционностью диполей и дипольных групп, не успевающих ориентироваться по полю за полупериод его изменения. Общий характер частотной зависимости соответствует кривой 1, рис. 4, т.е. потерям на сквозную электропроводность. При наличии нескольких релаксаторов появляется соответствующее число максимумов tgδ аналогично рис. 2.

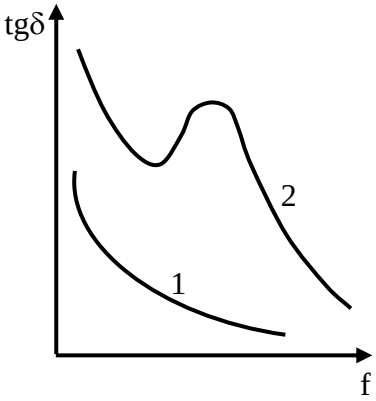


Рис. 4. Частотная зависимость tg δ для диэлектриков с потерями на сквозную электропроводность (1); с потерями на электропроводность и поляризационными потерями (2)

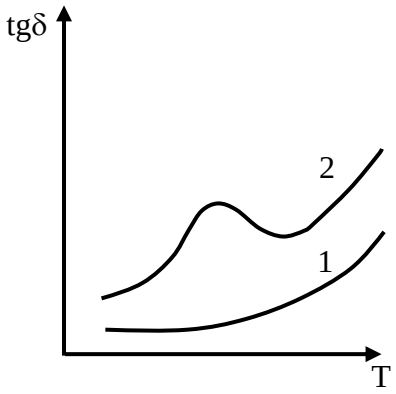


Рис. 5. Зависимость tg δ от температуры для неполярных (1) и полярных (2) диэлектриков

Появление максимумов на температурной зависимости tgδ полярных диэлектриков объясняется тем, что по мере повышения температуры закрепленные диполи получают дополнительную энергию, большую свободу перемещения и ориентации по полю. При этом возрастает мощность диэлектрических потерь и tgδ. Начиная с определенной температуры, соответствующей максимуму tgδ на его температурной зависимости, энергия теплового движения становится выше энергии электрического поля, нарушается ориентация диполей, затрата энергии уменьшается и tgδ снижается. При высоких температурах tgδ полярных диэлектриков возрастает за счет роста тока сквозной проводимости.

У диэлектриков с газовыми включениями tgδ растет при увеличении напряжения вследствие ионизации газа. Поэтому пористые диэлектрики непригодны для высоковольтной аппаратуры. У гигроскопичных материалов tgδ имеет повышенное значение, так как вода является источником свободных ионов.

Величина tgδ неоднородных и композиционных диэлектриков зависит от природы и распределения включений, специальных

наполнителей. Значение tgδ слоистых пластмасс может изменяться в широких пределах в зависимости от количественных соотношений компонентов, достигая нескольких единиц.

Наименьшие потери характерны для диэлектриков с мгновенными видами поляризации, имеющих плотную однородную структуру и минимальное содержание примесей. К таким материалам относятся полистирол, полиэтилен, фторопласт-4, трансформаторное масло, слюда, высокочастотный стеатит и др. Особенно высокие требования предъявляются к диэлектрикам, применяемым на высоких частотах и в высоковольтной аппаратуре.

2. Описание методики измерений

Возможны два варианта выполнения настоящей лабораторной работы. В первом случае это реальный прибор с реальными образцами диэлектрических материалов. Во втором случае используются программная модель прибора - куметр (виртуальный прибор) и программные (виртуальные) модели диэлектрических материалов, при этом работа выполняется на персональном компьютере. Вариант выполнения работы, диэлектрические материалы, диапазоны частот и температур для исследования задаются преподавателем.

Принцип выполнения лабораторной работы с помощью реального и (или) виртуального прибора - куметра остается неизменным. Измеряется емкость образцового конденсатора и добротность контура без образца диэлектрика и с подключенным образцом. Затем по формулам производят расчет параметров диэлектриков. Приведенное далее задание к лабораторной работе остается неизменным в любом варианте ее выполнения

2.1. Выполнение лабораторной работы на измерительном куметре

Куметром называется прибор, позволяющий измерять добротность колебательного контура, индуктивность катушек, емкость и добротность конденсаторов. Добротность диэлектрической изоляции представляет собой величину, обратную tg δ, т.е.

$$Q=1/\operatorname{tg}\delta.$$

Функциональная схема куметра приведена на рис. 6. Она включает в себя следующие элементы:

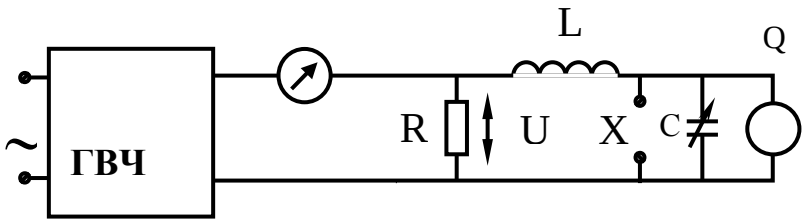


Рис. 6. Функциональная схема куметра

ГВЧ – генератор высокой частоты; R=0.04 Ом – постоянное сопротивление; L – сменные образцовые катушки индуктивности; X – зажимы для подключения образца; C – образцовый конденсатор переменной емкости на 25 – 450 пФ; Q – вольтметр с высоким входным сопротивлением, проградуированный в значениях добротности. С помощью образцового конденсатора переменной емкости можно добиться резонанса на заданной частоте в последовательном контуре L и C с подключенным испытуемым образцом.

В момент резонанса напряжение на образцовом конденсаторе U_c в Q раз больше подводимого к контуру напряжения U, т.е.

$$U_c = QU. \qquad (5)$$

Добротность контура при резонансе определяется по формуле:

$$Q = \omega L / r_k , \qquad (6)$$

где r_k – активное сопротивление контура, ω – частота.

При подключении испытуемого образца с потерями к зажимам образцового конденсатора происходит возрастание активного сопротивления контура при резонансе и, следовательно, уменьшение его добротности. Добротность контура можно определить, зная напряжения U и U_c. Напряжение U_c измеряют вольтметром с большим входным сопротивлением. Подводимое напряжение находится в пределах 0.01 – 0.02 В. Величина этого напряжения зависит от тока, протекающего через резистор R. Следовательно, и показание вольтметра, проградуированного в единицах добротности, зависит от этого тока. Шкала прибора, регистрирующего ток в цепи с сопротивлением R, проградуирована в значениях добротности. Процесс измерения ε и tg δ состоит в определении добротности контура Q_1 и емкости образцового конденсатора C_1 без испытуемого

образца в момент резонанса при заданной частоте и определении значений Q_2 и C_2 при наличии образца. По этим величинам вычисляют tg δ и емкость испытуемого образца.

В работе измерение ε и tg δ диэлектриков производится при помощи куметра Е9 – 4, принцип работы которого изложен выше.

Процесс измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь состоит в следующем.

1. К клеммам L_x на верхней панели прибора подключают одну из измерительных катушек индуктивностей, к клеммам C_x подсоединяют провода без образца. Провода установлены медные жесткие, в виде круглых шин диаметром 3 – 4 мм, покрытых серебром для уменьшения потерь. Расстояние между проводами в процессе измерения емкости и tg δ поддерживают неизменным. Контакты в местах соединений должны быть надежными.

2. Переключатели рода работ устанавливают в положение «Измерение», ручку «Уровень» - в крайнее левое положение. Включают тумблер питания.

3. Переключатель диапазонов Q устанавливают в положение «60». Переключатель рода работ – в положение «Уст. нуля». Ручками «Нуль» и «Нуль уровня» устанавливают нули приборов.

4. Переводят переключатель рода работ в положение «Калибровка». Ручкой «Уровень» устанавливают стрелку прибора на красную риску, а потенциометром «60» стрелку Q вольтметра – на риску «60». Таким же методом устанавливают нуль и откалибровывают шкалы «200» и «600», регулируя соответствующие потенциометры.

5. Переключатель рода работ устанавливают в положение «Измерение».

6. С помощью основного и подстроечного конденсаторов настраивают контур в резонанс и отсчитывают значение емкости C_1 с точностью до десятых долей пикофарад и добротности Q_1. При этом поддерживают стрелку прибора «Уровень» на красной риске.

7. Подключают образец диэлектрика с помощью соединительных проводов и вновь настраивают контур в резонанс с помощью основного и подстроечного конденсаторов. Резонансная емкость контура остается прежней. Производят отсчет Q_2 и C_2. Так как емкость испытуемого образца C_x и емкость измерительного конденсатора C_2 включены параллельно, то должно быть выполнено условие

$$C_x+C_2=C_1, \qquad (7)$$

где C_1 является резонансной емкостью контура, настроенного на

заданную частоту.

8. Таким образом, емкость испытуемого образца

$$C_x=C_1-C_2. \quad (8)$$

Если производится испытание плоского образца, то относительную диэлектрическую проницаемость можно определить из формулы:

$$C_x=\varepsilon\varepsilon_o S/h, \quad (9)$$

где $\varepsilon_o=8.854*10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная вакуума; S – площадь меньшего электрода, м^2; h – толщина образца, м.

Если C_x выразить в пикофарадах, то

$$\varepsilon=0.113C_x h/S. \quad (10)$$

В работе верхний электрод имеет форму цилиндра диаметром $5*10^{-2}$ м, нижний – форму пластины. Испытуемый образец располагается между этими электродами.

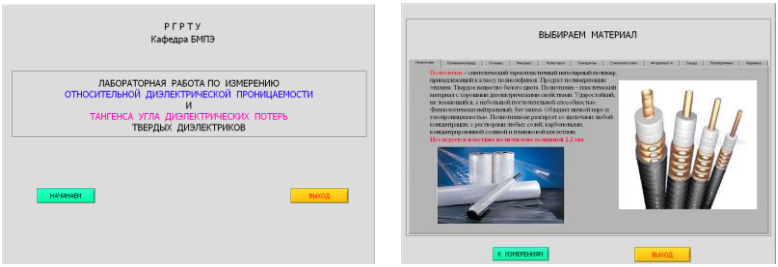
Тангенс угла диэлектрических потерь определяется по формуле:

$$\operatorname{tg}\delta=(Q_1-Q_2)C_1/Q_1Q_2(C_1-C_2). \quad (11)$$

2.2.Выполнение лабораторной работы на виртуальном куметре

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков с использованием прибора – измерителя добротности (куметра). Для этого применяется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда диэлектриков в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора куметр. Принцип измерения ε и tgδ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе. Для начала работы необходимо запустить файл «Танг_диэл» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.7, а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 7, б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного материала диэлектрика.



а б

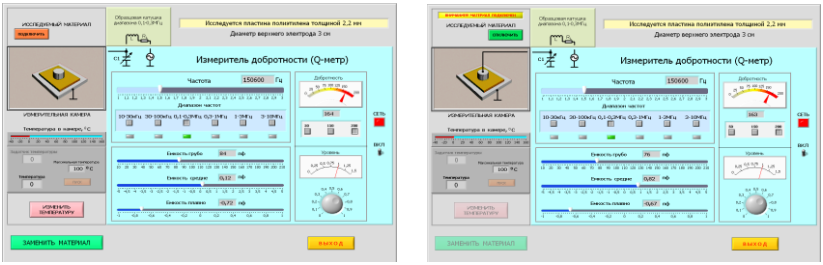
Рис. 7. Внешний вид окна начала работы (а) и выбора материала диэлектрика для исследования (б)

Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения параметров выбранного диэлектрика, показанное на рис. 8. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображаются схема подключения исследуемого образца диэлектрика и используемые при этом электроды.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 0 ^{0}C. Измерение ε и tgδ диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.

1. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на 1.
2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.
3. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность», добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1. Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.



а б

Рис.8. Внешний вид окна для проведения измерений без подключенного к куметру исследуемого образца диэлектрика (а) и с подключенным образцом диэлектрика (б)

4. Подключить образец диэлектрика щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2 , измеренным при подключенном в контур диэлектрике.

5. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с п. 1 - 3 и продолжить в соответствии с п. 4,5.

6. При необходимости выбрать другой диэлектрик, используя кнопку «Заменить материал».

Расчет параметров (C_x, ε и tgδ) по соотношениям (7) - (10) полностью соответствует приведенному в п. 8 раздела 2.1 методических указаний.

3. Задание по выполнению лабораторной работы

1. Произвести измерение тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости материалов по указанию преподавателя.

2. Результаты измерений и расчетные данные свести в таблицу по приведенному ниже образцу.

3. Построить зависимости ε(f), tgδ(f).

Наименование материала	Толщина h, м	Частота, Гц	C_1, пФ	C_2, пФ	C_x, пФ	Q_1	Q_2	ε	tgδ

4. Содержание отчета

1. Наименование работы.

2. Цель работы.

3. Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).

4. Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.

5. Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными.

Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

Контрольные вопросы

1. На какие свойства диэлектрика влияет дипольный момент молекул ?

2.Чем отличается полярная молекула от неполярной?

3.Что такое поляризация и какие свойства диэлектрика характеризует это явление?

4. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости.

5. Охарактеризуйте основные виды поляризации.

6. Какие виды поляризации присущи полярным и неполярным диэлектрикам?

7. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (поливинилхлорида).

8. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (электрофарфора).

9. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного диэлектрика с дипольно-релаксационной, спонтанной поляризациями и неоднородной структурой (сегнетокерамики).

10. Что такое потери энергии в диэлектриках, какими параметрами они характеризуются?

11. Охарактеризуйте основные виды диэлектрических потерь.

12. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для неполярно-

го диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (поливинилхлорида).

13. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического поля для неполярного диэлектрика (полиэтилена) и полярного с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (полиэтилентерефталата).

14. Нарисуйте в одних и тех же координатных осях зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты электрического поля для неполярного диэлектрика (политетрафторэтилена) и полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (ультрафарфора).

15. Нарисуйте зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты электрического поля для полярного диэлектрика с преобладанием дипольно-релаксационной поляризации (полиметилметакрилата).

16. Нарисуйте зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты электрического поля для полярного диэлектрика с ионно-релаксационной поляризацией и неоднородной структурой (радиофарфора).

Библиографический список

1. Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие.- Рязань: РГРТУ, 2015. - 48 с.

2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

3. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 383 с.

5. Вихров С.П., Холомина Т.А. Материаловедение /под ред. Ю.М. Солдака: учеб.пособие.– Рязань: РГРТУ, 2006. –160 с.

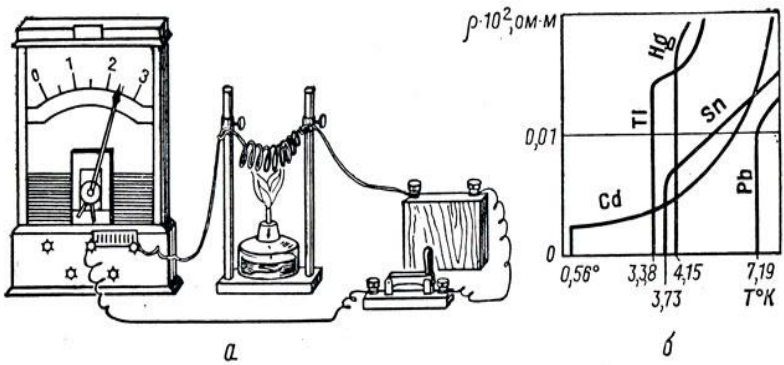
6. Справочник по электротехническим материалам / под. ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М.: Энергия, 1974. Т.1. – 583 с.

5022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ

Методические указания к лабораторной работе № 20



Рязань 2016

УДК 621.382

Исследование зависимости удельного сопротивления металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов: методические указания к лабораторной работе № 20; сост.:
С.И. Мальченко, Т.А.Холомина, А.Ю.Холомин / Рязан. гос. радиотехн. ун-т.- Рязань, 2016. 12 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях влияния температуры и концентрации компонентов на величину удельного сопротивления металлических сплавов, а также методика выполнения лабораторной работы при помощи виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Табл.5. Ил. 19. Библиогр.: 6 назв.
Сплавы, удельное сопротивление, температура, концентрация
Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.
Рецензент: Региональный центр зондовой микроскопии (коллективного пользования) при кафедре микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (директор центра Н.В.Вишняков)

Исследование зависимости удельного сопротивления металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
Х о л о м и н Александр Юрьевич

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В.Макушина
Подписано в печать 16. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 0,75.
Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: исследование зависимости удельного сопротивления двухкомпонентных металлических сплавов от температуры и концентрации компонентов.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Природа электропроводности металлов и сплавов

Классическая электронная теория металлов представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из коллективизированных свободных валентных электронов. К электронному газу применялись представления и законы обычных газов. Это привело к выводу законов Ома и Джоуля - Ленца, позволило описать и объяснить ранее обнаруженные экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах.

Однако исчерпывающее объяснение явлений электропроводности оказалось возможным на основе квантовой механики. В соответствии с квантово-механическими представлениями причиной наличия электрического сопротивления твердых тел является не столкновение свободных электронов с атомами решетки (как в классической теории Друде), а рассеяние их на дефектах решетки, вызывающих нарушение периодичности потенциала. Идеально правильная, бездефектная неподвижная решетка не способна рассеивать свободные носители заряда и поэтому должна обладать нулевым сопротивлением.

Подвижность и длина свободного пробега электронов в твердом теле зависят от структуры материала. Чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления ρ. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ. С позиций квантовой механики рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона. Нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн де Бройля. В металлическом проводнике, где длина волны электрона порядка 5Å, микродефекты создают значительное рассеяние. Это уменьшает подвижность электронов и длину свободного пробега и, следовательно, приводят к росту ρ. Так как в металлах концентрация электронного газа и практически не зависит от температуры (T), то зависимость удельного сопротивления ρ (и обратной величины удельной электропроводности σ) от температуры полностью определяется температурной зависимостью подвижности (μ) и пропорциональной ей длины свободного пробега электронов (λ).

Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшается среднестатистическая длина свободного пробега λ, уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 1)

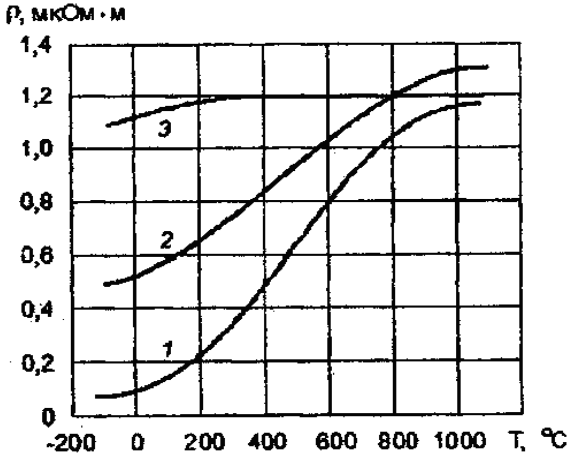


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры: 1 - железо; 2 - электротехническая сталь с содержанием 4 % Si; 3 - сплав Fe-Ni-Cr

1.2. Удельное сопротивление металлов и сплавов

Связь плотности тока J, А/м² и напряженности E, В/м электрического поля в проводнике описывается формулой

$$J = \gamma \cdot E \qquad (1.1)$$

- (дифференциальная форма закона Ома); где γ, См/м – параметр проводникового материала, называемый его *удельной проводимостью.*

В соответствии с законом Ома в области слабых полей γ не зависит от напряженности электрического поля E при изменении последней в весьма широких пределах.

Величина

$$\rho = \frac{1}{\gamma}, \qquad (1.2)$$

обратная удельной проводимости и называемая *удельным сопро-*

тивлением, для имеющего сопротивления R проводника длиной l с постоянным поперечным сечением S вычисляется по формуле

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l}. \qquad (1.3)$$

Диапазон значений удельного сопротивления ρ металлических проводников (при нормальной температуре) довольно узок: от 0,016 Ом·мм²/м для серебра и до примерно 10 Ом·мм²/м для железохромоалюминиевых сплавов, т. е. он занимает всего три порядка [1]. Ниже в таблице приведены значения удельного сопротивления различных металлов, расположенных в алфавитном порядке.

Величину удельного сопротивления металлического проводника на основании электронной теории металлов можно определить следующим образом

$$\rho = \frac{2 \cdot m \cdot \upsilon_T}{e^2 \cdot n \cdot l_{\text{ср}}}, \qquad (1.4)$$

где m – масса электрона, υ_T - средняя скорость теплового движения электрона внутри металлического проводника, $l_{\text{ср}}$ - средняя длина свободного пробега электрона.

В результате преобразования выражения для удельного сопротивления на основе выводов квантовой волновой механики получают соотношение

$$\rho = \frac{h}{K \cdot e^2 \cdot n^{\frac{2}{3}} \cdot l_{\text{ср}}}, \qquad (1.5)$$

где h - постоянная Планка, К – числовой коэффициент.

Таблица1. Значения удельных сопротивлений проводников

Материал проводника	Удельное сопротивление ρ в $\frac{\text{ом} \times \text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,015
Медь	0,0175
Золото	0,023
Алюминий	0,028
Натрий	0,047
Вольфрам	0,05
Железо	0,13
Свинец	0,2
Никелин (сплав меди, никеля и цинка)	0.42

Для различных проводников скорости хаотического движения примерно одинаковы. Незначительно отличаются также и концентрации свободных электронов, так, например, для меди и никеля разница составляет менее 10%. Поэтому величина удельного сопротивления в основном зависит от средней длины свободного пробега электрона в данном проводнике, которая в свою очередь зависит от строения проводника, его структуры.

Чистые металлы с совершенной кристаллической решеткой характеризуются наименьшим удельным сопротивлением; примеси, искажая решетку, приводят к его увеличению.

К такому же выводу можно прийти, имея в виду волновую природу электронов. Рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона. В металлическом проводнике, где длина волны электрона около 5Å, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов, а следовательно, приводят к росту удельного сопротивления материала.

Число свободных носителей заряда (концентрация электронов) с увеличением температуры в металлическом проводнике остается неизменным. Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения электронов, т. е. уменьшается длина свободного пробега, и подвижность электронов понижается. Поэтому удельное сопротивление металлов с повышением температуры окружающей среды повышается (рис. 1). Скачки удельного сопротивления объясняются изменением агрегатного состояния вещества при изменении температуры.

Изменение зависимости удельного сопротивления от температуры, приведенное на рис. 2, для различных металлов и в разных температурных областях неодинаково. В узкой области 1, составляющей несколько градусов, у ряда металлов может наступить состояние сверхпроводимости и на рисунке виден скачок удельного сопротивления при температуре $T_{СВ}$. У теоретически совершенно чистых металлов удельное сопротивление должно бы стремиться к 0 (пунктирная кривая), а у технически чистых металлов, не обладающих сверхпроводимостью, оно должно определяться только рассеянием носителей заряда на примесях и так как $\rho_{чист} << \rho_{прим}$, то $\rho \cong \rho_{прим}$ (верхняя кривая на этом участке). Чем чище металл, тем область 1 меньше как по абсциссе, так и по ординате. Зависимость «остаточного» сопротивления от чистоты металлов очень резкая и ее можно использовать для определения наличия примесей в металле, например, по отношению

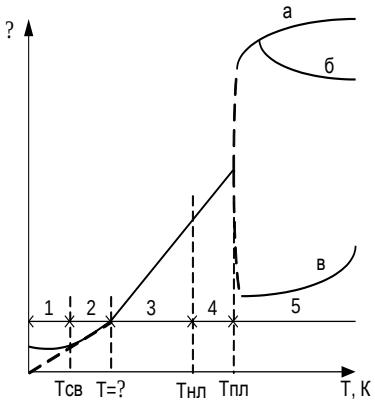


Рис. 2. Теоретическая зависимость удельной электропроводности металлических сплавов от температуры

удельного сопротивления металла при комнатной температуре к его удельному сопротивлению при температуре кипения жидкого гелия (4,2К). Чем это отношение для одного и того же технического металла больше, тем чище металл.

В пределах области 2 наблюдается быстрый рост удельного сопротивления $\rho \sim T^n$, где n – может быть до 5 и убывает с ростом температуры ~ до 1 при $T = \theta$. В этой области рост удельного сопротивления с ростом температуры определяется включением все новых и новых частот тепловых колебаний (фононов) кристаллической решетки металлов, которое заканчивается при температуре $T = \theta$. Для большинства металлов θ лежит в пределах 100 - 400К. В области 3 наблюдается практически линейный участок роста удельного сопротивления за счет линейного возрастания с температурой амплитуд колебаний узлов кристаллической решетки.

В области 4, начало которой условно отмечено температурой $T_{НЛ}$, отмечается отступление от линейной зависимости. Для многих металлов этот участок кривой невелик и находится вблизи от температуры плавления ($T_{ПЛ}$) металла. Для некоторых переходных и редкоземельных металлов он может начинаться значительно раньше, чем показано на рисунке, т. е. удельное сопротивление металла как бы приходит к некоторому насыщению. Область 5, начинающаяся с $T_{ПЛ}$, характеризует изменение удельного сопротивления в точке плавления и расплавленного металла.

Примеси и нарушения правильной структуры металлов ведут к

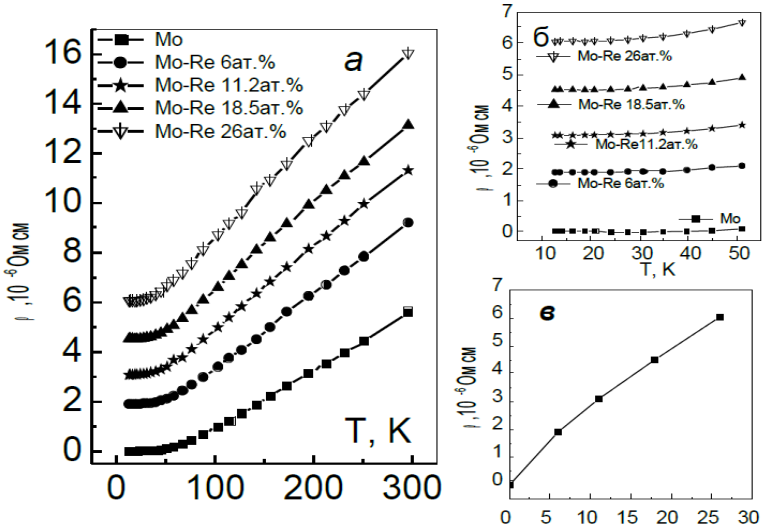


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления сплава молибден-рений от температуры и концентрации компонентов, полученная экспериментально[2]

увеличению их удельного сопротивления. Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют твердый раствор, т.е. создают при отвердевании совместную кристаллизацию и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого. Зависимость удельного сопротивления сплава молибден-рений от температуры и концентрации компонентов, полученная экспериментально, и представлена на рис. 3.

Зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих твердый раствор, от процентного содержания компонентов каждого из них представлена на рис. 4 (кривая а).

Кривая имеет максимум, соответствующий некоторому соотношению содержания компонентов в сплаве; при уменьшении содержания каждого из них ρ падает, приближаясь к соответствующим значениям ρ чистых металлов. Такому изменению соответствует кривая, изображенная на рис. 3 (кривая а).

Обычно наблюдается определенная закономерность и в изменении *ТК*ρ (*ТК* - температурный коэффициент). Относительно высокими значениями *ТК*ρ обладают чистые металлы, а у сплавов *ТК*ρ меньше и даже может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения (рис. 3 , кривая б). Это объясняется тем, что у спла-

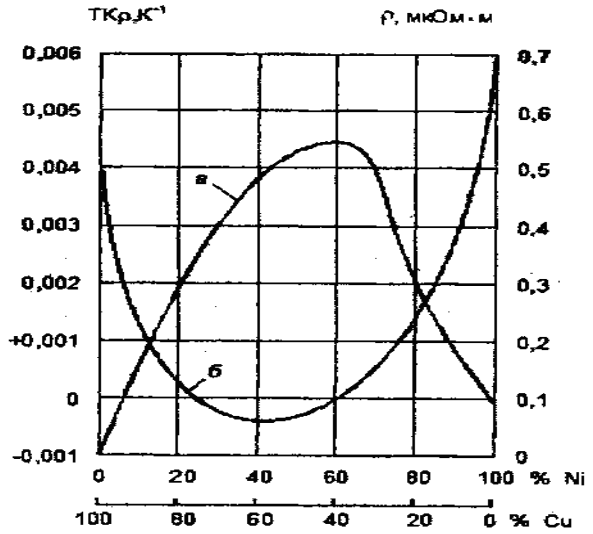


Рис. 4. Зависимость ρ (а) и ТКρ (б) сплавов системы Cu-Ni от состава (в процентах по массе) [1]

вов изменение ρ вызывается не только изменением подвижности носителей заряда, но в некоторых случаях и возрастанием концентрации носителей при повышении температуры.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется на персональном компьютере, на котором специальной программой смоделирована исследовательская установка и сформированы математические модели изменения удельной электропроводности различных сплавов в зависимости от температуры. Предполагается, что исследуется тонкая проволока определенной длины и диаметра из соответствующего сплава, помещенная в измерительную камеру (в данном случае в виртуальную камеру). В измерительной камере температура изменяется в широких пределах от 10 до 500 ^{o}К. Через исследуемый образец пропускается стабильный ток от прецизионного генератора тока и милливольтметром измеряется падение напряжения на исследуемом образце. Величина измерительного тока ограничивается джоулевым разогревом исследуемого образца и для проводника диаметром 0,1 – 0,3 мм ток не должен превышать десятков миллиампер.

Программа запускается двойным щелчком по ярлыку на «Рабочем столе» с названием «**Уд_сопр_мет**.» Появляется приветственное окно программы и предлагается варианты дальнейших действий. Управление программой происходит по обычным принципам управления, принятой в операционной системой Windows. В случае желания продолжать выполнение лабораторной работы во вновь появившемся окне следует по указанию преподавателя щелчком левой кнопки мыши по соответствующей закладке выбирать образец для исследования.

Для перехода к измерениям следует использовать кнопку «**К измерениям**». При этом появляется окно с виртуальной установкой (рис. 5) для исследования зависимости удельной электропроводности от температуры. Необходимо щелчком левой кнопки по изображению тумблеров включить все приборы и следовать перечисленным ниже пунктам.

2.1.1. Установить на «Цифровом задатчике тока» величину тока для исследования по указанию преподавателя путем ввода в соответствующие окна необходимых значений или использования элементов управления «инкремент – декремент» у соответствующих окон.

2.1.2. По указанию преподавателя установить параметры исследуемого образца в соответствующем разделе виртуального стенда. Здесь же можно установить процентный состав исследуемого сплава.

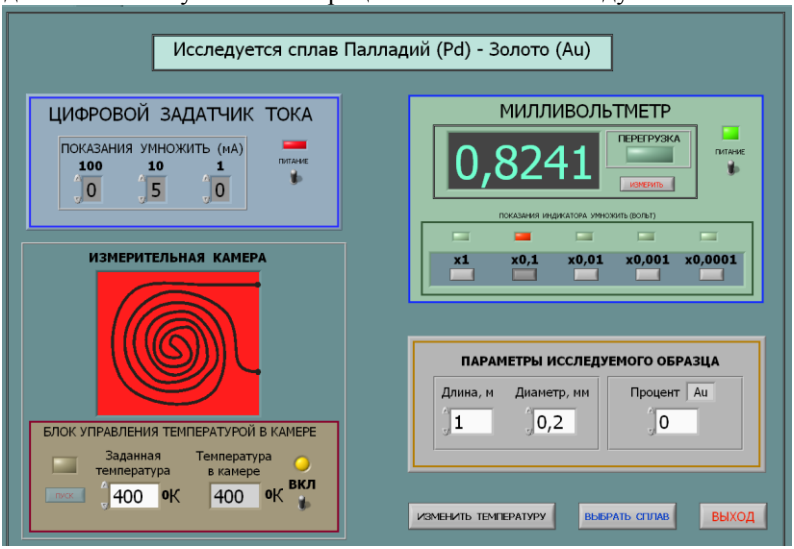


Рис.5. Окно виртуальной установки для исследования

2.1.3. Задать необходимую температуру в камере. Для этого щелкнуть по кнопке «**Изменить температуру**» и в «**Блоке управления температурой в камере**» задать температуру путем прямого ввода данных в окно «**Заданная температура**» или используя элементы управления «**инкремент - декремент**». После этого используя кнопку «**Пуск**», запустить процесс изменения температуры. Дождаться выхода измерительной камеры на нужную температуру и после этого можно переходить к измерениям.

2.1.4. Для проведения измерений достаточно щелкнуть на передней панели милливольтметра по кнопке «**Измерить**» и зафиксировать полученные значения напряжения на образце. После этого необходимо определить сопротивление образца и по его размерам рассчитать удельное сопротивление.

3. Порядок выполнения лабораторной работы

3.1. Получить у преподавателя задание на тип исследуемого металлического сплава и диапазон температур для исследования.

3.2. Запустить файл с программой и выбрать заданный сплав для исследования (раздел 2.1).

3.3. Перейти в окно виртуальной исследовательской установки, включить все приборы и с учетом раздела 2.1 приступить к выполнению работы.

3.4. Установить необходимые значения размеров исследуемого образца, процентное содержание компонентов в сплаве, величину тока, температуру в измерительной камере (раздел 2.1.3 и щелкнуть по кнопке «**Измерить**». В процессе измерения необходимо выбирать оптимальный диапазон шкалы прибора.

3.5. Рассчитать удельное сопротивление образца и занести его значение в таблицу с указанием температуры образца и концентрации компонентов.

3.6. Построить графическую зависимость удельного сопротивления исследованных образцов от температуры.

3.7. Построить графическую зависимость удельного сопротивления исследованных образцов от процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре.

3.8. Оформить полученные результаты в виде таблиц и графиков.

4. Содержание отчета

1) Наименование работы.
2) Цель работы.

3) Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).
4) Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
5) Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными [5].

5. Контрольные вопросы

Каковы основные отличия проводниковых материалов от непроводниковых?

Какая структура наиболее характерна для металлов и сплавов?

Какой тип химической связи характерен для металлов?

Какие типы пространственных кристаллических решеток наиболее характерны для металлов и сплавов?

Объясните используемую методику измерения зависимости удельного сопротивления проводниковых материалов от температуры и процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре.

Объясните физическую природу зависимости удельного сопротивления проводниковых материалов от температуры и процентного содержания компонентов сплавов при заданной температуре

Обоснуйте правильность (ошибочность) полученных экспериментальных результатов.

Расскажите о применении проводниковых материалов (металлов и сплавов) в приборостроении, радиоэлектронике, медицине.

6. Библиографический список

1.Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.- 383 с.

2. Игнатьева Т.А., Великодный А.Н., Саньков А.А. О температурной зависимости удельного сопротивления сплавов Mo-Re, Mo-Re-Nb// Вопросы атомной науки и техники. Серия: вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2004. (14), № 6.- С. 89-92.

3.Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение металлов и сплавов: учеб. пособие. – Рязань: РГРТА, 2014. – 84 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб. пособие. – Рязань: РГРТА, 2013. – 96 с.

5.Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - М.: Энергия, 1974. - 583с.

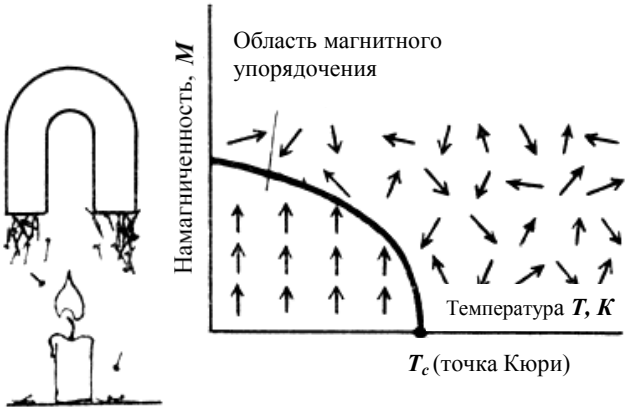
5085

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 7



Рязань 2016

УДК 621.382

Исследование свойств магнитных материалов: методические указания к лабораторной работе № 7/ сост.: С.И. Мальченко, Т.А. Холомина, М.В. Зубков, А.В. Логвин / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; Рязань, 2016. 20 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов перемагничивания ферромагнетиков и явлениях возникновения потерь энергии в магнитных материалах. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего магнитные характеристики пермаллоя, а также виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Табл. 6. Ил. 11. Библиогр.: 4 назв.

Ферромагнетики, парамагнетики, магнитомягкие материалы, магнитные потери

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав.кафедрой Т.А.Холомина)

Исследование свойств магнитных материалов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
З у б к о в Михаил Владимирович
Л о г в и н Антон Валерьевич

Редактор М.Е.Цветкова
Корректор С.В.Макушина
Подписано в печать 15.11.16. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение свойств ферромагнитных материалов: построение основной кривой магнитной индукции в переменном поле; исследование зависимости магнитной проницаемости от температуры, напряженности и частоты магнитного поля, а также зависимости мощности потерь на вихревые токи и гистерезис от частоты.

1. Краткие теоретические сведения

Все вещества в природе являются магнетиками, т.е. обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств атомов, молекул и их групп.

Магнитные свойства атома в основном определяются магнитными свойствами электронов. Магнитный момент атомного ядра приблизительно в тысячу раз меньше магнитного момента электронной оболочки атома. Магнитный момент электрона возникает вследствие движения электрона по орбите (орбитальный момент) и наличия у него спина (спиновый момент). Магнитный момент многоэлектронного атома представляет собой сумму магнитных моментов всех электронов, включая как орбитальные моменты, так и спиновые.

В соответствии с современными представлениями о магнетизме различают следующие основные типы магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм (нескомпенсированный антиферромагнетизм). Вещества, в которых проявляются эти явления, называются слабомагнитными *(диамагнетики, парамагнетики антиферромагнетики)* либо сильномагнитными (*ферромагнетики и ферримагнетики).* Схематическое расположение моментов электронов атомов для разных по магнитным свойствам веществ иллюстрируется рис. 1.

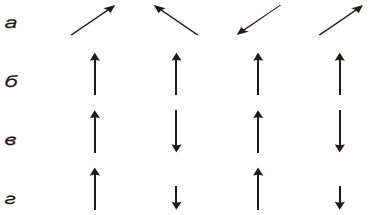


Рис. 1. Схематическое расположение спинов в парамагнитных (*а*), ферромагнитных (*б*), антиферромагнитных (*в*) и ферримагнитных (*г*) веществах. Диамагнетикам свойственна полная взаимная компенсация магнитных моментов атомов.

Основными магнитными параметрами вещества являются: намагниченность M, А/м; $M = \kappa\vec{H}$, где κ – магнитная восприимчивость; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м. Магнитная индукция B, Тл (тесла), характеризует суммарное магнитное поле внутри материала:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1+\kappa)\vec{H} = \mu_0\mu\vec{H} = \mu_a\vec{H}\,, \qquad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, численно равная $4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м, характеризующая магнитную проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума (величина безразмерная); $\mu_a = \mu_0\mu$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Отдельные классы магнетиков различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости, а также по характеру зависимости магнитных характеристик от температуры и напряженности магнитного поля.

Диамагнетиками называют вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов.

Физическая природа диамагнетизма основана на классическом представлении об атоме как системе электронов, движущихся вокруг ядра по определенным замкнутым траекториям-орбитам с некоторой угловой скоростью.

Атомная магнитная восприимчивость κ диамагнетиков имеет порядок $\kappa \approx -(10^{-6} - 10^{-5})$, т.е. соответствует величине, измеряемой экспериментально, и не зависит от температуры. Магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu \approx 0{,}99999$ и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Диамагнетизм является результатом прецессии всех электронов атомов и молекул, поэтому присущ всем веществам, но проявляется только в том случае, если не перекрывается более сильными пара- и ферромагнетизмом.

К диамагнитным веществам относятся водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Cu, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Mg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Парамагнетиками называются вещества, атомы которых обладают небольшими магнитными моментами обычно за счет нечетного количества валентных электронов. Поскольку все заполненные электронные оболочки имеют нулевой полный момент

количества движения, они обладают также нулевым полным магнитным моментом.

При обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты атомов располагаются статистически равновероятно относительно любого направления и суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием сильного внешнего магнитного поля и (или) низкой температуры создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, т.е. тело оказывается намагниченным, однако при обычных полях и температурах намагниченность парамагнетиков очень мала. Магнитная восприимчивость их положительна и имеет значение $\kappa \sim (10^{-5} - 10^{-2})$, относительная магнитная проницаемость $\mu \approx \approx 1{,}001$.

На рис. 2, а показана зависимость намагниченности *M(H)* для диа- и парамагнетиков при слабых полях и при обычных или высоких температурах. В обоих случаях значение *M* пропорционально *H*, что свидетельствует о независимости κ от *H*. Для намагничивания парамагнетиков до насыщения (рис. 2, б), т.е. до состояния, когда все элементарные магнитные моменты будут параллельны внешнему полю, требуется при комнатной температуре поле напряженностью примерно 10^{11} А/м, а при $T = 1$ К - примерно $3 \cdot 10^5$ А/м. Однако в последние годы выяснилось, что в парамагнетиках можно создать высокую намагниченность, не прибегая к сильным магнитным полям, а используя поток квантов света (оптическую накачку).

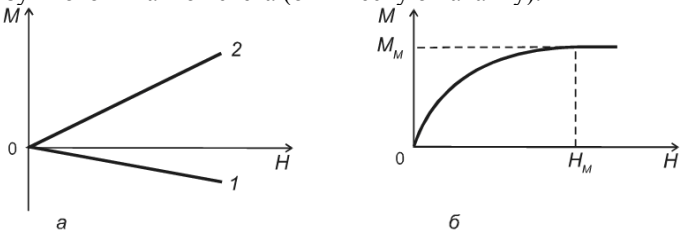


Рис. 2. Зависимость намагниченности *M* от напряженности магнитного поля *H*: *а* - для диамагнетиков *(1)* и парамагнетиков *(2)*; *б*- для парамагнетиков при низких температурах или очень сильных полях

С повышением температуры при неизменной напряженности поля возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул, и поэтому намагниченность убывает. Парамагнетики отличаются тем, что они втягиваются в неоднородное магнитное поле.

К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, Al, Cr, Mo, Mn, Pt, Pb и др.

Парамагнетизм в атомах или ионах не существует в одиночку: одновременно с ним всегда имеют место и диамагнитные свойства. Поскольку оба эти эффекта противоположны друг другу по знаку, суммарные магнитные свойства материала определяются преобладающим. У большинства материалов величина парамагнитной восприимчивости значительно больше диамагнитной, т.е. парамагнетизм обычно преобладает над диамагнетизмом.

Парамагнитные вещества используются в качестве рабочих тел в квантовых парамагнитных усилителях и генераторах.

Антиферромагнетики – это вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, поэтому имеет место их взаимная компенсация. Магнитная восприимчивость антиферромагнетиков мала и составляет $\kappa \approx (10^{-5} - 10^{-3})$. В слабых полях κ и μ практически не зависят от напряженности внешнего магнитного поля, в сильных являются сложной функцией напряженности поля. В некоторой степени свойства антиферромагнетиков схожи со свойствами парамагнетиков. Пара- и антиферромагнитные вещества объединяют положительная магнитная восприимчивость и компенсация магнитных моментов атомов. Различие заключается в том, что спиновые моменты парамагнетиков ориентированы хаотически, а антиферромагнетиков – параллельно друг другу.

К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, а также Cr и Mn; многие окислы, хлориды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца: MnO, $MnCl_2$, MnF_2, MnS_2 и др., аналогично на основе Fe, Co, Ni, Cr и др.

Ферромагнетиками называют вещества, характеризующиеся намагничиванием недостроенных внутренних оболочек атомов, поскольку магнитные моменты заполненных оболочек равны нулю, а внешние валентные электроны металла обобществлены. Такими элементами являются переходные металлы группы железа, имеющие недостроенную 3*d*-оболочку, и редкоземельные элементы с недостроенной 4*f*-оболочкой. Наличие магнитного момента у атомов обусловлено нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами, поскольку орбитальные магнитные моменты весьма малы.

Для ферромагнетиков энергетически выгодным в отсутствие внешнего поля является минимальное значение внутренней обменной

энергии, что соответствует параллельному расположению магнитных моментов соседних атомов внутри домена. Домен – это область сильномагнитного материала с суммарным магнитным моментом, складывающимся из элементарных параллельных магнитных моментов соседних атомов. Каждый домен состоит из миллионов элементарных ячеек с одинаковым направлением вектора, которые создают собственный магнитный момент домена. При этом магнитное поле вне кристалла уменьшается, в связи с чем энергия разделенного на домены монокристалла меньше, чем энергия однодоменного кристалла, что соответствует более устойчивому состоянию вещества с минимумом внутренней энергии. Суммарный магнитный момент всех доменных областей без приложения внешнего поля к ферромагнетику равен нулю. При внесении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно наблюдаются процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема).

В слабом поле происходит увеличение объема доменов, у которых магнитный момент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При отключении слабого магнитного поля положение границ доменов восстанавливается, т.е. процесс носит обратимый характер. При усилении поля изменения структуры доменов более значительны, и при отключении внешнего поля положение границ доменов не восстанавливается. Образуется остаточная индукция. При дальнейшем увеличении напряженности поля происходит изменение направления магнитного момента доменов от соответствующего оси легкого намагничивания к направлению, совпадающему с направлением внешнего поля. При этом магнитное состояние материала достигает

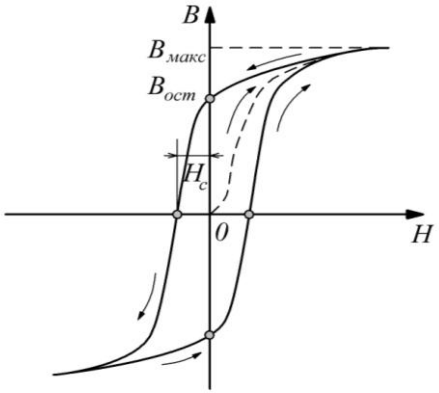


Рис. 3. Зависимость индукции от напряженности магнитного поля ферромагнетиков (петля гистерезиса), (H_c- коэрцитивная сила; $B_{ост}$- остаточная индукция)

технического насыщения. Поведение кривой *B(H)* при циклическом изменении внешнего магнитного поля имеет характерный вид, называемый петлей магнитного гистерезиса, как показано на рис. 3.

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется, его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 4. Сплошная кривая, проходящая по вершинам частных петель гистерезиса, называется нормальной (или основной) кривой индукции.

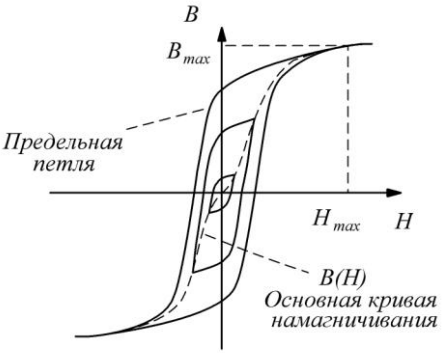


Рис. 4. Предельная петля гистерезиса и основная кривая намагничивания

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы поворота магнитных моментов некоторых доменов и задержка роста зародышей перемагничивания. Под ними понимают небольшие объемы вещества с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Основными параметрами петли гистерезиса являются индукция насыщения B_S (B_{max}), остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_C и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания (рис. 3). Остаточной называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после отключения внешнего поля. Коэрцитивная сила – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике.

По величине коэрцитивной силы различают магнитомягкие материалы с $H_C<100$ А/м и магнитотвердые с $H_C>10^4$ А/м.

Магнитную проницаемость вещества разделяют на абсолютную

$$\mu_a = \frac{B}{H} \qquad (2)$$

и относительную (в дальнейшем слово “относительная” будем опускать)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \qquad (3)$$

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

На рис. 5 представлена зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от напряженности магнитного поля, построенная на основе результатов измерения основной кривой намагничивания материала и соотношения (3). При увеличении напряженности магнитного поля магнитная проницаемость растет, затем при достижении состояния насыщения (максимально возможного значения индукции) снижается вследствие того, что индукция магнитного поля [числитель в соотношении(3)] остается практически неизменной, а напряженность поля (знаменатель) продолжает расти . При подстановке в соотношение (3) конкретных значений B и H получают различные виды магнитной проницаемости, которые применяют в технике (свыше нескольких десятков). Начальная магнитная проницаемость характеризует возможность использования ферромагнетика в слабых магнитных полях.

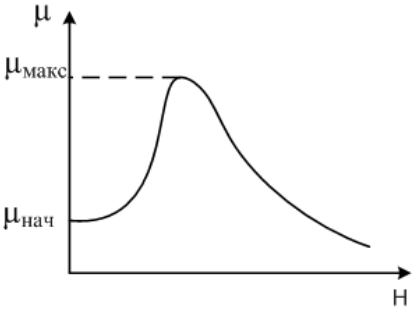


Рис. 5. Зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от напряженности магнитного поля

Максимальная магнитная проницаемость определяет соответствующее значение индуктивности катушки при использовании материала в качестве сердечника. Так, например, типичное значение магнитной проницаемости для листовой электротехнической стали $\mu_{нач}$=250 - 1000, а $\mu_{макс}$= 500 – 30000. Максимальная магнитная проницаемость, например, магнитомягкого сплава супермаллоя (79 % никеля, 5 % молибдена и 16 % железа)

может достигать 10^5.

Магнитная проницаемость сильномагнитных веществ зависит также от температуры и частоты магнитного поля [1,2].

Практический интерес представляет температурная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика. Характер этой зависимости оказывается неодинаковым для магнитной проницаемости, измеренной в слабых и сильных полях (рис. 6). Для начальной магнитной проницаемости наблюдается отчетливый максимум при температуре несколько ниже точки Кюри. Возрастание μ при повышении температуры обусловлено главным образом тем, что при нагревании ферромагнетика ослабляются силы, препятствующие смещению доменных границ и ориентации магнитных моментов доменов. Резкий спад магнитной проницаемости при температурах $T>T_к$ связан с резким уменьшением спонтанной намагниченности доменов вследствие перехода ферромагнетика в парамагнитное состояние (рис. 1, а).

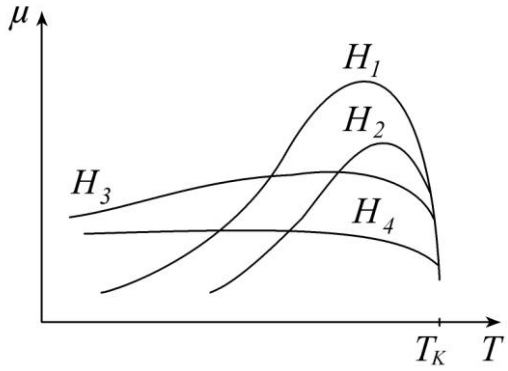


Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от температуры при разной напряженности магнитного поля: $H_1>H_2>H_3>H_4$

Снижение магнитной проницаемости с ростом частоты (рис.7) связывают с инерционностью процессов смещения доменных границ и увеличением мощности магнитных потерь [соотношения (4,5)] [1]. Видим, что с ростом начальной магнитной проницаемости снижается частота «спада» *f*, т.е. проявления инерционности процессов перемагничивания.

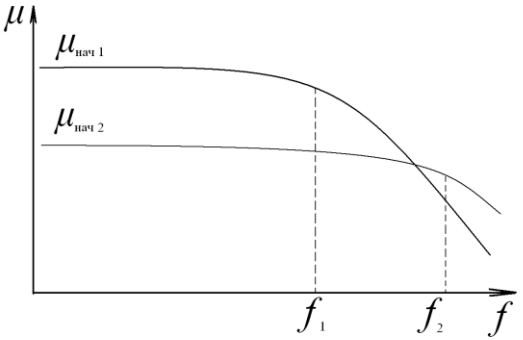


Рис.7. Зависимость магнитной проницаемости сильномагнитного материала от частоты

Феррримагнетиками (или нескомпенсированными антиферромагнетиками) называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, однако величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой.

К ферримагнетикам относятся ферриты, представляющие собой магнитную керамику, состоящую из смеси окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов. Структурная формула ферритов $MeO{\cdot}Fe_2O_3$, где Me – двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg и др.). Многие свойства ферримагнетиков качественно аналогичны свойствам ферромагнетиков, однако имеются и существенные различия. Например, ферримагнетики (ферриты) отличаются от ферромагнетиков меньшей величиной индукции насыщения и имеют более сложную температурную зависимость основных магнитных параметров.

Преимущества ферритов при работе в ВЧ- и СВЧ-диапазонах обусловлены тем, что их удельное электрическое сопротивление в 10^6 - 10^{11} раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, так как они являются оксидными материалами, а не металлами. По значению удельного электрического сопротивления ρ они относятся к классу полупроводников или диэлектриков. Вследствие этого вихревые токи (и соответствующая мощность магнитных потерь) [соотношение (5)] в ферритах очень малы, и они применяются в качестве магнитного материала при частотах до сотен

мегагерц, тогда как металлические магнитные материалы применяются при частотах до нескольких десятков мегагерц.

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость ферримагнетиков ниже, чем у ферромагнетиков, и достигают значений нескольких десятков тысяч.

При перемагничивании сильномагнитных материалов в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые ***потери энергии***. Они складываются из потерь на гистерезис и динамических потерь. В свою очередь, динамические потери включают в себя потери на вихревые токи и магнитное последействие. Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_{г} = \frac{f \oint HdB}{D}, \qquad (4)$$

где f – частота тока; D – плотность материала; $\oint HdB$ - площадь петли гистерезиса. Для снижения потерь на гистерезис применяют магнитомягкие материалы, для которых характерна узкая петля магнитного гистерезиса.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_{\text{в.т.}} = \frac{f^2 B_{\text{макс}}^2 d^2 \eta}{D\rho}, \qquad (5)$$

где η – коэффициент формы; d – толщина материала; $B_{макс}$ – максимальная индукция, достигаемая в начале цикла; ρ – удельное сопротивление материала. Следует подчеркнуть, что мощность потерь на гистерезис (перемагничивание) увеличивается пропорционально частоте, а на вихревые токи – пропорционально квадрату частоты электромагнитного поля.

В цепях переменного тока рассеяние мощности в катушках индуктивности иногда оценивают тангенсом угла магнитных потерь

$$\operatorname{tg}\delta_M = \frac{r}{\omega L}, \qquad (6)$$

где L – индуктивность катушки; r – сопротивление, эквивалентное всем видам потерь мощности в магнитном материале.

Частотный диапазон применения магнитных материалов в значительной степени определяется величиной их удельного сопротивления и значением магнитной проницаемости. Для сердечников катушек индуктивности и трансформаторов применяют металлические магнитомягкие материалы (железо, пермаллой). На высоких и сверхвысоких частотах применяют ферриты и

магнитодиэлектрики, обладающие высоким удельным сопротивлением и малым значением коэрцитивной силы. Для изготовления постоянных магнитов, устройств длительного хранения звука, изображения используют магнитотвердые материалы.

2. Описание методики измерений

В лабораторной работе предусмотрено два варианта выполнения. В первом случае это реальная лабораторная установка с образцом магнитного материала – сплавом пермаллой. С помощью осциллографического метода исследуются магнитные характеристики пермаллоя – основная кривая намагничивания, зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля и частоты, а также частотная зависимость мощности магнитных потерь. Во втором случае лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения магнитных свойств вещества на виртуальном стенде. Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В программу заложены модели характеристик ряда магнитных материалов и их зависимости от параметров внешнего магнитного поля.

2.1. Выполнение лабораторной работы с помощью осциллографического метода

Изучение ферромагнитных материалов производится с помощью установки, принципиальная схема которой приведена на рис. 8.



Рис. 8. Принципиальная схема установки для измерения параметров магнитных материалов в переменных магнитных полях

Здесь М – иссследуемый образец из ферромагнитного материала (пермаллой); R_0 - образцовое сопротивление, R_0=30 Ом; r - сопротивление фазовращателя, r =220000 Ом; С – конденсатор фазовращателя, С = 10^{-6} Ф; 2, 3 и 3, 4 – горизонтальный и

вертикальный входы осциллографа соответственно, 1 – вход сигнала с генератора .

Отклонение луча осциллографа по горизонтали пропорционально падению напряжения на R_0 (рис. 8), которое, в свою очередь, пропорционально величине намагничивающего тока.

Так как отклонение луча по горизонтали пропорционально приложенному напряжению, величину отклонения можно выразить в единицах измерения напряженности поля H. Масштаб по горизонтали определяется по формуле

$$h = \frac{\sqrt{2}U_0 n_1}{\pi r_{ср} R_0 x_0}, \qquad (7)$$

где x_0 – расстояние по горизонтали между вершинами гистерезисного цикла, м; U_0 – падение напряжения на R_0; n_1– число витков первичной обмотки испытуемого образца; $r_{ср}$ – средний радиус тороида, м.

Магнитная индукция B пропорциональна выходному напряжению $U_{вых}$, измеренному между точками 3 и 4 вертикального входа усилителя осциллографа. Можно проградуировать отклонение луча по вертикали в единицах измерения магнитной индукции.

Масштаб по вертикальной оси экрана осциллографа

$$b = \frac{2\sqrt{2}U_{вых} r \cdot C}{n_2 S \cdot y_0}, \qquad (8)$$

где y_0 - расстояние между вершинами гистерезисного цикла по вертикали, м.

Данные испытываемого образца:

$r_{ср} = 1{,}9\ 10^{-2}$ м – средний радиус образца;

$D = 8{,}9\ 10^3$ кг/м^3 – плотность материала образца (пермаллой);

$n_1 = 1200$ – число витков первичной обмотки;

$n_2 = 800$ – число витков вторичной обмотки;

$S = 0{,}42\ 10^{-4}$ м^2 – площадь сечения.

Описание методики измерений

Установить регулятор выходного напряжения генератора на нуль.

Выключить внутреннюю нагрузку генератора, а выходное сопротивление поставить на 6000 Ом. Установить частоту 50 Гц. Включить генератор и осциллограф. Рукояткой регулятора выходного напряжения генератора повысить напряжение и довести образец до насыщения, когда с ростом напряженности магнитного поля не наблюдается значительного увеличения магнитной индукции.

Регулировкой усиления по горизонтали и вертикали на осциллографе установить гистерезисную кривую так, чтобы размеры x и y между вершинами гистерезисной петли по горизонтали и вертикали были целочисленными в масштабной сетке используемого осциллографа, а сама петля гистерезиса занимала максимальную площадь на экране, что повышает точность измерений. При использовании осциллографа С1 – 64А размер петли – 8 на 8 клеток . В дальнейшем положение ручек усиления изменять нельзя до окончания всех измерений.

Градуировка осей осциллографа

Отключить осциллограф и генератор от схемы. Включить внутреннюю нагрузку генератора, выходное сопротивление поставить на 600 Ом. Соединить выход генератора с горизонтальным входом осциллографа. Рукояткой регулятора выходное напряжение генератора повысить так, чтобы максимальное отклонение луча соответствовало расстоянию между вершинами гистерезисной петли по горизонтали, полученной в режиме насыщения. Отметить напряжение по вольтметру генератора. Это напряжение равно U_0 в формуле (7).

Градуировку вертикальной оси произвести аналогичным образом с тем отличием, что напряжение с генератора подается на вертикальный вход осциллографа. Изменяя напряжение на выходе генератора, необходимо добиться отклонения луча по вертикали на экране осциллографа, соответствующего расстоянию между вершинами гистерезисной петли в режиме насыщения. Это напряжение $U_{вых}$ подставить в формулу (8) для расчета масштаба по вертикальной оси.

Определение потерь в образце ферромагнитного материала

Восстановить схему и зарисовать гистерезисную петлю на кальку. Удельные потери в образце за один период можно определить по формуле

$$W = \frac{P}{f} = \frac{Shb}{D}, \qquad (9)$$

где: P – потери в образце; S – площадь гистерезисной петли; D – плотность материала образца.

То же самое повторить для частот 100, 200, 300, 400 Гц. При этом с помощью регулятора напряжения генератора поддерживают постоянной напряженность магнитного поля таким образом, чтобы расстояние между вершинами петли гистерезиса по горизонтали оставалось неизменным при изменении частоты и соответствовало 8 на 8 клеток.

Результаты наблюдений и вычислений занести в табл. 1.

Таблица 1

Материал	*f*, Гц	S, м^2	W, Дж/кг	P, Вт/кг	$P_г$, Вт/кг	$P_{в.т}$, Вт/кг

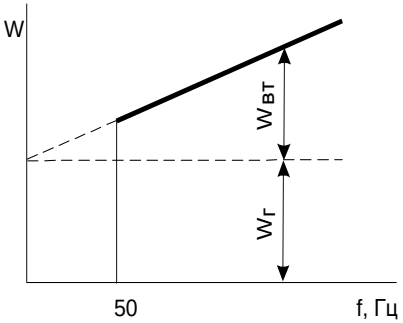


Рис. 9. Графический способ разделения удельных магнитных потерь на составляющие:
$W_{вт}$- удельные потери на вихревые токи;
$W_г$- удельные потери на гистерезис

По данным таблицы построить зависимость *W(f)*. Известно, что величина мощности потерь на гистерезис в ферромагнитном материале $P_г \sim f$, а на вихревые токи $P_{вт} \sim f^2$. Поэтому та часть ***удельных*** потерь, которая от частоты не зависит, характеризует потери на гистерезис, а часть ***удельных*** потерь, которая пропорциональна частоте, характеризует потери на вихревые токи (рис. 9). Построив по экспериментальным данным зависимость W от частоты, можно разделить удельные потери на $W_г$ и $W_{вт}$, после чего определить потери на гистерезис и вихревые токи при различных частотах

$$P_г = W_г \cdot f; \quad (10)$$

$$P_{вт} = W_{вт} \cdot f. \quad (11)$$

Определение точек основной кривой индукции и магнитной проницаемости

С помощью регулятора выходного напряжения генератора постепенно увеличить напряженность магнитного поля от нуля до максимального значения. При этом необходимо выбрать не менее пяти значений напряженности магнитного поля, т.е. фиксировать значения x (расстояния по горизонтали между вершинами

гистерезисного цикла), и точно измерять у (расстояние по вертикали). Определить

H = hx и B = by.

Повторяют измерения для частот 100, 200, 300, 400 Гц. Измерения при фиксированных значениях H позволяют получить частотные зависимости B и μ.

Относительную магнитную проницаемость определяют по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} = \frac{by}{\mu_0 \cdot hx} = a \cdot \frac{y}{x}, \qquad (12)$$

где $a = \frac{b}{\mu_0 \cdot h}$ - постоянная, равная отношению масштабов по вертикали и горизонтали с учетом магнитной постоянной μ_0. Экспериментальные и расчетные данные заносят в табл. 2.

Таблица 2

Материал	*f*, Гц	x, м	y, м	H, А/м	B, Тл	μ

Задание для выполнения лабораторной работы с помощью осциллографического метода

1. Произвести градуировку осей осциллографа.
2. Определить потери в образце пермаллоя при частотах 50, 100, 200, 300, 400 Гц.
3. Измерить и построить основную кривую индукции на частотах 50, 100, 200, 300, 400 Гц.
4. Рассчитав значение магнитной проницаемости, построить зависимости B(f) и μ(f) при фиксированном значении напряженности магнитного поля.
5. Определить начальную и максимальную магнитные проницаемости и значение коэрцитивной силы ферромагнетика.

2.2. Выполнение лабораторной работы на персональном компьютере

Измерение параметров магнитных материалов осуществляется по внешнему виду петли гистерезиса – зависимости индукции магнитного поля (B, Тл) от величины его напряженности (H, А/м).

Для начала работы необходимо запустить файл «магнитные материалы» на рабочем столе ПК. После запуска файла появится окно, изображенное на рис. 10, а.



а б

Рис. 10. Вид окна начала работы (а) и выбора материала (б)

Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопок управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 10, б. Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлено описание и некоторые характеристики выбранного магнитного материала. После щелчка по кнопке «К измерениям» программа переключается на режим измерения параметров магнитного материала по параметрам петли гистерезиса. На экране отображается окно специализированного измерительного стенда, как показано на рис. 11.

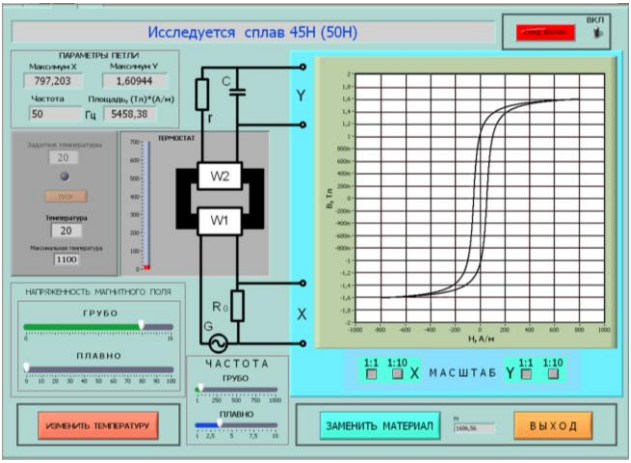


Рис. 11. Окно измерительного стенда

3. Проведение измерений

В окне измерительного стенда отображаются осциллограф, измерительная камера с образцом магнитного материала и элементы управления стендом. Здесь же отображается схема подключения исследуемого образца материала и основные параметры петли гистерезиса.

Необходимо включить стенд щелчком по тумблеру «Вкл». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 ^{0}C.

Измерение параметров сильномагнитного материала необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя движок на шкале грубого и плавного изменения частоты (обычно шаг плавного изменения составляет 1 Гц).

2. Изменяя напряженность магнитного поля движками «Грубо» и «Плавно», получить на графопостроителе нужный вид петли гистерезиса. В левом верхнем углу при этом отображаются координаты максимальных значений частной петли, ее площадь и частота изменения внешнего магнитного поля. Для изменения масштаба отображения петли гистерезиса можно использовать соответствующие кнопки на графопостроителе.

3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру», в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и продолжить измерения.

4. Изменяя значение напряженности внешнего магнитного поля, вновь произвести соответствующие измерения параметров петли гистерезиса. При необходимости изменить частоту и температуру в соответствии с пп. 1 и 3 данного раздела.

5. При необходимости выбрать другой магнитный материал используют кнопку «Заменить материал».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного магнитного материала в указанном диапазоне температур и частот.

2. Построить начальную кривую намагниченности на заданной частоте при температуре 20 ^{0}C. Для этого установить нужную частоту внешнего магнитного поля и, постепенно увеличивая его напряженность, занести значение координат B и H в табл. 3, которая приведена далее. По координатам конечных точек петли гистерезиса

рассчитать относительную магнитную проницаемость μ.

Таблица 3

H, А/м				
B, Тл				
μ				

3. Построить график зависимости B = *f*(H). Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости от величины напряженности магнитного поля, используя соотношение $\mu = B/(\mu_0 H)$. Используя кнопки изменения масштаба на графопостроителе, определить значение коэрцитивной силы H_C для исследуемого материала при максимальном значении напряженности магнитного поля.

4. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от частоты внешнего магнитного поля. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменяя частоту и поддерживая постоянное значение B изменением H, занести данные в табл. 4.

Таблица 4

f, Гц				
H, А/м				
B, Тл				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости от частоты.

5. Исследовать зависимость потерь в материале от частоты магнитного поля. Для этого устанавливать и поддерживать постоянным при изменении частоты значение индукции магнитного поля по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменить частоту и занести полученные значения площади гистерезисной кривой в табл. 5.

Таблица 5

f, Гц				
S, (Тл·А/м)				

6. Рассчитать удельные потери в образце и построить график зависимости удельных потерь в материале от частоты. Удельные

потери (Вт/кг) определяют делением площади петли гистерезиса на плотность вещества с учетом значения частоты изменения магнитного поля.

7. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от температуры на заданной частоте. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца) и поддерживать ее неизменной. Изменять температуру в соответствии с п. 3 раздела 2.2 методического указания и занести полученные значения координат B и H в табл. 6.

Таблица 6

T, ^{0}C				
H, А/м				
B, Тл				
μ				

8. Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости μ ферромагнитного материала от температуры.

5. Содержание отчета

1. Номер работы и ее название.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения, включающие основные понятия, расчетные соотношения и схему измерения.
4. Результаты измерений и вычислений в виде таблиц и графиков.
5. Сравнение полученных результатов с данными литературы и их критическая оценка.

6. Контрольные вопросы

1. Расскажите о физической природе ферромагнетизма.
2. Назовите основные характеристики ферромагнитных материалов, объясните методы их определения.
3. Какие процессы наблюдаются в материале в различных точках основной кривой намагниченности ферромагнетика?
4. Расскажите об использовании в вычислительной и электронной технике магнитомягких, магнитотвердых материалов. Приведите примеры.
5. Как получают ферриты? Каковы их основные свойства, достоинства и недостатки, области применения?

6. Какими свойствами сильномагнитных материалов определяется возможный частотный диапазон их применения?

7. Дайте определение критической, граничной частоты феррита.

8. Расскажите о потерях в магнитных материалах. От каких факторов они зависят?

9. Расскажите о практических мерах, используемых для снижения потерь на гистерезис и вихревые токи в сильномагнитных материалах.

10. Каковы свойства и области применения тонких ферромагнитных пленок?

11. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от напряженности магнитного поля и объясните физическую природу.

12. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от частоты магнитного поля и объясните физическую природу.

13. Нарисуйте зависимость магнитных характеристик сильномагнитных материалов от температуры и объясните физическую природу.

14. Приведите примеры маркировки магнитомягких и магнитотвердых материалов.

15. Расскажите об основных видах магнитной проницаемости.

16. Поясните физический смысл температурного коэффициента магнитной проницаемости.

17. Расскажите о применении в электронной технике магнитострикционных материалов.

18. Расскажите о применении в электронной технике термомагнитных материалов и материалов с прямоугольной петлей гистерезиса.

Библиографический список

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. С. 296-344.

2. Электрорадиоматериалы /под ред. проф. Б.М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978. С. 273–324.

3. Холомина Т.А.,Зубков М.В. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2015. 48 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Материаловедение / под ред. Ю.М. Солдака: учеб.пособие. Рязань: РГРТУ, 2006. 160 с.

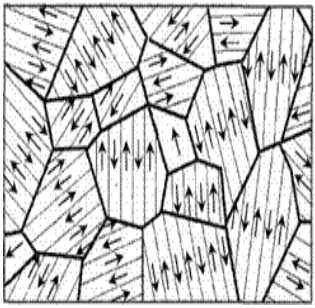
5082

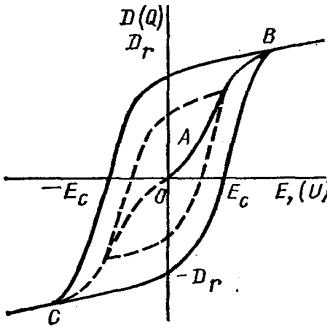
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе № 5





Рязань 2016

УДК 621.382

Исследование свойств сегнетоэлектрических материалов: методические указания к лабораторной работе № 5/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: М.В.Зубков, Т.А.Холомина, С.И. Мальченко. Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2016. 12 с.

Приведены краткие теоретические сведения об особенностях процессов поляризации в сегнетоэлектрических материалах и температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости. Приведена методика выполнения лабораторной работы с помощью прибора, измеряющего эффективную и реверсивную диэлектрическую проницаемости и точку Кюри в сегнетоэлектриках на переменном и постоянном напряжении.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Табл. 2. Ил. 7. Библиогр.: 5 назв.

Сегнетоэлектрики, домены, точка Кюри, вариконды

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав.кафедрой Т.А.Холомина)

Исследование свойств
сегнетоэлектрических материалов

Составители: З у б к о в Михаил Владимирович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович

Редактор М.Е. Цветкова
Корректор Н.А. Орлова
Подписано в печать 10.11.16. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 0,75.
Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: исследование свойств сегнетоэлектрического материала с помощью осциллографа.

1. Краткие теоретические сведения

Сегнетоэлектриками называют материалы, у которых наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризация. Она возникает под действием внутренних процессов в диэлектрике, без влияния внешнего электрического поля, т.е. полностью определяется внутренней структурой вещества.

По типу химической связи и физическим свойствам все кристаллические сегнетоэлектрики принято подразделять на две большие группы: ионные сегнетоэлектрические кристаллы (сегнетоэлектрики типа смещения) и дипольные сегнетоэлектрические кристаллы (упорядочивающиеся сегнетоэлектрики). Свойства ионных и дипольных сегнетоэлектриков существенно различаются.

Для структуры ионных сегнетоэлектриков характерно наличие кислородного октаэдра, благодаря чему эти сегнетоэлектрики называют сегнетоэлектриками кислородно-октаэдрического типа. Ионные сегнетоэлектрики имеют структуру элементарной ячейки типа перовскита. К ионным сегнетоэлектрикам относятся титанаты бария $BaTiO_3$, свинца $PbTiO_3$, ниобаты калия $KNbO_3$, лития $LiNbO_3$, танталат лития $LiTaO_3$, йодат калия KIO_3, барий-натриевый ниобат $Ba_2NaNb_5O_{15}$ и др.

К дипольным сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, триглицинсульфат $NH_2CH_2COOH \cdot H_2SO_4$, дигидрофосфат калия KH_2PO_4, нитрит натрия $NaNO_2$ и др.

В материалах одного химического состава спонтанная поляризация может возникать и исчезать в зависимости от фазового состояния вещества и изменения температуры.

Рассмотрим механизм возникновения спонтанной поляризации на примере одного из наиболее важных сегнетоэлектриков – метатитаната бария $BaTiO_3$. На рис. 1 представлена элементарная ячейка его кристаллической структуры при температуре выше 120 ^{0}C.

При такой высокой температуре $BaTiO_3$ имеет кубическую решетку и интенсивное тепловое движение ионов препятствует возникновению спонтанной поляризации. При уменьшении температуры до 120 ^{0}C (точка Кюри) возникает спонтанная поляризация, ион титана при этом приближается к одному из ионов кислорода, в связи с чем решетка деформируется, вытягиваясь вдоль той оси, по которой сместился ион титана. В точке Кюри при температуре 120 ^{0}C происходит первый фазовый переход решетки из

кубической в тетрагональную, на зависимости $\varepsilon=f(T)$ при этом наблюдается максимум (рис. 2).

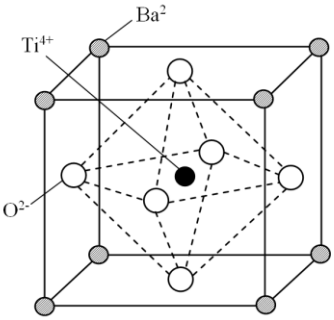


Рис. 1. Элементарная ячейка кристаллической структуры $BaTiO_3$

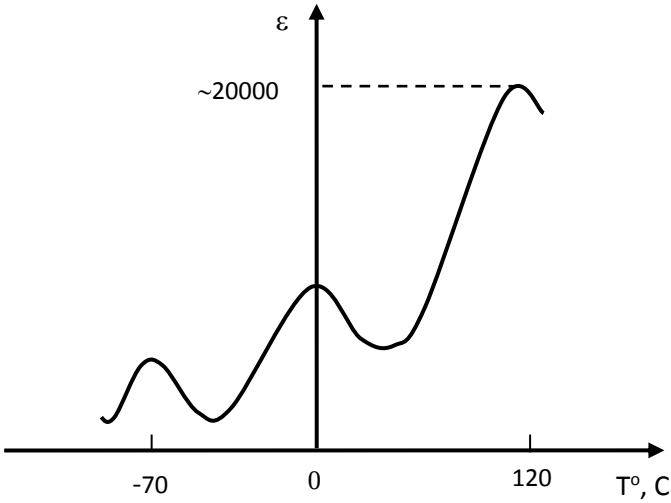


Рис. 2. Температурная зависимость относительной диэлектрической проницаемости титаната бария

При дальнейшем охлаждении до температуры 0^0 С наблюдается второй фазовый переход из тетрагональной структуры в орторомбическую. Переход связан со смещением иона титана одновременно к двум ионам кислорода вдоль диагонали грани элементарной ячейки, которая в этом направлении удлиняется. При 0

^{0}С вектор поляризации меняет направление, на зависимости $\varepsilon=f(T)$ наблюдается второй максимум.

При –70 ^{0}С происходит следующий и последний фазовый переход, и решетка приобретает более низкую симметрию, моноклинную или триклинную. Этот переход обусловлен тем, что ион титана смещается одновременно к трем ионам кислорода вдоль объемной диагонали элементарной ячейки, причем вектор спонтанной поляризации опять меняет свое направление и ориентируется вдоль объемной диагонали, по которой сместились ионы титана. На зависимости $\varepsilon=f(T)$ наблюдается третий максимум.

При температурах выше точки Кюри спонтанная поляризация невозможна. В этом случае величина внутреннего поля очень сильно зависит от внешнего приложенного напряжения. Небольшое внешнее напряжение вызывает значительное смещение ионов титана и значительную электронную и ионную поляризации. Поэтому при температурах выше точки Кюри, но вблизи от нее диэлектрическая проницаемость имеет высокое значение. С повышением температуры тепловое движение все больше препятствует направленному смещению ионов титана, в связи с чем диэлектрическая проницаемость резко уменьшается.

Взаимодействие между заряженными частицами соседних элементарных ячеек приводит к согласованному смещению ионов титана либо во всем объеме сегнетоэлектрика, либо в некоторых его областях, называемых доменами. Большие по размеру монокристаллы, а также поликристаллы разбиваются на домены. Каждый домен состоит из миллионов элементарных ячеек (рис.1) с одинаковым направлением вектора поляризации, которые создают собственный электрический момент домена. При этом электрическое поле вне кристалла уменьшается, в связи с чем энергия разделенного на домены монокристалла меньше, чем энергия однодоменного кристалла, что соответствует более устойчивому состоянию вещества с минимумом внутренней энергии. Суммарный электрический момент всех доменных областей без приложения электрического поля к сегнетоэлектрику равен нулю.

При помещении сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле наблюдается его поляризация, характеризующаяся нелинейной зависимостью значения электрической индукции D от значения напряженности электрического поля E (рис. 3).

Эта зависимость выражается кривой, аналогичной петле гистерезиса ферромагнитного материала, и сам процесс поляризации

также во многом идентичен процессу намагничивания ферромагнетика во внешнем магнитном поле.

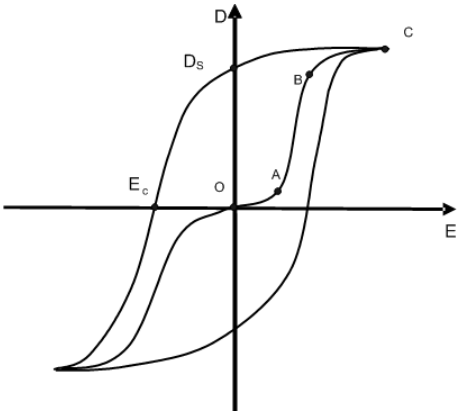


Рис. 3. Зависимость электрического смещения от величины внешнего электрического поля

При увеличении напряженности внешнего электрического поля за счет процессов смещения границ доменов, ориентации вектора электрического момента доменов, сегнетоэлектрик поляризуется до технического насыщения (кривая OABC). При уменьшении напряженности внешнего поля до нуля внутренняя индукция падает до величины D_S, которая называется остаточной. Если приложить поле, равное E_c, в противоположном направлении, поляризация (внутренняя индукция) обращается в нуль. Поле E_c называют коэрцитивным полем. Для характеристики работы сегнетоэлектриков в различных режимах эксплуатации широко применяется понятие относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = D/\varepsilon_o E$.

Наиболее часто используют понятие эффективной (или нормальной) диэлектрической проницаемости ε, начальной $\varepsilon_н$, максимальной ε_{max}, дифференциальной $\varepsilon_{диф}$, а также реверсивной (или обратимой) диэлектрической проницаемости. Всего существует более 10 разновидностей диэлектрической проницаемости.

Проводя из начала координат прямые, пересекающие основную кривую поляризации в определенных точках, можно определить значения начальной и максимальной диэлектрической проницаемости. Тангенс угла наклона касательной на участке OA характеризует начальную диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon_н$), а тангенс угла наклона прямой (касательной), проведенный из начала координат в точку верхнего перегиба кривой OABC (точку B, рис. 3), соответствует максимальной диэлектрической проницаемости ε_{max} . Проводя из начала координат прямые, пересекающие основную кривую поляризации OABC в различных точках и определяя

соответствующие значения тангенса угла наклона указанных прямых, можно построить зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля (рис.4).

Дифференциальную проницаемость $\varepsilon_{диф}$ определяют как производную (дифференциал) от электрической индукции по напряженности электрического поля для любой точки основной кривой поляризации.

Понятие реверсивной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_р$ используется при разработке разделительных цепей электронных усилителей. Для измерения $\varepsilon_р$ к сегнетоэлектрику прикладывают относительно большое постоянное напряжение ($E_п$) и малое переменное (δE – удвоенная амплитуда переменного сигнала), на котором определяют емкость конденсатора с сегнетоэлектриком (рис. 5). При приложении постоянного напряжения $E_п$ отметим на кривой поляризации точку М. Если теперь на постоянное напряжение наложить переменное напряжение меньшей амплитуды, т. е. вначале увеличить напряжение на величину δE, а затем уменьшить до величины $E_п$ -δE , то в процессе этого изменения зависимость D от E изобразится частной петлей гистерезиса. Проведем прямую через крайние точки этой петли, лежащие при $E_п + \delta$ E и $E_п$ - δE. Угол наклона этой прямой $\alpha_р$ соответствует величине реверсивной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_р$:

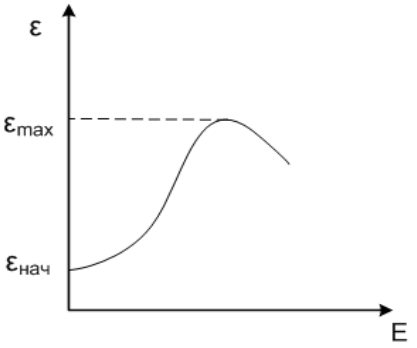


Рис.4. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля

$$\varepsilon_p = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{m_D}{m_E} \cdot tg\alpha_p \cdot \qquad (1)$$

Спонтанная поляризация находит широкое применение в радиоэлектронике. Благодаря форме петли гистерезиса (два устойчивых состояния +1 и -1), сегнетоэлектрики можно применять в запоминающих устройствах (ЗУ) ЭВМ.

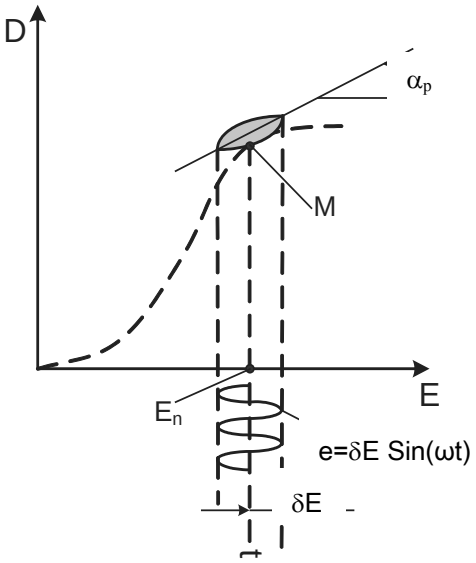


Рис. 5. Определение реверсивной диэлектрической проницаемости по частной петле гистерезиса

Основное требование в этом случае – наличие как можно более прямоугольной петли гистерезиса, что характерно , например , для монокристаллов триглицинсульфата. В отсутствие внешнего поля сегнетоэлектрик имеет два устойчивых состояния, соответствующих двум направлениям остаточной электростатической индукции. Подавая внешнее напряжение различной полярности, сегнетоэлектрик можно переводить из одного логического состояния в другое. На этом основаны запись, считывание и стирание информации. Считывание информации с сегнетоэлектрического ЗУ можно осуществлять, например, оптическим методом или измерением сопротивления тонкой полупроводниковой пленки, нанесенной на поверхность сегнетоэлектрика. Быстродействие сегнетоэлектрического ЗУ может составлять единицы микросекунд.

Существование в сегнетоэлектриках зависимости ε от напряженности электрического поля (рис. 4) приводит к аналогичной зависимости емкости сегнетоэлектрических конденсаторов от напряжения.

Такие конденсаторы называют варикондами и применяют в устройствах стабилизации частоты. Конструктивно вариконды

выполняют в виде плоских керамических конденсаторов. Одна из основных характеристик варикондов – коэффициент эффективной нелинейности, определяемый как отношение максимального значения диэлектрической проницаемости к начальному значению диэлектрической проницаемости. Численное значение указанного выше коэффициента может изменяться в пределах от 4 до 50.

Наличие доменной структуры и диэлектрического гистерезиса приводит к сверхвысоким значениям ε в сегнетоэлектриках (10^4-10^5). Это делает возможным создание малогабаритных конденсаторов большой удельной емкости. Зависимость ε сегнетоэлектриков от температуры (рис. 2) позволяет использовать их в качестве датчиков температуры. Многие сегнетоэлектрики являются одновременно и пьезоэлектриками.

Спонтанная поляризация сопровождается диэлектрическими потерями, при этом площадь петли диэлектрического гистерезиса пропорциональна мощности потерь. Поэтому практическое применение сегнетоэлектриков возможно только в диапазоне низких частот и в ограниченном интервале температур.

В настоящей работе рассматривается метод измерения эффективной и реверсивной диэлектрических проницаемостей нелинейного сегнетоэлектрического конденсатора с помощью осциллографа.

2. Описание установки и методики измерений

Измерение эффективной диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика с помощью осциллографа

Исследование свойств сегнетоэлектриков производят на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 6.

Схема содержит следующие элементы: К1 – ключ, включающий питание установки; R1 – реостат для регулирования напряжения; V1 – вольтметр типа В3 – 39; R2, R3 – делители напряжения; C_x – испытуемый сегнетоэлектрический конденсатор; C_o – образцовый конденсатор; 1-2 – горизонтальный вход осциллографа; 3-2 – вертикальный вход осциллографа; 4, 5, 6 – зажимы для подключения вольтметра.

На горизонтальный вход осциллографа подается напряжение с R3, пропорциональное всему приложенному напряжению, которое распределяется между конденсаторами C_x и C_o обратно пропорционально емкости, т.е.

$$C_x/C_o=U_o/U_x, \qquad (2)$$

где U_o – напряжение на образцовом конденсаторе; U_x – напряжение на испытуемом конденсаторе.

На вертикальный вход осциллографа подается напряжение с конденсатора C_o, пропорциональное его заряду.

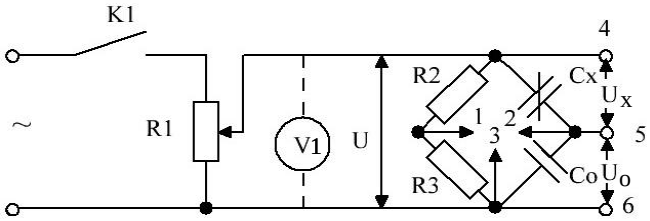


Рис. 6. Принципиальная схема установки для измерения емкости сегнетоконденсатора

Заряды на конденсаторах C_x и C_o равны, так как они включены последовательно.

Из формулы (2) определяется емкость испытуемого сегнетоконденсатора:

$$C_x=C_oU_o/U_x=Q_o/U_x. \qquad (3)$$

По полученной осциллограмме можно определить горизонтальный масштаб напряжений m_U и вертикальный масштаб зарядов m_q:

$$m_U=2U_x\sqrt{2}/L_o, \quad \text{В/дел.} \qquad (4)$$

$$m_q=2U_oC_o\sqrt{2}/H_o, \quad \text{Кл/дел.},$$

где L_o и H_o – расстояние по горизонтали и вертикали гистерезисной кривой соответственно.

Зная масштабы зарядов и напряжений, можно при любых других значениях U определить заряды и напряжения на обкладках сегнетоконденсатора:

$$Q_M=m_qH/2,$$
$$U_{XM}=m_UL/2. \qquad (5)$$

Отсюда

$$C_x=m_qH/m_UL=m_cH/L. \qquad (6)$$

Зная емкость сегнетоэлектрического конденсатора и его геометрические размеры, можно определить относительную диэлектрическую проницаемость:

$$C_x=\varepsilon\varepsilon_oS/h, \qquad (7)$$

где $\varepsilon_o=8.85\cdot10^{-12}$ Ф/м; C_x – измеряемая емкость, Ф;

h – расстояние между обкладками конденсатора, м;

S – площадь обкладок конденсатора, м^2.

Из соотношения (7):

$$\varepsilon=0.113C_x h\cdot 10^{12}/S. \qquad (8)$$

Достоинство осциллографического метода измерения емкости сегнетоэлектрического конденсатора заключается в его простоте.

Измерение реверсивной диэлектрической проницаемости

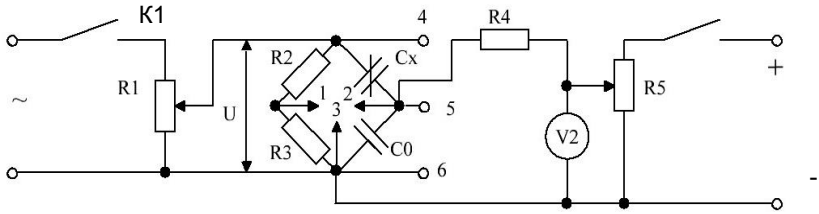


Рис. 7. Принципиальная схема установки для измерения реверсивной емкости сегнетоконденсатора

Измерение реверсивной диэлектрической проницаемости производится на установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 7. Она отличается от схемы, приведенной на рис. 6, наличием регулируемого с помощью реостата R5 постоянного напряжения, которое подается на образцовый конденсатор через резистор R4. Постоянное напряжение измеряется вольтметром V2, который находится на панели лабораторного стенда.

Так как оба конденсатора C_o и C_x в цепь постоянного тока включены параллельно, они находятся под одним напряжением.

При измерении реверсивной емкости следует придерживаться той же методики, что и при измерении эффективной емкости, увеличив усиление осциллографа и определив новые масштабы зарядов и напряжений.

3. Описание методики измерения

1. Собрать схему согласно рис. 6.

2. С помощью ключа К1 включить питание установки. Реостатом R1 установить напряжение U, равное 130 В по показанию вольтметра V1, подключив его к зажимам 4, 6 лабораторного стенда. С помощью рукоятки «Усиление» по горизонтали и по вертикали получить на экране трубки устойчивое изображение петли диэлектрического гистерезиса в пределах экрана осциллографа. Вольтметром измерить

напряжения U_o и U_x на зажимах 5, 6 и 4, 5 и вычислить масштабы зарядов, напряжений и емкостей по формулам (4).

Таблица 1

U, В	L,дел	H,дел	$U_{хм}$,В	$C_э$,Ф	$\varepsilon_э$	$E_{хм}$,В/м
130						
100						
70						
50						
30						

Рукоятки «Усиление» на осциллографе после определения масштабов не сдвигать!

С помощью реостата R1 изменить напряжение U в пределах от 130 до 30 В, как указано в табл. 1, при этом измерить L и H – расстояния по горизонтали и вертикали между вершинами гистерезисной кривой для каждого значения напряжения. Для удобства отсчета показаний рукоятки «Вертикальные пластины», «Горизонтальные пластины» осциллографа установить в положение «Закор.».

По формулам (6) и (8) определить значения $C_э$ и $\varepsilon_э$. Расстояние между электродами конденсатора h, диаметр электродов d указаны на лабораторном стенде. Напряженность электрического поля рассчитывать по формуле

$$E_x = U_{xм}/h. \qquad (9)$$

Все данные занести в табл. 1., по этим данным построить зависимость $\varepsilon_э = f(E_{xм})$.

Реостатом установить напряжение $U=130$ В по вольтметру V1. На экране осциллографа добиться отчетливого изображения петли гистерезиса, не выходящей за пределы экрана трубки. Срисовать петлю на кальку и с помощью миллиметровой бумаги измерить ее площадь. Зная эту площадь, можно определить активную мощность, рассеиваемую в диэлектрике, и tg δ.

$$P = f m_U m_q G, \qquad (10)$$

где f – частота сети, Гц;

G – площадь петли гистерезиса, мм^2.

$$tg\ \delta = 4F/\pi HL. \qquad (11)$$

При вычислении значений P и tg δ необходимо использовать величины m_q и m_U в тех же единицах, что и при вычислении по формуле (6).

3. Собрать схему согласно рис. 7.

Установить переменное напряжение 20 В реостатом R2 и изменять напряжение постоянного тока от нуля до 150 В, как указано в табл. 2.

Определить значения $C_р$ и $\varepsilon_р$. Экспериментальные и расчетные данные свести в табл. 2.

Таблица 2

U, В	L, дел	H, дел	$C_р$, Ф	$\varepsilon_р$	E, В/м
0					
50					
100					
150					

Примечание. П. 4 выполняется по заданию преподавателя

4. Определить точку Кюри. Собрать схему согласно рис. 6. Сегнетоконденсатор поместить в ванну с минеральным маслом. Реостатом R1 установить напряжение 20 В. С помощью ручек «Усиление» по горизонтали и вертикали получить на экране изображение петли гистерезиса. Вольтметр V1 подключить к зажимам 5, 6 лабораторного стенда и установить предел измерения напряжения «1В». Включить нагревательную ванну и по термометру определить температуру, соответствующую максимальному напряжению вольтметра V1. Выключить установку.

4. Задание

1. Определить масштабы зарядов и напряжений m_q, m_u.

2. Определить активную мощность, рассеиваемую в сегнетоэлектрике P, и тангенс угла диэлектрических потерь tg δ.

3. Определить значения $\varepsilon_Э$,$C_Э$ при напряжениях U=30-130В. Результаты измерений и расчетные данные свести в табл. 1.

4. Построить зависимость $\varepsilon_Э=f(E_{XM})$.

5. Измерить и построить зависимость реверсивной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_р$ сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля постоянного тока при неизменном напряжении переменного тока, т.е $\varepsilon_р=f(E_=)$ при $E=const$. Результаты измерений и расчетные данные свести в табл. 2.

6. Определить точку Кюри.

5. Содержание отчета

1. Принципиальные схемы испытательных установок.

2. Результаты наблюдений и вычислений в виде таблиц, отдельных записей и кривых, а также формул, по которым производились расчеты.

3. Критическая оценка полученных результатов и сопоставление их с литературными данными.

6. Контрольные вопросы

1. Рассказать о физической природе спонтанной поляризации.
2. Объяснить процессы, обусловливающие поляризацию сегнетоэлектриков во внешнем электрическом поле.
3. Дать определение существующим видам диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков и объяснить методы их определения.
4. Объяснить зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков от внешних факторов (напряженности поля, температуры, частоты).
5. Назвать основные сегнетоэлектрические материалы и охарактеризовать области их практического применения.
6. Охарактеризовать области практического применения прямого и обратного пьезоэффектов.
7. Чем отличаются нелинейные диэлектрики от линейных?
8. Каковы особенности диэлектрических свойств биологических объектов?
9. Каков принцип работы датчиков температуры на основе сегнетоэлектрических материалов?
10. Почему сегнетоэлектрические конденсаторы обладают высокой удельной емкостью?

Библиографический список

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1986. С. 262-273.
2. Электрорадиоматериалы / под ред. Б.М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978. С. 208-225.
3. Материаловедение: учеб.пособие/ С.П.Вихров, Т.А.Холомина; под ред. Ю.М.Солдака. Рязань: РГРТУ, 2006. 160 с.
4. Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие/ Т.А. Холомина, М.В. Зубков; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. - Рязань, 2015. 48 с.
5. Методические рекомендации по подготовке студентов к текущему и промежуточному контролю освоения компетенций/ Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост. Т.А.Холомина, Е.Н.Евдокимова . Рязань, 2016. 16 с.

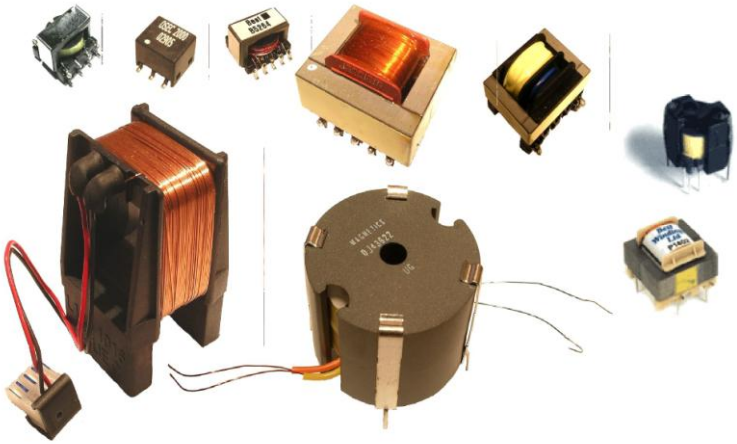
4700

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе



Рязань 2013

УДК 621.39

Исследование свойств ферромагнитных материалов: методические указания к лабораторной работе /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.:
С.И. Мальченко, В.Г. Мишустин, Т.А. Холомина. Рязань, 2013. 16 с.

Рассматривается лабораторная работа по курсу «Материалы и компоненты радиоэлектронных средств».

Предназначены студентам специальностей 140400, 200100, 201000, 210100 210400, 211000.

Табл. 1. Ил. 7. Библиогр.: 4 назв.

Магнитное поле, напряженность магнитного поля, индукция, магнитная проницаемость, магнитные потери, вихревые токи, ферромагнетики, ферриты

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Исследование свойств ферромагнитных материалов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 20.09.13. Формат бумаги 60х84.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 120 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: определение точек основной кривой магнитной индукции в переменном магнитном поле, изучение зависимости магнитной проницаемости от напряженности и частоты магнитного поля, температуры, а также определение мощности потерь в зависимости от частоты, затрачиваемых на формирование вихревых токов и гистерезис.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Единицы магнитных величин и магнитных свойств веществ

В электромагнитных устройствах автоматики, вычислительной и измерительной техники воздействие на магнитный элемент производится либо магнитным полем тока, проходящего по проводнику или обмотке, либо непосредственно магнитным полем (например, в феррозондах) или магнитным полем, которое сконцентрировано металлическим сердечником. В большинстве случаев основой электромагнитных элементов служит магнитный сердечник. Формируемое током в проводнике магнитное поле является, обычно, внешним по отношению к этому сердечнику. Прежде чем перейти к природе магнитных свойств вещества, напомним единицы магнитных величин в Международной системе единиц (СИ).

Внешнее магнитное поле линейного проводника с током I характеризуется напряженностью **H** магнитного поля (А/м) и является силовой характеристикой магнитного поля.

Если проводник равномерно намотан с количеством витков w на ферромагнитный сердечник с одинаковым сечением S по всей его длине l (например, на кольцевой сердечник), то напряженность магнитного поля в сердечнике $H = I\text{w}/l$.

Под действием протекающего через проводник тока в сердечниках магнитных элементов создается магнитный поток **Ф**.

Наряду с напряженностью магнитное поле характеризуется магнитной индукцией **B** (Тл), определяемой для равномерного поля выражением $B = \Phi/S$, где S – площадь, через которую проходит магнитный поток.

Магнитная постоянная $\boldsymbol{\mu_0}$ (магнитная проницаемость вакуума) представляет собой отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля в вакууме $\mu_0 = B/H$.

Напряженность внешнего магнитного поля не зависит от свойств среды (от свойств вещества), где создается магнитный поток. Магнитная же индукция определяется как напряженностью, так и свойствами среды (вещества), характеризующимися относительной магнитной проницаемостью **μ** (или просто магнитной проницаемостью), которая показывает, во сколько раз проницаемость вещества больше или меньше проницаемости вакуума.

Магнитная индукция в среде (упрощенно можно представить как магнитное поле внутри вещества)

$$B = \mu\mu_0 H, \qquad (1)$$

где μ $\mu_0 = \mu_a$ – абсолютная магнитная проницаемость вещества.

1.2. Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразделить на пять групп: *диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики*. Перечисленным видам магнетиков соответствуют пять различных видов магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм.

К *диамагнетикам* относят вещества, у которых магнитная восприимчивость отрицательна и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и ее производные), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.). Большинство полупроводников (кремний, германий, соединения A_3B_5, A_2B_6) и органических соединений, щелочно-галоидные кристаллы, неорганические стекла и др. также относят к диамагнетикам. Диамагнетиками являются все вещества с ковалентной химической связью и вещества в сверхпроводящем состоянии.

К *парамагнетикам* относят вещества с положительной магнитной восприимчивостью, не зависящей в слабых магнитных полях и при высоких температурах от напряженности внешнего магнитного поля. К числу парамагнетиков относят кислород, окись азота, щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов.

К *ферромагнетикам* относят вещества с большой положительной магнитной восприимчивостью (до 10^6), которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Антиферромагнетиками являются вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориен-

тация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. При нагревании антиферромагнетик испытывает фазовый переход в парамагнитное состояние. Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.). Типичными антиферромагнетиками являются простейшие химические соединения на основе металлов типа окислов, галогенидов, сульфидов, карбонатов и т.п.

К *ферримагнетикам* относят вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Подобно ферромагнетикам они обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры. Наряду с этим ферримагнетики характеризуются и рядом существенных отличий от ферромагнитных материалов. Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но главным образом - различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

1.3. Намагничивание ферромагнитного материала

Под действием внешнего магнитного поля, созданного током в катушке, наложенной на магнитопровод из ферромагнетика, происходит процесс ориентации доменов в магнитопроводе и смещение их границ. Это приводит к намагничиванию стального магнитопровода (т.е. к росту величины внутреннего магнитного поля), причем намагниченность увеличивается с увеличением внешнего магнитного поля.

Намагниченность M (она характеризует магнитное поле внутри вещества) ферромагнитного материала растет только до определенного предельного значения, называемого намагниченностью насыщения M_s. Зависимость $B(H)$ является нелинейной и кривую $B(H)$ можно разделить на четыре участка:

1) практически линейный участок, соответствующий малым напряженностям поля, показывает, что магнитная индукция увеличивается относительно медленно и практически пропорционально напряженности поля;

2) нелинейный участок, на котором магнитная индукция B растет также практически пропорционально напряженности поля, но значительно быстрее, чем на начальном участке;

3) участок, который характеризует замедление роста величины индукции B;

4) участок магнитного насыщения, где зависимость $B(H)$ снова линейная, но рост индукции B очень сильно замедлен по сравнению со

вторым. Магнитная индукция, которая соответствует намагниченности насыщения, *называется индукцией насыщения* B_s . Такая сугубо нелинейная зависимость объясняется «поведением» доменов ферромагнитного материала, обладающих спонтанной (самопроизвольной) намагниченностью.

При внесении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно наблюдаются процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема). В слабом поле происходит увеличение объема доменов, у которых магнитный момент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При снятии магнитного поля положение границ доменов восстанавливается, т.е. процесс носит обратимый характер. При усилении поля изменения структуры доменов более значительны и при снятии внешнего поля положение границ доменов не восстанавливается. Образуется остаточная индукция. При дальнейшем увеличении напряженности поля происходит изменение угла вектора намагниченности доменов из направления вдоль оси легкого намагничивания в направление, совпадающее с направлением внешнего поля. При этом магнитное состояние материала достигает технического насыщения. Поведение кривой *B(H)* при циклическом изменении внешнего магнитного поля имеет характерный вид , называемый петлей гистерезиса, как показано на рис. 1

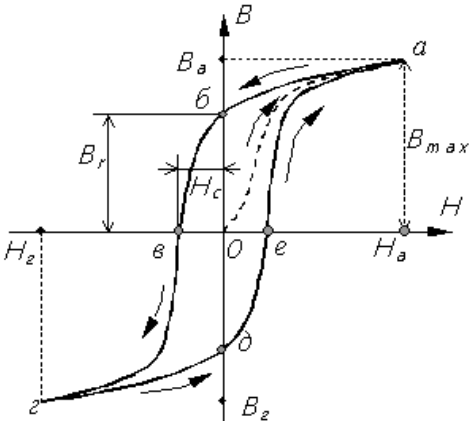


Рис. 1. График перемагничивания ферромагнетиков (петля гистерезиса)

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется, его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 2. Сплошная кривая, проходящая по вершинам петель, называется нормальной или основной кривой индукции.

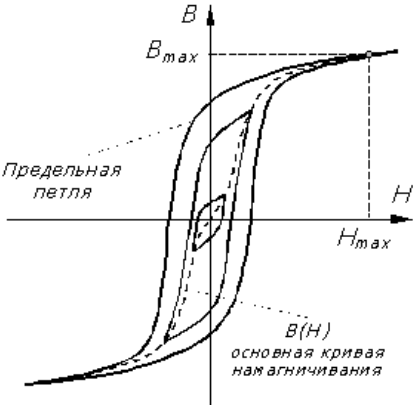


Рис. 2. Предельная петля гистерезиса

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы поворота магнитных моментов некоторых доменов и задержка роста зародышей перемагничивания. Под ними понимают небольшие объемы вещества с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Основными параметрами петли гистерезиса являются индукция насыщения B_S (B_{max}), остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_C и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания. Остаточной индукцией называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего поля. Коэрцитивная сила – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике. При относительно небольших затратах энергии внешнего поля на перемагничивание петля гистерезиса узкая, величина коэрцитивной силы мала. При больших затратах энергии петля гистерезиса широкая и значение коэрцитивной силы большое. Соответственно различают магнитомягкие материалы с $H_C<100$ А/м и магнитотвердые с $H_C>10^4$ А/м.

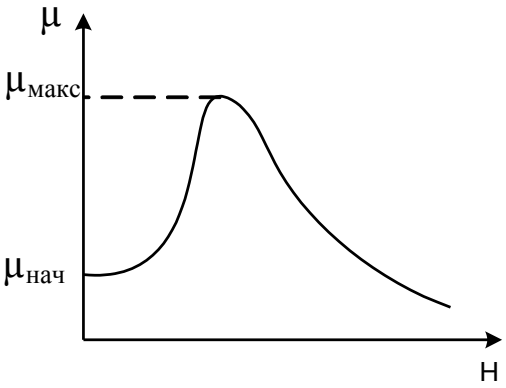


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Таким образом, зависимость магнитной индукции от напряженности поля у ферромагнитного материала достаточно сложная и не может быть выражена простой расчетной формулой. Поэтому при расчете магнитных цепей, содержащих ферромагнетики, применяют снятые экспериментально кривые намагничивания *B(H)* магнитных материалов. Кривая намагничивания впервые была получена экспериментально в 1872 году профессором Московского университета А.Г.Столетовым. На рис. 3 показана зависимость магнитной проницаемости от величины напряженности внешнего магнитного поля

1.4. Процесс перемагничивания ферромагнетиков

Рассмотрим процесс перемагничивания ферромагнетиков. Допустим, что замкнутый магнитопровод из ферромагнитного материала не намагничен и тока в витках катушки нет, т.е. $B=0$ *и* $H=0$ (начало координат на рис. 1). При постепенном увеличении намагничивающего тока, а следовательно, и напряженности поля от нуля до некоторого наибольшего значения магнитная индукция увеличивается по кривой начального намагничивания (*Оа*) и достигает соответствующего максимального значения B_a (рис. 1). Если затем ток и напряженность магнитного поля уменьшаются, то и магнитная индукция уменьшается, при соответствующих значениях напряженности магнитная индукция несколько больше, чем при увеличении напряженности. Кривая изменения магнитной индукции (участок *аб* на рис. 1) располагается выше кривой начального намагничивания. При нулевых значениях тока и напряженности поля магнитная индукция имеет некоторое значение B_r, называемое ***остаточной индукцией*** (отрезок *Об* на рис. 1).

Таким образом, магнитная индукция в ферромагнитном материале зависит не только от напряженности поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Это явление называется ***гистерезисом***. Оно обусловлено как бы «внутренним трением», возникающим при изменении ориентации магнитных моментов доменов. При изменении направления намагничивающего тока, а следовательно, и направления напряженности магнитного поля и постепенном увеличении тока обратного направления напряженность поля достигает значения H_c, называемого ***коэрцитивной силой*** (отрезок *Ов*), при котором магнитная индукция $B=0$. При дальнейшем увеличении тока и напряженности поля магнитопровод намагничивается в противоположном направлении, и при напряженности поля $H_c = -H_a$ магнитная индукция достигнет значения $B_c = -B_a$. Затем при уменьшении тока и напряженности поля до нуля магнитная индукция $B_д$ становится равной $-B_б$. Наконец, при следующем изменении направления тока и напряженности

поля и увеличении ее до прежнего значения H_a магнитная индукция увеличится также до прежнего значения B_a.

Рассмотренный цикл перемагничивания ферромагнетика по кривой *абвгдеа* называется ***гистерезисным циклом*** (*петлей гистерезиса*). Такая симметричная замкнутая петля гистерезиса (рис. 2) получается в действительности только после нескольких перемагничиваний с увеличением напряженности магнитного поля до максимального значения. При первых циклах перемагничивания петля несимметричная и незамкнутая. Наибольшая замкнутая петля, которая может быть получена для данного ферромагнитного материала, называется *предельной* (рис. 2). При напряженности поля $H > H_{max}$ получается уже безгистерезисный участок кривой *B(H)*.

Если для данного ферромагнитного материала, выбирая различные наибольшие значения напряженности магнитного поля, получить несколько симметричных петель гистерезиса (рис. 2) и соединить вершины петель, то получим кривую, называемую ***основной кривой намагничивания***, близкую к кривой начального намагничивания. Циклическое перемагничивание можно применить для размагничивания магнитопровода, т.е. для уменьшения остаточной индукции до нулевого значения. С этой целью магнитопровод подвергают воздействию изменяющегося по направлению и постепенно уменьшающегося магнитного поля.

1.5. Магнитная проницаемость

Магнитную проницаемость вещества разделяют на абсолютную

$$\mu_a = \frac{B}{H}$$

и относительную (в дальнейшем слово относительная будем опускать)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Подставляя в эти соотношения конкретные значения B и H, получают различные виды магнитной проницаемости, которые применяют в технике (свыше нескольких десятков).

Наиболее часто используют понятия магнитной проницаемости начальной $\mu_{нач}$, максимальной $\mu_{макс}$, эффективной $\mu_{эф}$ и дифференциальной $\mu_{диф}$. Для точки А рис. 4 магнитная проницаемость μ определяется как тангенс угла наклона секущей 0А к оси абсцисс, т. е.

$$\mu = tg\alpha = \frac{B_A}{\mu_0 H_A}.$$

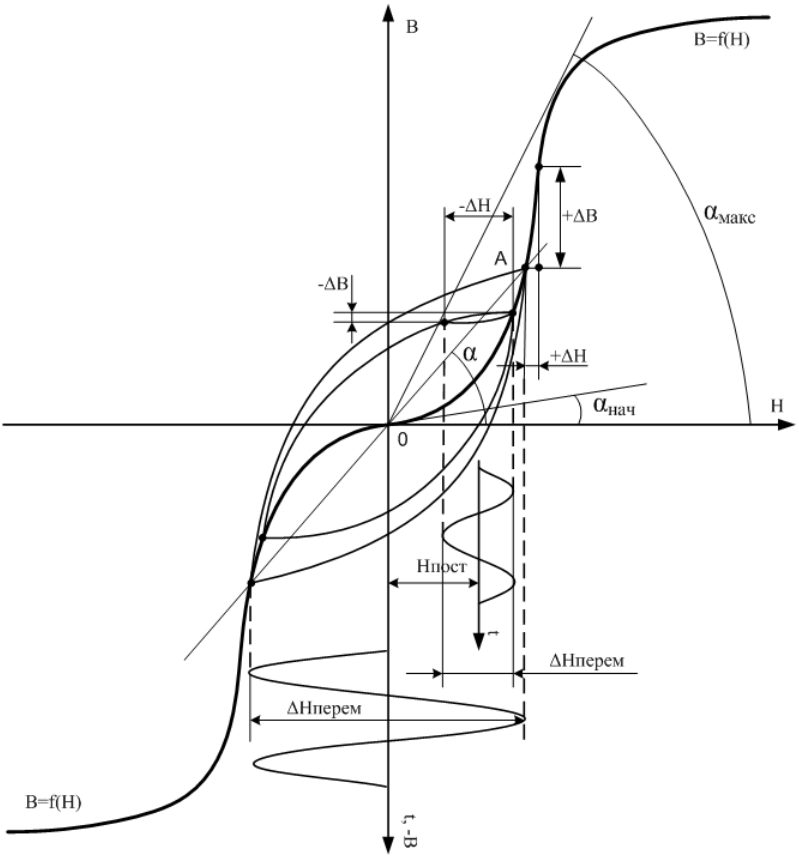


Рис. 4. Определение различных видов магнитной проницаемости

Это эквивалентно воздействию на магнитный материал синусоидального переменного магнитного поля величиной $\Delta H_{перем}$ без постоянной составляющей (рис. 4). В некоторых случаях такую проницаемость называют *эффективной*.

Начальная и максимальная проницаемости представляют собой частные случаи магнитной проницаемости вещества:

$$\mu_{нач} = \lim_{H \to 0} \frac{B}{\mu_0 H} = tg\alpha_{нач};$$

$$\mu_{макс} = \frac{B_{\mu_{макс}}}{\mu_0 H_{\mu_{макс}}} = tg\alpha_{макс},$$

т. е. наклон касательной на начальном участке кривой B =f(H) характеризует начальную проницаемость, а наклон прямой, проведенной из начала координат в точку верхнего перегиба кривой, соответствует максимальному значению магнитной проницаемости.

Дифференциальную проницаемость $\mu_{диф}$ определяют как производную от магнитной индукции по напряженности магнитного поля для любой точки кривой намагничивания, т.е. она представляет собой тангенс угла наклона между осью абсцисс и касательной к кривой намагничивания в этой точке. Этот угол примерно будет соответствовать углу прямой, проведенной через две точки малого гистерезисного цикла при одновременном воздействии на образец постоянного $H_{пост}$ и переменного $\Delta H_{перем}$ магнитного полей (рис. 4) при условии, что выполняется соотношение $\Delta H_{перем} << H_{пост}$.

Как видно из графиков, магнитная проницаемость с ростом напряженности поля изменяется в весьма широких границах, что затрудняет ее применение для расчетов. На кривой μ=f*(H)* (рис. 3) отмечают два характерных значения магнитной проницаемости: начальная – $\mu_{нач}$ и максимальная – $\mu_{макс}$.

Начальная магнитная проницаемость характеризует возможность использования ферромагнетика в слабых магнитных полях. Максимальная магнитная проницаемость определяет верхнюю границу использования материала. Так, например, типичное значения магнитной проницаемости для листовой электротехнической стали $\mu_{нач}$=250 - 1000, а $\mu_{макс}$= 500 – 30000.

1.6. Потери в магнитных материалах

При намагничивании магнитного материала переменным полем в нем возникают потери энергии, приводящие к нагреву материала. Петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии за один цикл перемагничивания, расширяется (увеличивает свою площадь) за счет возникновения различного вида потерь.

Потери на гистерезис $P_Г$, отнесенные к единице объема материала (удельные потери) определяют по формуле

$$P_Г = f\frac{\oint HdB}{\gamma},$$

где γ - плотность материала в кг/м^3, f – частота в Гц.

Наряду с потерями на гистерезис $P_Г$ возникают и другие потери в магнитных материалах: *потери на вихревые токи* P_B и *дополнитель-*

ные потери $P_Д$. Петлю гистерезиса на переменном поле называют динамической, а сумму составляющих потерь — полными или суммарными потерями.

Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных, но также и от электрических свойств материала (удельного электрического сопротивления) и формы сердечника. Для листового образца потери P_B можно найти из выражения

$$P_B = \frac{164 d^2 f^2 B_{макс}^2 \eta}{\gamma \rho},$$

где $B_{макс}$ – амплитуда магнитной индукции, Тл;
f – чатота переменного тока, Гц;
d – толщина листа, м;
γ - плотность материала в кг/м^3;
ρ – удельное электросопротивление, Ом·м,
η – коэффициент формы.

Дополнительные потери нельзя рассчитать аналитически, их определяют обычно как разность между полными потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи:

$$P_Д = P-(P_Г + P_B).$$

2. Выполнение лабораторной работы

Испытание ферромагнитных материалов производится на установке, обобщенная схема которой приведена на рис. 5. Здесь М – испытываемый образец из ферромагнитного материала; R_0 - образцовое сопротивление; r и С - сопротивление и конденсатор фазовращательной цепочки. Соответственно 2 и 3 – горизонтальный и 3 – 4 вертикальный входы осциллографа или графопостроителя, 4 - 1 – вход сигнала с генератора. Отклонение луча осциллографа по горизонтали пропорционально падению напряжения на R_0, которое, в свою очередь, пропорционально величине намагничивающего тока и, следовательно,

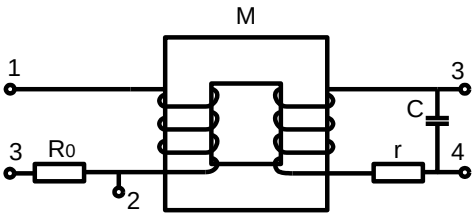


Рис. 5. Схема установки для испытания ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях

величине *H*. Так как отклонение луча по горизонтали пропорционально приложенному напряжению, величину отклонения можно выразить в единицах измерения напряженности поля *H*. Магнитная индукция *B* пропорциональна выходному напряжению, измеренному между точками 3 и 4 вертикального входа усилителя осциллографа. Это напряжение зависит от величины магнитного потока в магнитопроводе М и скорости его изменения (а, следовательно, величине *B* при неизменной частоте). Таким образом, можно проградуировать отклонение луча по вертикали в единицах измерения магнитной индукции и, используя такую схему, можно получить на экране осциллографа петлю гистерезиса ферромагнитного материала.

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения магнитных свойств вещества на специализированном стенде. Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда магнитных материалов в зависимости от изменения параметров внешнего магнитного поля. Измерение параметров магнитных материалов осуществляется по внешнему виду петли гистерезиса – зависимости индукции магнитного поля (В, Тл) от величины его напряженности (Н, А/м).

Для начала работы необходимо запустить файл «магн_матер» на рабочем столе ПК. После запуска файла появится окно, изображенное на рис. 6, а. Оно отображает название выполняемой лабораторной



а б

Рис. 6. Вид окна начала работы (а) и выбора материала (б)

работы и кнопок управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 6, б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлено описание и некоторые характеристики выбранного магнитного материала. После щелчка по кнопке «К измерениям» программа переключается на режим измерения параметров магнитного материала по параметрам петли гистерезиса. На экране отображается окно специализированного измерительного стенда, как показано на рис. 7.

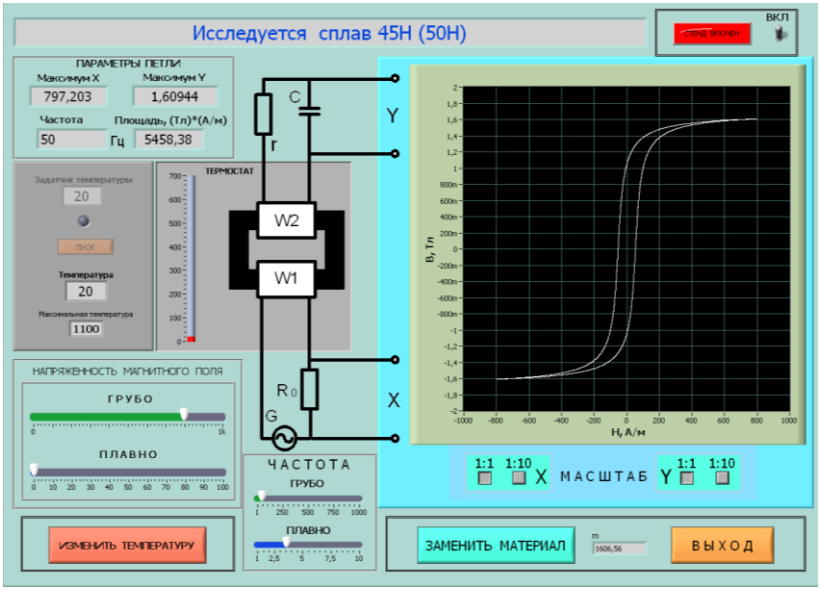


Рис. 7. Окно измерительного стенда

2.1. Проведение измерений

В окне измерительного стенда отображаются осциллограф, измерительная камера с образцом магнитного материала и элементы управления стендом. Здесь же отображается схема подключения исследуемого образца материала и основные параметры петли гистерезиса.

Необходимо включить стенд щелчком по тумблеру «Вкл». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 ^{0}C. Измерение параметров материала необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя движок на шкале грубого и плавного изменения частоты (обычно 1 Гц).
2. Изменяя напряженность магнитного поля, движками «Грубо» и «Плавно», получить на графопостроителе нужный вид петли гистерезиса. В левом верхнем углу при этом отображаются координаты максимальных значений частной петли, ее площадь и частота изменения внешнего магнитного поля. Для изменения масштаба отображения петли гистерезиса можно использовать соответствующие кнопки на графопостроителе.
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и продолжить измерения.
4. Изменяя значение напряженности внешнего магнитного поля, вновь произвести соответствующие измерения параметров петли гистерезиса. При необходимости изменить частоту и температуру в соответствии с пунктами 1 и 3 данного раздела.
5. При необходимости выбрать другой магнитный материал, используя кнопку «Заменить материал».

3. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного магнитного материала в указанном диапазоне температур и частот.
2. Построить начальную кривую намагниченности на частоте 1 Гц при температуре 20 ^{0}C. Для этого установить нужную частоту внешнего магнитного поля и, постепенно увеличивая его напряженность, занести значение координат B и H в таблицу, пример которой показан ниже. По координатам конечных точек петли гистерезиса рассчитать относительную магнитную проницаемость μ.

H, А/м				
B, Тл				
μ				

Построить график зависимости B = f(H). Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости от величины напряженности магнитного поля, используя соотношение $\mu = B/(\mu_0 H)$. Используя кнопки изменения масштаба на графопостроителе, определить значение коэрцетивной силы H_C для исследуемого материала при максимальном значении напряженности магнитного поля.

3. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от частоты внешнего магнитного поля. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменяя частоту и поддерживая постоянное значение B изменением H, занести данные в таблицу, пример которой показан ниже.

F, Гц				
H, А/м				
B, Тл				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости от частоты.

4. Исследовать потери в материале от частоты магнитного поля. Для этого устанавливать и поддерживать постоянным, при изменении частоты, значение индукции магнитного поля по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменять частоту и занести полученные значения площади гистерезисной кривой в таблицу, пример которой показан ниже.

F, Гц				
S, (Тл·А/м)				

Рассчитать удельные потери в образце и построить график удельных потерь в материале от частоты. Удельные потери (Вт/кг) определяют делением площади петли гистерезиса на плотность вещества с учетом частоты изменения магнитного поля (раздел 1.6.).

5. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от температуры на частоте 1 Гц. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца) и поддерживать ее неизменной. Изменять температуру в соответствии с пунктом 3 раздела 2.1 методического указания и занести полученные значения координат B и H в таблицу, пример которой показан ниже.

T, ^{0}C				
H, А/м				
B, Тл				
μ				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости μ от температуры.

4. Содержание отчета

1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.
2. Отчет должен содержать:
- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию.

5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные физические величины, характеризующие магнитные поля в вакууме и веществе.
2. Чем отличаются диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики?
3. Что такое «домен» ферромагнитного материала?
4. Объясните кривую намагничивания ферромагнетиков.
5. Чем объясняется техническое насыщение величины индукции в ферромагнитном материале?
6. Что такое «коэрцетивная» сила и «остаточная индукция»?
7. Как получается петля гистерезиса ферромагнитного материала?
8. Что такое частные гистерезисные циклы и как строится начальная кривая намагниченности?
9. Как относительная магнитная проницаемость зависит от величины напряженности магнитного поля?
10. Как относительная магнитная проницаемость зависит от частоты изменения напряженности магнитного поля?
11. Как относительная магнитная проницаемость зависит от температуры?
12. Что такое эффективная магнитная проницаемость и как она определяется?
13. Что такое реверсивная магнитная проницаемость и как она определяется?
14. Как определяется статическая и динамическая магнитные проницаемости?
15. Какие виды потерь различают в магнитных материалах и как они определяются?

Библиографический список

1. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 350 с.
2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 406 с.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд-ние, 1985. – 304 с.
4. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учебник для специальности «Полупроводники и диэлектрики» вузов. М.: Высш. школа, 1976. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В таблице представлены параметры удельных потерь различных марок стали при промышленной частоте 50 Гц и магнитной индукции стали в сильных полях

Марка	Толщина листа или ленты, мм	Удельные потери Вт/кг, не более, при индукции, Тл, равной	
		1,0	**1,5**
1211	1,0	5,8	13,4
	0,5	3,3	7,7
1213	1,0	4,7	10,7
	0,65	3,2	7,5
	0,5	2,8	6,5
1411	0,5	2,0	4,4
	0,35	1,6	3,6
1511	0,5	1,55	3,5
	0,35	1,35	3,0
2011	0,65	3,8	9,0
	0,5	3,5	8,0
2111	0,65	4,3	10,0
	0,5	3,5	8,5
2311	0,65	2,5	5,8
	0,5	1,9	4,4

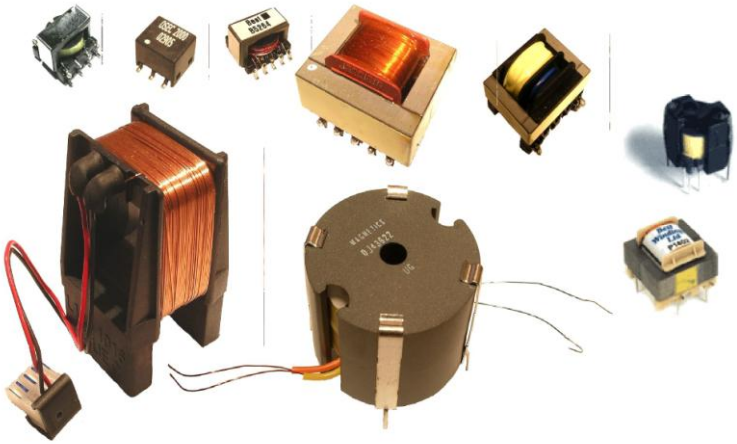
4700

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания
к лабораторной работе



Рязань 2013

УДК 621.39

Исследование свойств ферромагнитных материалов: методические указания к лабораторной работе /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.:
С.И. Мальченко, В.Г. Мишустин, Т.А. Холомина. Рязань, 2013. 16 с.

Рассматривается лабораторная работа по курсу «Материалы и компоненты радиоэлектронных средств».

Предназначены студентам специальностей 140400, 200100, 201000, 210100 210400, 211000.

Табл. 1. Ил. 7. Библиогр.: 4 назв.

Магнитное поле, напряженность магнитного поля, индукция, магнитная проницаемость, магнитные потери, вихревые токи, ферромагнетики, ферриты

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Исследование свойств ферромагнитных материалов

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

Редактор Н.А. Орлова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 20.09.13. Формат бумаги 60х84.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 120 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: определение точек основной кривой магнитной индукции в переменном магнитном поле, изучение зависимости магнитной проницаемости от напряженности и частоты магнитного поля, температуры, а также определение мощности потерь в зависимости от частоты, затрачиваемых на формирование вихревых токов и гистерезис.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Единицы магнитных величин и магнитных свойств веществ

В электромагнитных устройствах автоматики, вычислительной и измерительной техники воздействие на магнитный элемент производится либо магнитным полем тока, проходящего по проводнику или обмотке, либо непосредственно магнитным полем (например, в феррозондах) или магнитным полем, которое сконцентрировано металлическим сердечником. В большинстве случаев основой электромагнитных элементов служит магнитный сердечник. Формируемое током в проводнике магнитное поле является, обычно, внешним по отношению к этому сердечнику. Прежде чем перейти к природе магнитных свойств вещества, напомним единицы магнитных величин в Международной системе единиц (СИ).

Внешнее магнитное поле линейного проводника с током I характеризуется напряженностью **H** магнитного поля (А/м) и является силовой характеристикой магнитного поля.

Если проводник равномерно намотан с количеством витков w на ферромагнитный сердечник с одинаковым сечением S по всей его длине l (например, на кольцевой сердечник), то напряженность магнитного поля в сердечнике $H = I\text{w}/l$.

Под действием протекающего через проводник тока в сердечниках магнитных элементов создается магнитный поток **Ф**.

Наряду с напряженностью магнитное поле характеризуется магнитной индукцией **B** (Тл), определяемой для равномерного поля выражением $B = \Phi/S$, где S – площадь, через которую проходит магнитный поток.

Магнитная постоянная $\boldsymbol{\mu_0}$ (магнитная проницаемость вакуума) представляет собой отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля в вакууме $\mu_0 = B/H$.

Напряженность внешнего магнитного поля не зависит от свойств среды (от свойств вещества), где создается магнитный поток. Магнитная же индукция определяется как напряженностью, так и свойствами среды (вещества), характеризующимися относительной магнитной проницаемостью **μ** (или просто магнитной проницаемостью), которая показывает, во сколько раз проницаемость вещества больше или меньше проницаемости вакуума.

Магнитная индукция в среде (упрощенно можно представить как магнитное поле внутри вещества)

$$B = \mu\mu_0 H, \qquad (1)$$

где μ $\mu_0 = \mu_a$ – абсолютная магнитная проницаемость вещества.

1.2. Классификация веществ по магнитным свойствам

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразделить на пять групп: *диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики*. Перечисленным видам магнетиков соответствуют пять различных видов магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм.

К *диамагнетикам* относят вещества, у которых магнитная восприимчивость отрицательна и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и ее производные), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.). Большинство полупроводников (кремний, германий, соединения A_3B_5, A_2B_6) и органических соединений, щелочно-галоидные кристаллы, неорганические стекла и др. также относят к диамагнетикам. Диамагнетиками являются все вещества с ковалентной химической связью и вещества в сверхпроводящем состоянии.

К *парамагнетикам* относят вещества с положительной магнитной восприимчивостью, не зависящей в слабых магнитных полях и при высоких температурах от напряженности внешнего магнитного поля. К числу парамагнетиков относят кислород, окись азота, щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов.

К *ферромагнетикам* относят вещества с большой положительной магнитной восприимчивостью (до 10^6), которая сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

Антиферромагнетиками являются вещества, в которых ниже некоторой температуры спонтанно возникает антипараллельная ориен-

тация элементарных магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. При нагревании антиферромагнетик испытывает фазовый переход в парамагнитное состояние. Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.). Типичными антиферромагнетиками являются простейшие химические соединения на основе металлов типа окислов, галогенидов, сульфидов, карбонатов и т.п.

К *ферримагнетикам* относят вещества, магнитные свойства которых обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Подобно ферромагнетикам они обладают высокой магнитной восприимчивостью, которая существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры. Наряду с этим ферримагнетики характеризуются и рядом существенных отличий от ферромагнитных материалов. Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но главным образом - различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

1.3. Намагничивание ферромагнитного материала

Под действием внешнего магнитного поля, созданного током в катушке, наложенной на магнитопровод из ферромагнетика, происходит процесс ориентации доменов в магнитопроводе и смещение их границ. Это приводит к намагничиванию стального магнитопровода (т.е. к росту величины внутреннего магнитного поля), причем намагниченность увеличивается с увеличением внешнего магнитного поля.

Намагниченность M (она характеризует магнитное поле внутри вещества) ферромагнитного материала растет только до определенного предельного значения, называемого намагниченностью насыщения M_s. Зависимость $B(H)$ является нелинейной и кривую $B(H)$ можно разделить на четыре участка:

1) практически линейный участок, соответствующий малым напряженностям поля, показывает, что магнитная индукция увеличивается относительно медленно и практически пропорционально напряженности поля;

2) нелинейный участок, на котором магнитная индукция B растет также практически пропорционально напряженности поля, но значительно быстрее, чем на начальном участке;

3) участок, который характеризует замедление роста величины индукции B;

4) участок магнитного насыщения, где зависимость $B(H)$ снова линейная, но рост индукции B очень сильно замедлен по сравнению со

вторым. Магнитная индукция, которая соответствует намагниченности насыщения, *называется индукцией насыщения* B_s . Такая сугубо нелинейная зависимость объясняется «поведением» доменов ферромагнитного материала, обладающих спонтанной (самопроизвольной) намагниченностью.

При внесении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно наблюдаются процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема). В слабом поле происходит увеличение объема доменов, у которых магнитный момент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При снятии магнитного поля положение границ доменов восстанавливается, т.е. процесс носит обратимый характер. При усилении поля изменения структуры доменов более значительны и при снятии внешнего поля положение границ доменов не восстанавливается. Образуется остаточная индукция. При дальнейшем увеличении напряженности поля происходит изменение угла вектора намагниченности доменов из направления вдоль оси легкого намагничивания в направление, совпадающее с направлением внешнего поля. При этом магнитное состояние материала достигает технического насыщения. Поведение кривой *B(H)* при циклическом изменении внешнего магнитного поля имеет характерный вид , называемый петлей гистерезиса, как показано на рис. 1

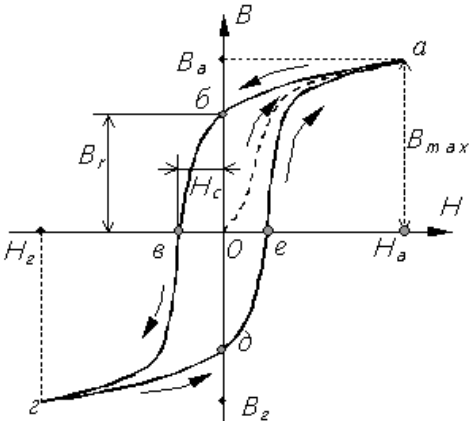


Рис. 1. График перемагничивания ферромагнетиков (петля гистерезиса)

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется, его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 2. Сплошная кривая, проходящая по вершинам петель, называется нормальной или основной кривой индукции.

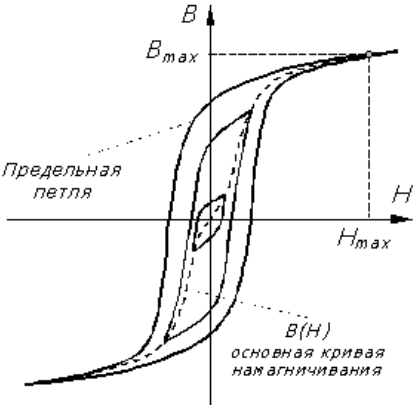


Рис. 2. Предельная петля гистерезиса

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы поворота магнитных моментов некоторых доменов и задержка роста зародышей перемагничивания. Под ними понимают небольшие объемы вещества с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Основными параметрами петли гистерезиса являются индукция насыщения B_S (B_{max}), остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_C и площадь петли, характеризующая удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания. Остаточной индукцией называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего поля. Коэрцитивная сила – напряженность размагничивающего поля, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для уменьшения его магнитной индукции до нуля. Форма петли гистерезиса характеризует процессы, происходящие в ферромагнетике. При относительно небольших затратах энергии внешнего поля на перемагничивание петля гистерезиса узкая, величина коэрцитивной силы мала. При больших затратах энергии петля гистерезиса широкая и значение коэрцитивной силы большое. Соответственно различают магнитомягкие материалы с $H_C<100$ А/м и магнитотвердые с $H_C>10^4$ А/м.

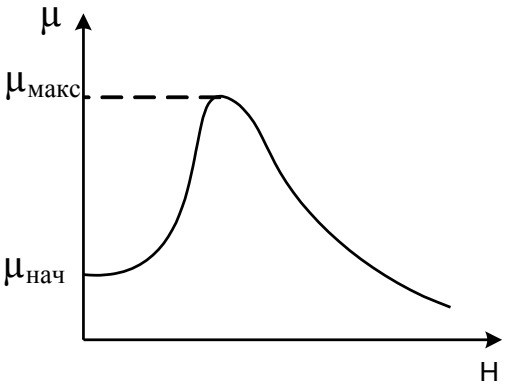


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Таким образом, зависимость магнитной индукции от напряженности поля у ферромагнитного материала достаточно сложная и не может быть выражена простой расчетной формулой. Поэтому при расчете магнитных цепей, содержащих ферромагнетики, применяют снятые экспериментально кривые намагничивания *B(H)* магнитных материалов. Кривая намагничивания впервые была получена экспериментально в 1872 году профессором Московского университета А.Г.Столетовым. На рис. 3 показана зависимость магнитной проницаемости от величины напряженности внешнего магнитного поля

1.4. Процесс перемагничивания ферромагнетиков

Рассмотрим процесс перемагничивания ферромагнетиков. Допустим, что замкнутый магнитопровод из ферромагнитного материала не намагничен и тока в витках катушки нет, т.е. $B=0$ *и* $H=0$ (начало координат на рис. 1). При постепенном увеличении намагничивающего тока, а следовательно, и напряженности поля от нуля до некоторого наибольшего значения магнитная индукция увеличивается по кривой начального намагничивания (*Оа*) и достигает соответствующего максимального значения B_a (рис. 1). Если затем ток и напряженность магнитного поля уменьшаются, то и магнитная индукция уменьшается, при соответствующих значениях напряженности магнитная индукция несколько больше, чем при увеличении напряженности. Кривая изменения магнитной индукции (участок *аб* на рис. 1) располагается выше кривой начального намагничивания. При нулевых значениях тока и напряженности поля магнитная индукция имеет некоторое значение B_r, называемое ***остаточной индукцией*** (отрезок *Об* на рис. 1).

Таким образом, магнитная индукция в ферромагнитном материале зависит не только от напряженности поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Это явление называется ***гистерезисом***. Оно обусловлено как бы «внутренним трением», возникающим при изменении ориентации магнитных моментов доменов. При изменении направления намагничивающего тока, а следовательно, и направления напряженности магнитного поля и постепенном увеличении тока обратного направления напряженность поля достигает значения H_c, называемого ***коэрцитивной силой*** (отрезок *Ов*), при котором магнитная индукция $B=0$. При дальнейшем увеличении тока и напряженности поля магнитопровод намагничивается в противоположном направлении, и при напряженности поля $H_c = -H_a$ магнитная индукция достигнет значения $B_c = -B_a$. Затем при уменьшении тока и напряженности поля до нуля магнитная индукция $B_д$ становится равной $-B_б$. Наконец, при следующем изменении направления тока и напряженности

поля и увеличении ее до прежнего значения H_a магнитная индукция увеличится также до прежнего значения B_a.

Рассмотренный цикл перемагничивания ферромагнетика по кривой *абвгдеа* называется ***гистерезисным циклом*** (*петлей гистерезиса*). Такая симметричная замкнутая петля гистерезиса (рис. 2) получается в действительности только после нескольких перемагничиваний с увеличением напряженности магнитного поля до максимального значения. При первых циклах перемагничивания петля несимметричная и незамкнутая. Наибольшая замкнутая петля, которая может быть получена для данного ферромагнитного материала, называется *предельной* (рис. 2). При напряженности поля $H > H_{max}$ получается уже безгистерезисный участок кривой *B(H)*.

Если для данного ферромагнитного материала, выбирая различные наибольшие значения напряженности магнитного поля, получить несколько симметричных петель гистерезиса (рис. 2) и соединить вершины петель, то получим кривую, называемую ***основной кривой намагничивания***, близкую к кривой начального намагничивания. Циклическое перемагничивание можно применить для размагничивания магнитопровода, т.е. для уменьшения остаточной индукции до нулевого значения. С этой целью магнитопровод подвергают воздействию изменяющегося по направлению и постепенно уменьшающегося магнитного поля.

1.5. Магнитная проницаемость

Магнитную проницаемость вещества разделяют на абсолютную

$$\mu_a = \frac{B}{H}$$

и относительную (в дальнейшем слово относительная будем опускать)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

Подставляя в эти соотношения конкретные значения B и H, получают различные виды магнитной проницаемости, которые применяют в технике (свыше нескольких десятков).

Наиболее часто используют понятия магнитной проницаемости начальной $\mu_{нач}$, максимальной $\mu_{макс}$, эффективной $\mu_{эф}$ и дифференциальной $\mu_{диф}$. Для точки А рис. 4 магнитная проницаемость μ определяется как тангенс угла наклона секущей 0А к оси абсцисс, т. е.

$$\mu = tg\alpha = \frac{B_A}{\mu_0 H_A}.$$

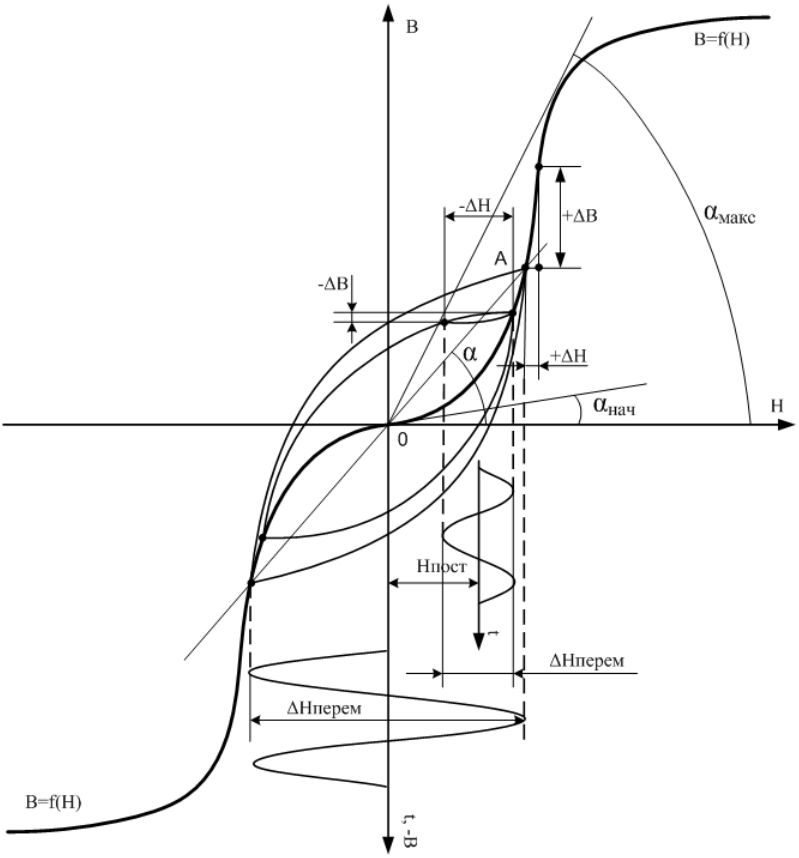


Рис. 4. Определение различных видов магнитной проницаемости

Это эквивалентно воздействию на магнитный материал синусоидального переменного магнитного поля величиной $\Delta H_{перем}$ без постоянной составляющей (рис. 4). В некоторых случаях такую проницаемость называют *эффективной*.

Начальная и максимальная проницаемости представляют собой частные случаи магнитной проницаемости вещества:

$$\mu_{нач} = \lim_{H \to 0} \frac{B}{\mu_0 H} = tg\alpha_{нач};$$

$$\mu_{макс} = \frac{B_{\mu_{макс}}}{\mu_0 H_{\mu_{макс}}} = tg\alpha_{макс},$$

т. е. наклон касательной на начальном участке кривой B =f(H) характеризует начальную проницаемость, а наклон прямой, проведенной из начала координат в точку верхнего перегиба кривой, соответствует максимальному значению магнитной проницаемости.

Дифференциальную проницаемость $\mu_{диф}$ определяют как производную от магнитной индукции по напряженности магнитного поля для любой точки кривой намагничивания, т.е. она представляет собой тангенс угла наклона между осью абсцисс и касательной к кривой намагничивания в этой точке. Этот угол примерно будет соответствовать углу прямой, проведенной через две точки малого гистерезисного цикла при одновременном воздействии на образец постоянного $H_{пост}$ и переменного $\Delta H_{перем}$ магнитного полей (рис. 4) при условии, что выполняется соотношение $\Delta H_{перем} << H_{пост}$.

Как видно из графиков, магнитная проницаемость с ростом напряженности поля изменяется в весьма широких границах, что затрудняет ее применение для расчетов. На кривой μ=f*(H)* (рис. 3) отмечают два характерных значения магнитной проницаемости: начальная – $\mu_{нач}$ и максимальная – $\mu_{макс}$.

Начальная магнитная проницаемость характеризует возможность использования ферромагнетика в слабых магнитных полях. Максимальная магнитная проницаемость определяет верхнюю границу использования материала. Так, например, типичное значения магнитной проницаемости для листовой электротехнической стали $\mu_{нач}$=250 - 1000, а $\mu_{макс}$= 500 – 30000.

1.6. Потери в магнитных материалах

При намагничивании магнитного материала переменным полем в нем возникают потери энергии, приводящие к нагреву материала. Петля гистерезиса, характеризующая затраты энергии за один цикл перемагничивания, расширяется (увеличивает свою площадь) за счет возникновения различного вида потерь.

Потери на гистерезис $P_Г$, отнесенные к единице объема материала (удельные потери) определяют по формуле

$$P_Г = f\frac{\oint HdB}{\gamma},$$

где γ - плотность материала в кг/м^3, f – частота в Гц.

Наряду с потерями на гистерезис $P_Г$ возникают и другие потери в магнитных материалах: *потери на вихревые токи* P_B и *дополнитель-*

ные потери $P_Д$. Петлю гистерезиса на переменном поле называют динамической, а сумму составляющих потерь — полными или суммарными потерями.

Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных, но также и от электрических свойств материала (удельного электрического сопротивления) и формы сердечника. Для листового образца потери P_B можно найти из выражения

$$P_B = \frac{164 d^2 f^2 B_{макс}^2 \eta}{\gamma \rho},$$

где $B_{макс}$ – амплитуда магнитной индукции, Тл;
f – чатота переменного тока, Гц;
d – толщина листа, м;
γ - плотность материала в кг/м^3;
ρ – удельное электросопротивление, Ом·м,
η – коэффициент формы.

Дополнительные потери нельзя рассчитать аналитически, их определяют обычно как разность между полными потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи:

$$P_Д = P-(P_Г + P_B).$$

2. Выполнение лабораторной работы

Испытание ферромагнитных материалов производится на установке, обобщенная схема которой приведена на рис. 5. Здесь М – испытываемый образец из ферромагнитного материала; R_0 - образцовое сопротивление; r и С - сопротивление и конденсатор фазовращательной цепочки. Соответственно 2 и 3 – горизонтальный и 3 – 4 вертикальный входы осциллографа или графопостроителя, 4 - 1 – вход сигнала с генератора. Отклонение луча осциллографа по горизонтали пропорционально падению напряжения на R_0, которое, в свою очередь, пропорционально величине намагничивающего тока и, следовательно,

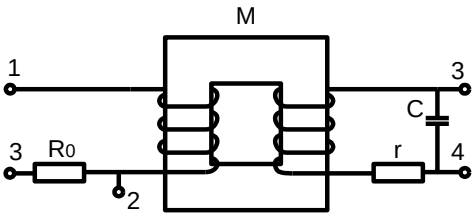


Рис. 5. Схема установки для испытания ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях

величине *H*. Так как отклонение луча по горизонтали пропорционально приложенному напряжению, величину отклонения можно выразить в единицах измерения напряженности поля *H*. Магнитная индукция *B* пропорциональна выходному напряжению, измеренному между точками 3 и 4 вертикального входа усилителя осциллографа. Это напряжение зависит от величины магнитного потока в магнитопроводе М и скорости его изменения (а, следовательно, величине *B* при неизменной частоте). Таким образом, можно проградуировать отклонение луча по вертикали в единицах измерения магнитной индукции и, используя такую схему, можно получить на экране осциллографа петлю гистерезиса ферромагнитного материала.

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения магнитных свойств вещества на специализированном стенде. Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда магнитных материалов в зависимости от изменения параметров внешнего магнитного поля. Измерение параметров магнитных материалов осуществляется по внешнему виду петли гистерезиса – зависимости индукции магнитного поля (В, Тл) от величины его напряженности (Н, А/м).

Для начала работы необходимо запустить файл «магн_матер» на рабочем столе ПК. После запуска файла появится окно, изображенное на рис. 6, а. Оно отображает название выполняемой лабораторной



а б

Рис. 6. Вид окна начала работы (а) и выбора материала (б)

работы и кнопок управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 6, б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлено описание и некоторые характеристики выбранного магнитного материала. После щелчка по кнопке «К измерениям» программа переключается на режим измерения параметров магнитного материала по параметрам петли гистерезиса. На экране отображается окно специализированного измерительного стенда, как показано на рис. 7.

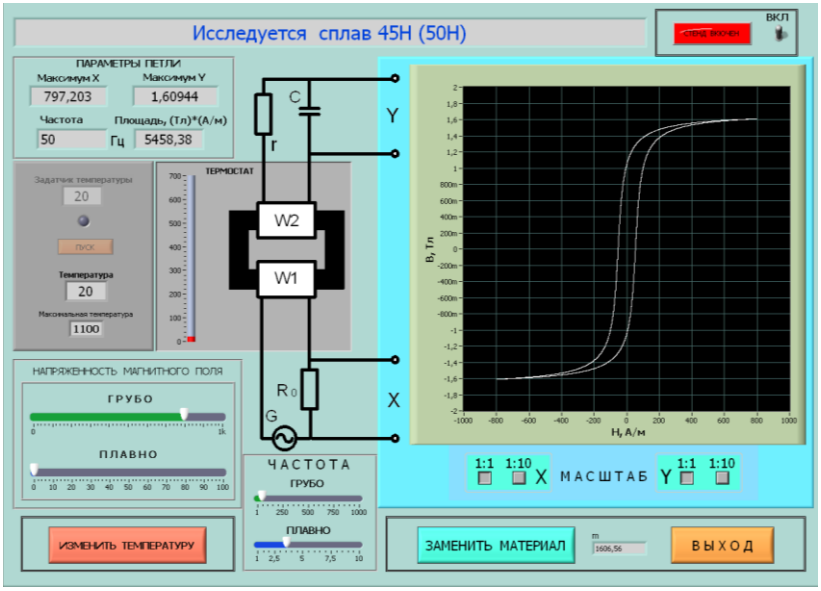


Рис. 7. Окно измерительного стенда

2.1. Проведение измерений

В окне измерительного стенда отображаются осциллограф, измерительная камера с образцом магнитного материала и элементы управления стендом. Здесь же отображается схема подключения исследуемого образца материала и основные параметры петли гистерезиса.

Необходимо включить стенд щелчком по тумблеру «Вкл». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 ^{0}C. Измерение параметров материала необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя движок на шкале грубого и плавного изменения частоты (обычно 1 Гц).
2. Изменяя напряженность магнитного поля, движками «Грубо» и «Плавно», получить на графопостроителе нужный вид петли гистерезиса. В левом верхнем углу при этом отображаются координаты максимальных значений частной петли, ее площадь и частота изменения внешнего магнитного поля. Для изменения масштаба отображения петли гистерезиса можно использовать соответствующие кнопки на графопостроителе.
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и продолжить измерения.
4. Изменяя значение напряженности внешнего магнитного поля, вновь произвести соответствующие измерения параметров петли гистерезиса. При необходимости изменить частоту и температуру в соответствии с пунктами 1 и 3 данного раздела.
5. При необходимости выбрать другой магнитный материал, используя кнопку «Заменить материал».

3. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного магнитного материала в указанном диапазоне температур и частот.
2. Построить начальную кривую намагниченности на частоте 1 Гц при температуре 20 ^{0}C. Для этого установить нужную частоту внешнего магнитного поля и, постепенно увеличивая его напряженность, занести значение координат B и H в таблицу, пример которой показан ниже. По координатам конечных точек петли гистерезиса рассчитать относительную магнитную проницаемость μ.

H, А/м				
B, Тл				
μ				

Построить график зависимости B = f(H). Построить график зависимости относительной магнитной проницаемости от величины напряженности магнитного поля, используя соотношение $\mu = B/(\mu_0 H)$. Используя кнопки изменения масштаба на графопостроителе, определить значение коэрцетивной силы H_C для исследуемого материала при максимальном значении напряженности магнитного поля.

3. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от частоты внешнего магнитного поля. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменяя частоту и поддерживая постоянное значение B изменением H, занести данные в таблицу, пример которой показан ниже.

F, Гц				
H, А/м				
B, Тл				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости от частоты.

4. Исследовать потери в материале от частоты магнитного поля. Для этого устанавливать и поддерживать постоянным, при изменении частоты, значение индукции магнитного поля по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца). Изменять частоту и занести полученные значения площади гистерезисной кривой в таблицу, пример которой показан ниже.

F, Гц				
S, (Тл·А/м)				

Рассчитать удельные потери в образце и построить график удельных потерь в материале от частоты. Удельные потери (Вт/кг) определяют делением площади петли гистерезиса на плотность вещества с учетом частоты изменения магнитного поля (раздел 1.6.).

5. Исследовать зависимость относительной магнитной проницаемости материала от температуры на частоте 1 Гц. Для этого установить значение индукции по указанию преподавателя (не более 0,5 от индукции насыщения образца) и поддерживать ее неизменной. Изменять температуру в соответствии с пунктом 3 раздела 2.1 методического указания и занести полученные значения координат B и H в таблицу, пример которой показан ниже.

T, ^{0}C				
H, А/м				
B, Тл				
μ				

Построить график изменения относительной магнитной проницаемости μ от температуры.

4. Содержание отчета

1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.
2. Отчет должен содержать:
- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию.

5. Контрольные вопросы

1. Назовите основные физические величины, характеризующие магнитные поля в вакууме и веществе.
2. Чем отличаются диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики?
3. Что такое «домен» ферромагнитного материала?
4. Объясните кривую намагничивания ферромагнетиков.
5. Чем объясняется техническое насыщение величины индукции в ферромагнитном материале?
6. Что такое «коэрцетивная» сила и «остаточная индукция»?
7. Как получается петля гистерезиса ферромагнитного материала?
8. Что такое частные гистерезисные циклы и как строится начальная кривая намагниченности?
9. Как относительная магнитная проницаемость зависит от величины напряженности магнитного поля?
10. Как относительная магнитная проницаемость зависит от частоты изменения напряженности магнитного поля?
11. Как относительная магнитная проницаемость зависит от температуры?
12. Что такое эффективная магнитная проницаемость и как она определяется?
13. Что такое реверсивная магнитная проницаемость и как она определяется?
14. Как определяется статическая и динамическая магнитные проницаемости?
15. Какие виды потерь различают в магнитных материалах и как они определяются?

Библиографический список

1. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 350 с.
2. Пасынков В.В. Материалы электронной техники: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 406 с.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленигр. отд-ние, 1985. – 304 с.
4. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. Изд. 2-е, перераб. и доп. Учебник для специальности «Полупроводники и диэлектрики» вузов. М.: Высш. школа, 1976. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В таблице представлены параметры удельных потерь различных марок стали при промышленной частоте 50 Гц и магнитной индукции стали в сильных полях

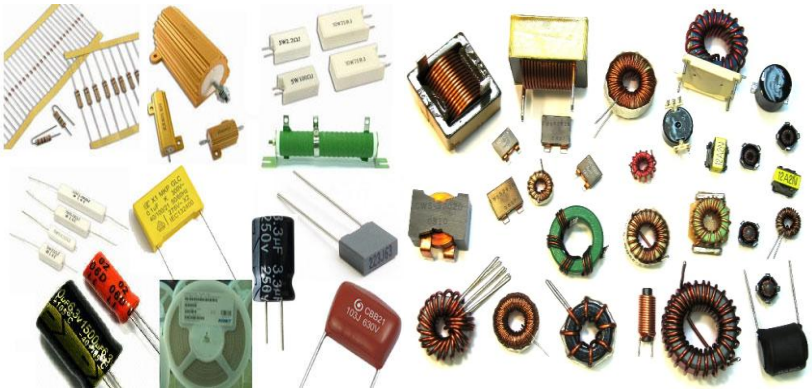
Марка	Толщина листа или ленты, мм	Удельные потери Вт/кг, не более, при индукции, Тл, равной	
		1,0	**1,5**
1211	1,0	5,8	13,4
	0,5	3,3	7,7
1213	1,0	4,7	10,7
	0,65	3,2	7,5
	0,5	2,8	6,5
1411	0,5	2,0	4,4
	0,35	1,6	3,6
1511	0,5	1,55	3,5
	0,35	1,35	3,0
2011	0,65	3,8	9,0
	0,5	3,5	8,0
2111	0,65	4,3	10,0
	0,5	3,5	8,5
2311	0,65	2,5	5,8
	0,5	1,9	4,4

4587

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методические указания
к лабораторным работам



Рязань 2012

УДК 621.39

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: методические указания к лабораторным работам /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: С.И. Мальченко, В.Г. Мишустин, В.Н. Тимофеев. Рязань, 2012. 84 с.

Рассматриваются лабораторные работы по курсу «Материалы и компоненты радиоэлектронных средств».

Предназначены студентам специальностей 140400, 200100, 201000, 210100 210400, 211000.

Табл. 13. Ил. 39. Библиогр.: 6 назв.

Сопротивление диэлектриков, энергия активации, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, конденсатор, катушка индуктивности, электрическая прочность

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра биомедицинской и полупроводниковой электроники Рязанского государственного радиотехнического университета (зав. кафедрой проф. С.П. Вихров)

Материалы и компоненты радиоэлектронных средств

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
М и ш у с т и н Владислав Геннадьевич
Т и м о ф е е в Владимир Николаевич

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 18.06.12. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 5,25.
Тираж 50 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения сопротивления твердых диэлектриков и исследование температурной зависимости их удельного сопротивления.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Электропроводность диэлектриков

Необходимым условием наличия электропроводности у любого вещества является существование в нем свободных *заряженных материальных частиц* — носителей зарядов. При наличии электрического поля на каждый носитель тока действует электродвижущая сила E. При этом плотность тока J равна

$$J = n \cdot q \cdot v, \qquad (1)$$

где n - концентрация зарядов в данном объеме;
q - величина заряда;
v - скорость движения заряда.

Окончательно электропроводность γ можно определить как

$$\gamma = n \cdot q \cdot \frac{v}{E} \ . \qquad (2)$$

Отношение v/E , определяющее скорость при напряженности поля, равной единице, называют *подвижностью* носителей и обычно обозначают буквой **μ**.

В диэлектриках можно выделить следующие виды электропроводности.

1. Электронная электропроводность характеризуется перемещением электронов под действием поля. Помимо металлов, ее обнаруживают у углерода, некоторых соединений металлов с кислородом, серой и другими веществами и у многих полупроводников. При электронной электропроводности отсутствует видимый перенос вещества с током.

2. Ионная электропроводность обусловливается движением ионов. Ее наблюдают у электролитов - растворов и расплавов солей, кислот, щелочей и подобных соединений, а также у многих диэлектриков. Ионы создаются электролитической диссоциацией, т. е. расщеплением молекул веществ на две части: катионы (+) и анионы (-). При движении ионов в электрическом поле имеет место электролиз, т. е. видимый перенос вещества и образование вблизи электродов новых химических веществ. Количество перенесенного с током вещества про-

порционально количеству прошедшего через вещество электрического тока, в соответствии с известными законами Фарадея. Общая проводимость вещества равна сумме анионной и катионной электропроводности.

3. Молионная электропроводность обусловлена движением заряженных частиц – молионов (целых сгустков молекул). Наблюдают ее в коллоидных системах, в которых дисперсионная фаза взвешена в дисперсионной среде. Заряженные частицы дисперсионной фазы называют *молионами.* Движение молионов под действием электрического поля называют *электрофорезом.* Большое влияние на электропроводность жидких, а также аморфных вязких материалов (смолы, компаунды) оказывает вязкость вещества.

1.1.1. Электропроводность газов

Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают исключительно малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с молекулами. Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются коротковолновые воздействия (космическое, рентгеновское, радиоактивное излучение), а также тепловое воздействие. Электропроводность газа, обусловленную действием внешних ионизаторов, называют *несамостоятельной*, а обусловленную ударной ионизацией - *самостоятельной* электропроводностью.

В слабых полях ударная ионизация отсутствует и самостоятельной проводимости не обнаруживается. При ионизации газа одновременно происходит соединение положительных ионов и отрицательных электронов в нейтральные молекулы. Этот процесс носит название *рекомбинация* и препятствует безграничному росту числа ионов. Это означает, что условие равновесия заключается в равенстве числа вновь образующихся ионов числу рекомбинирующих ионов.

Предположим, что ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено электрическое напряжение. Ионы и электроны под влиянием напряжения будут перемещаться, и в цепи возникнет ток. Часть ионов будет нейтрализоваться на электродах, часть исчезнет за счет рекомбинации. Увеличение напряжения между электродами приведет к тому, что большая часть не рекомбинированных носителей заряда будет достигать электродов и увеличивать ток в цепи за счет увеличения скорости их перемещения. Причем чем больше будет величина поля, тем больше носителей заряда будет достигать электродов и не успевать рекомбинировать. Плотность тока в этом случае (при относительно слабых напряженностях поля) будет про-

порциональна напряженности поля, т. е. выполняется закон Ома.

При больших напряженностях поля наступит момент, когда все свободные носители заряда из-за высокой скорости движения будут достигать электродов, так и не успевая рекомбинировать. Поскольку количество свободных носителей, возникающих в газе в единицу времени, неизменно, то ток в цепи, при изменении напряженности поля перестанет изменяться. Такой ток называют *током насыщения*.

На рис. 1 показан характер зависимости тока от напряжения в газах. Начальный участок кривой до напряжения U_H соответствует выполнению закона Ома. По мере возрастания величины приложенного напряжения ионы переносятся к электродам, не успевая рекомбинировать, и при некотором напряжении U_H все ионы, создаваемые в газовом промежутке, будут разряжаться на электродах. Дальнейшее увеличение напряжения уже не будет вызывать возрастания тока, что соответствует горизонтальному участку кривой рис. 1 (ток насыщения при напряжениях от U_H до U_{KP}). Ток насыщения для воздуха в нормальных условиях, влажности и расстояния между электродами 1 см наблюдается при напряженностях поля около 0,6 В/м.

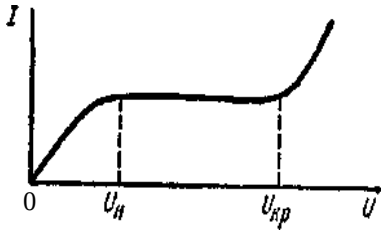


Рис.1. Зависимость тока в воздушном зазоре от напряжения

Плотность тока насыщения в воздухе весьма мала и составляет величину порядка 10^{-15} А/м^2. Поэтому воздух можно рассматривать как совершенный диэлектрик до тех пор, пока не создадутся условия для появления ударной ионизации. Ток при увеличении напряжения остается постоянным, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов. При возникновении ударной ионизации появляется самостоятельная электропроводность (выше U_{KP} на рис. 1) и ток вновь начинает увеличиваться с возрастанием напряжения.

1.1.2. Электропроводность жидкостей

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В нейтральных жидкостях электропроводность определяется наличием диссоциированных примесей, в том числе влаги. В полярных жидкостях электропроводность зависит не только от примесей, иногда она вызывается диссоциацией молекул самой жидкости. Электропроводность жидкостей носит в основном ионный характер. Ионная электропроводность подразделяется на *собственную* и *примесную*.

Собственная электропроводность обусловлена движением ионов, получаемых от частичной диссоциации молекул жидкости. Полярные жидкости, как правило, сильнее диссоциированы и имеют большую электропроводность, чем неполярные. В неполярных и слабополярных жидких диэлектриках (минеральные масла, кремнийорганические, полиизобутиленовые и другие жидкости) электропроводность в основном определяется примесями и не является характерной для данного диэлектрика.

При тепловых колебаниях молекула в некоторых случаях получает достаточную кинетическую энергию для отрыва от соседней молекулы и приобретает поступательное движение. Направление этих перемещений беспорядочно. Однако если молекула имеет электрический заряд, то при приложении электрического поля к жидкости она начинает направленное движение и участвует в проводимости.

В нейтральных жидкостях их электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей (*примесная электропроводность*), в том числе от влаги; в полярных - еще и от диссоциации молекул самой жидкости. Ток в жидкости обусловливается перемещением ионов и молионов. Наблюдается зависимость роста удельной проводимости γ жидких диэлектриков от температуры. Это связано с ростом количества свободных носителей заряда в жидкости за счет увеличения энергии частиц жидкости. Уменьшение вязкости жидкости с увеличением температуры увеличивает подвижность ионов и других заряженных частиц и также способствует увеличению проводимости. Увеличение температуры также способствует активизации явления диссоциации молекул жидкости.

1.1.3. Объемная электропроводность твердых диэлектриков

Твердые диэлектрики предназначены в основном для электрической изоляции различных узлов РЭА. По самому своему назначению электроизоляционные материалы совершенно не должны пропускать электрический ток под действием приложенного электрического напряжения, т. е. они должны быть диэлектриками. Однако «идеальных» диэлектриков не существует и все практически применяемые электроизоляционные материалы при приложении напряжения все же пропускают некоторый, обычно весьма незначительный, ток.

Это обусловлено наличием в технических диэлектриках небольшого числа свободных носителей электрических зарядов, а также инжекцией зарядов из электродов. Такие токи принято называть токами сквозной электропроводности, или токами утечки.

Наряду с токами сквозной электропроводности в диэлектрике могут появляться и токи смещения. Упругое смещение (т.е. смещение на небольшое расстояние и возврат в исходное положение после снятия

электрического поля) любых связанных зарядов в веществе под действием электрического поля до момента установления и получения равновесного состояния обусловливает появление поляризационных токов, или токов смещения в диэлектриках. Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризациях настолько кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи же, вызванные замедленными видами поляризации, могут быть зафиксированы у многих технических диэлектриков и называются абсорбционными токами.

При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они имеют место в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле. Таким образом, полная плотность тока в диэлектрике представляет собой сумму плотностей токов утечки и смещения:

$$\mathbf{J}=\mathbf{J}_{\mathbf{УТ}}+\mathbf{J}_{\mathbf{СМ}}. \qquad (3)$$

Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения (индукции) **D:**

$$\mathbf{J}_{\mathbf{СМ}}=\mathrm{d}\mathbf{D}/\mathrm{d}\tau=\mathbf{J}_{\mathrm{АБ}}. \qquad (4)$$

Поляризационные токи (токи смещения или абсорбционные токи) необходимо принимать во внимание при измерениях проводимости диэлектриков, потому что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только ток утечки, но и сопровождающий его обратимый ток, т.е. ток абсорбции. Вследствие этого может создаться неправильное представление о большой проводимости диэлектрика. Таким образом, проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по току утечки, который сопровождается выделением и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только током утечки, но и активными составляющими поляризационных токов.

Поскольку измерение поляризационных токов даже при замедленных механизмах поляризации осуществить довольно трудно, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на величину тока, измеренную через одну минуту после включения напряжения (т. е. учитывают только токи утечки в диэлектрике). Значение $R_{УТ}$ (или $R_{ИЗ}$) в некоторых случаях зависит не только от самого диэлектрика, но и от материала электродов. Особенностью электропроводности диэлектриков в большинстве случаев является ее неэлектронный *(ионный)* характер.

У твердых изоляционных материалов различают объемную и поверхностную электропроводности. Для сравнительной оценки объемной

и поверхностной электропроводности различных материалов используют понятие удельного объемного ρ_V и удельного поверхностного ρ_S сопротивлений.

Принимают, что ρ_V численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит через две противоположные грани этого куба, при этом величина ρ_V выражается в Ом*м.

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

$$\rho_V = R_V \cdot \frac{S}{h} \quad , \tag{5}$$

где R_V — объемное сопротивление, Ом;

S — площадь электрода, $м^2$;

h — толщина образца, м .

Для того чтобы носитель заряда стал свободным, необходимо воздействовать на него некоторой энергией, которую обычно называют *энергией активации*. В процессе прохождения электрического тока через твердый диэлектрик содержащиеся в нем ионы примесей могут частично удаляться, выделяясь на электродах. Это с течением времени приводит к уменьшению проводимости и росту сопротивления диэлектрика.

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена главным образом перемещением ионов, вырываемых из решетки под влиянием флуктуации теплового движения. При низких температурах передвигаются слабо закрепленные ионы, в частности ионы примесей. При высоких температурах движутся основные ионы кристаллической решетки. В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность зависит от наличия примесей.

В каждом отдельном случае вопрос о механизме электропроводности решается на основании данных об энергии активации носителя заряда. Известно, например, что для каменной соли энергия активации ионов натрия при нормальной температуре составляет около 0,85 эВ. Энергия активации ионов хлора в три раза больше, а энергия активации электронов равна 6 эВ, тогда как средняя энергия теплового движения при комнатной температуре составляет всего лишь 0,025 эВ.

Подвижность электронов на много порядков больше, чем подвижность ионов; в двуокиси титана, например, подвижность электронов составляет около $10^{-4} м^2/В*с$, тогда как подвижность ионов в алюмосиликатной керамике всего лишь $10^{-13} – 10^{-16}$ $м^2$ /В*с. В связи с этим в диэлектрике с электронной электропроводностью концентрация электронов в 10^9 - 10^{12} раз меньше, чем концентрация носителей в диэлектрике с ионной электропроводностью при одинаковом заряде носителей и оди-

наковом значении удельной проводимости.

Известно, что при ионной электропроводности число диссоциированных ионов находится в экспоненциальной зависимости от температуры, и тогда проводимость может быть представлена следующей зависимостью:

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{b}{T}}, \qquad (6)$$

где A и b – коэффициенты зависящие от параметров материала диэлектрика.

Если в диэлектрике электропроводность обусловлена носителями с различной энергией активации Э, то зависимость электропроводности от температуры может быть представлена в виде

$$\gamma = \sum A_i e^{-\frac{Э_i}{kT}}, \qquad (7)$$

где k – постоянная Больцмана;

A_i – коэффициент, зависящий от параметров носителя заряда;

$Э_i$ – энергия активации носителя заряда.

В связи с этим кривые логарифмической зависимости удельной проводимости от температуры имеют изломы, как показано на рис. 2.

При низких температурах электропроводность обусловлена ионизированными примесями, при высоких температурах она становится собственной. В некоторых случаях излом кривой температурной зависимости логарифма удельной проводимости объясняется тем, что ионы основного вещества имеют различные энергии диссоциации.

Заменяя γ на 1/ρ, получают выражение для зависимости удельного объемного сопротивления от температуры:

$$\rho = B \cdot e^{\frac{b}{T}}, \qquad (8)$$

где B и b – постоянные, характеризующие данный материал.

Собственная электропроводность твердых тел и изменение ее от температуры определяются структурой вещества и его составом. В телах кристаллического строения с ионной решеткой электропроводность связана с валентностью ионов. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей удельной проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. Так, для кристалла NaCl удельная проводимость значительно больше, чем для кристаллов MgO или $A1_2O_3$.

В большинстве кристаллов удельная проводимость неодинакова по разным осям. Например, в кварце удельная проводимость в направлении, параллельном главной оси, примерно в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном к этой оси. Для многих ионных кристаллов и других диэлектриков коэффициент b в формулах (6) и (8) близок к величине 10^4.

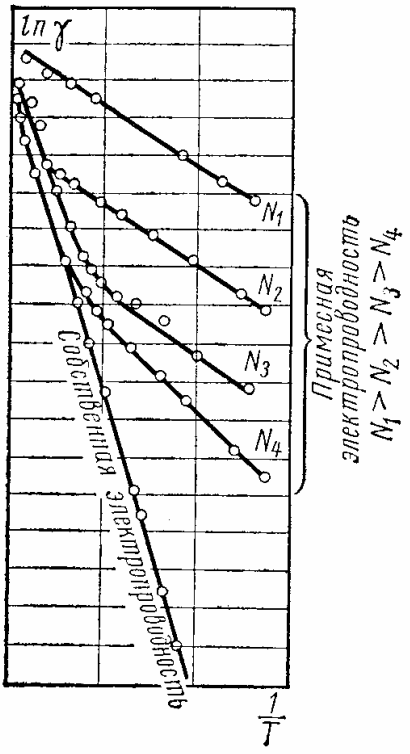


Рис. 2. Температурная зависимость удельной проводимости диэлектриков

В кристаллических телах с молекулярной решеткой (сера, полиэтилен, парафин) удельная проводимость мала и определяется в основном наличием примеси.

Величина удельной проводимости аморфных тел связана, прежде всего, с их составом. Высокомолекулярные органические полимеры обладают удельной проводимостью, зависящей в значительной степени от целого ряда факторов: от химического состава и наличия примесей, от степени полимеризации (например, для фенолоформальдегидной смолы), от степени вулканизации (для эбонита). Органические нейтральные аморфные диэлектрики, как, например, полистирол, отличаются очень малой удельной проводимостью.

Большую группу аморфных тел составляют неорганические стекла. Удельная проводимость стекол зависит главным образом от химического состава; это дает возможность в ряде случаев получать заранее заданную величину удельной проводимости.

Твердые пористые диэлектрики при наличии в них влаги, даже в ничтожных количествах, резко увеличивают свою удельную проводимость. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление, но при нахождении высушенных материалов во влажной среде величина сопротивления вновь уменьшается.

Степень изменения электрических свойств материалов при увлажнении зависит не только от количества воды, проникшей в поры материала. В том случае, когда поглощенная влага способна образовать нити или пленки по толщине изоляции, которые могут пронизывать весь промежуток между электродами (или значительную область этого промежутка), даже весьма малые количества поглощенной влаги приводят к

резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределяется по объему материала в виде отдельных, не соединяющихся между собой малых включений, то влияние влаги на электрические свойства материала менее существенно.

Наиболее заметное снижение удельного объемного сопротивления под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, которые содержат растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой проводимостью. В таких диэлектриках при нагревании влажного образца вначале величина ρ уменьшается за счет увеличения степени диссоциации примесей в водном растворе, затем идет удаление влаги - сушка и только при более высоких температурах наблюдается снижение ρ от температуры по законам, приведенным ранее.

Для уменьшения влагопоглощения и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их *пропитка.* Необходимо иметь в виду, что пропитка целлюлозных волокнистых материалов и других пористых органических диэлектриков дает лишь замедление увлажнения материала, не влияя на величину ρ после длительного воздействия влажности. Это объясняется тем, что молекулы пропиточных материалов имеют весьма большие размеры по сравнению с размерами молекул воды и не в состоянии создать полную непроницаемость пор материала для влаги, а в наиболее мелкие поры они вообще не могут попасть.

При больших напряженностях электрического поля, близких к напряженностям электрического пробоя, необходимо учитывать возможность появления в твердых диэлектриках электронного тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, благодаря чему наблюдается отступление от закона Ома.

1.1.4. Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S численно равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата.

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению $R_{ИЗ}$, складывается из объемной и поверхностной проводимостей (следовательно, учитываются объемное и поверхностное сопротивления). Удельное поверхностное сопротивление можно определить по формуле

$$\rho_S = R_S \cdot \frac{d}{h} \ , \qquad (9)$$

где R_S - поверхностное сопротивление образца материала между парал-

лельно поставленными электродами шириной d, отстоящими друг от друга на расстоянии h.

Полное сопротивление изоляции $R_{ИЗ}$ твердого диэлектрика определяется как соединение параллельно включенных поверхностного R_S и объемного R_V сопротивлений. Поверхностная электропроводность чаще всего обусловлена присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Вода, как известно, обладает значительной проводимостью. Достаточно наличия тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы обнаружить заметную проводимость, которая определяется в основном толщиной этого слоя.

Однако, поскольку сопротивление адсорбированной водяной пленки связано с природой материала, на поверхности которого она находится, удельную поверхностную проводимость обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика. Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому величина относительной влажности является решающим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости диэлектрика. Особенно резкое увеличение поверхностной проводимости обычно наблюдается, когда величина относительной влажности превышает 50—60 %.

Удельная поверхностная проводимость тем ниже, чем меньше полярность вещества и чем чище поверхность диэлектрика. Причем присутствие загрязнений на поверхности относительно мало сказывается на удельной поверхностной проводимости гидрофобных диэлектриков и сильно влияет на проводимость гидрофильных диэлектриков.

В зависимости от пределов значений удельного поверхностного сопротивления, обусловленных взаимодействием с влагой, все материалы можно подразделить на несколько групп:

1) не растворимые в воде диэлектрики;
2) частично растворимые в воде диэлектрики;
3) диэлектрики, имеющие пористую структуру.

Не растворимые в воде диэлектрики делятся на две подгруппы:

а) нейтральные и слабополярные - не смачивающиеся водой (парафин, полистирол, янтарь, сера);

б) дипольные и ионные - смачивающиеся водой (канифоль, некоторые виды керамики и др.).

Все материалы подгруппы (а) характеризуются высоким удельным поверхностным сопротивлением, мало зависящим от влажности окружающей среды. Удельное поверхностное сопротивление у материалов подгруппы (б) во влажной среде ниже, чем у материалов подгруппы (а), но может быть и достаточно большим при полном отсутствии загрязнений на их поверхности.

Частично растворимые в воде диэлектрики. К этой группе относится большинство технических стекол. Таким материалам свойственно более низкое удельное поверхностное сопротивление, в значительной мере зависящее от влажности.

Диэлектрики, имеющие пористую структуру. К этим диэлектрикам относятся волокнистые материалы (органические и неорганические), мрамор и большинство пластических масс. Благодаря пористой структуре во влажной среде эти материалы обнаруживают большую удельную поверхностную проводимость.

Для того чтобы повысить поверхностное сопротивление, применяют разнообразные приемы очистки поверхности - промывку водой, растворителями, прокаливание при температуре 600—700 °С.

Наиболее эффективной очисткой поверхности изделия, не впитывающего воду, является продолжительное кипячение в дистиллированной воде. Пропитка поверхностных слоев детали парафином или церезином не обеспечивает достаточной устойчивости значений ρ_S при высокой влажности. Это связано с возможностью проникновения влаги в микропоры, поверхности изделия из-за влагопроницаемости перечисленных защитных покрытий. Покрытие керамики и стекол кремнийорганическими лаками значительно повышает величину поверхностного сопротивления изделий во влажной среде.

Таким образом, зависимость удельного поверхностного сопротивления от влажности обусловлена наличием на поверхности диэлектрика гигроскопических и диссоциирующих на ионы веществ. Влага, адсорбируемая поверхностью, способствует появлению ионов из-за ее диссоциации. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то после их удаления можно получить высокое удельное поверхностное сопротивление при любой влажности воздуха. Если эти вещества являются составной частью материала, то удельное поверхностное сопротивление будет сильно снижаться при увеличении влажности.

1.2. Измерение сопротивления диэлектриков

Для определения величины сопротивления диэлектрика обычно используют стандартный способ *амперметра-вольтметра*. Подавая на образец диэлектрика известное по величине напряжение, измеряют ток, протекающий в цепи диэлектрика, с помощью высокочувствительных измерителей тока. Типичные значения величин тока лежат в пределах $10^{-9} – 10^{-16}$ А. Приборы, измеряющие такие токи, обычно называют *пикоамперметрами (фемтоамперметрами, аттоамперметрами)*. Сопротивление диэлектрика расчитывается по закону Ома как

$$R = U/I . \qquad (10)$$

Определение удельного объемного и удельного поверхностного

сопротивлений производится обычно на одном и том же образце, снабженном тремя электродами. Форма и расположение этих электродов для случая плоского образца диэлектрика показаны на рис. 3.

Верхний дисковый электрод А имеет диаметр d_1, внутренний диаметр кольцевого электрода $d_2=d_1+4$ мм. Таким образом, зазор между этими электродами составляет 4 мм. Нижний дисковый электрод С может иметь диаметр, примерно равный наружному диаметру кольцевого электрода или больше. При измерении объемного сопротивления образца следует пропускать ток сквозь толщу образца между верхним и нижним дисковыми электродами А и С, а при измерении поверхностного сопротивления - через поверхностный слой образца, расположенный в кольцевом зазоре между электродами А и В.

В принципе измерение этих сопротивлений образцов не представляет трудностей, однако на практике далеко не всегда является простым делом, так как вследствие большой величины удельных сопротивлений, особенно в случае высококачественных диэлектриков, в схеме протекают настолько слабые токи, что их измерение осуществляют особо точными приборами, как указано выше.

В настоящей работе измерение удельного сопротивления осуществляется с помощью цифрового аттоамперметра. Ток от источника напряжения пропускается сквозь толщу образца между нижним электродом и верхним дисковым электродом (так называемым измерительным электродом) и измеряется цифровым аттоамперметром.

Измеряемый ток является объемным током утечки, так как поверхностный ток утечки с электрода С не попадет на электрод А и “собирается” кольцевым электродом В, выполняющим роль охранного кольца, и далее отводится на землю, минуя измеритель тока (*пикоамперметр, фемтоамперметр, аттоамперметр*). Охранный электрод, имея практически тот же потенциал, что и измерительный электрод А, способствует устранению краевого эффекта у этого электрода и тем самым создает практически однородное электрическое поле в образце между электродами А и С. Зная величину приложенного к образцу на-

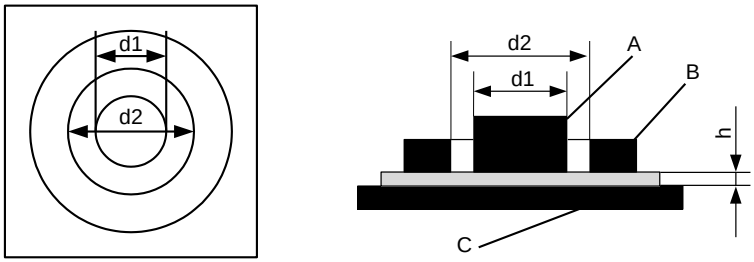


Рис. 3. Схема расположения электродов для измерения удельных сопротивлений плоского образца диэлектрика

пряжения U (в вольтах) и ток, протекающий через образец, можно определить объемное сопротивление образца R_v. Затем, используя формулу (5), можно рассчитать удельное объемное сопротивление диэлектрика.

При измерении поверхностного сопротивления электрод А опять является измерительным, т. е. остается соединенным с измерителем тока, в то время как другие электроды поменялись ролями. Кольцевой электрод В стал измерительным, а электрод С - охранным. При этом измеряется поверхностный ток в кольцевом зазоре между электродами А и В, а объемный ток утечки, который мог бы также проходить от электрода В к электроду А, отводится электродом С на землю и минует измеритель тока. Измерив напряжение U (в вольтах), приложенное к образцу, и поверхностный ток утечки, можно определить поверхностное сопротивление исследуемого диэлектрика.

Для круглых электродов связь между поверхностным сопротивлением образца R_s, удельным поверхностным сопротивлением диэлектрика ρ_S и размерами электродов d_1 и d_2 выражается следующим соотношением:

$$R_S = \rho_S \frac{d_2 - d_1}{\pi \cdot (d_2 - d_1)} \ , \qquad (11)$$

где ρ_S измеряется в омах, а d_1 и d_2 - в любых одинаковых единицах длины.

Измеряя R_s и зная диаметры d_1 и d_2, можно вычислить величину удельного поверхностного сопротивления испытуемого образца как

$$\rho_S = \frac{R_S \cdot \pi \cdot (d_2 + d_1)}{d_2 - d_1} . \qquad (12)$$

2. Выполнение лабораторной работы

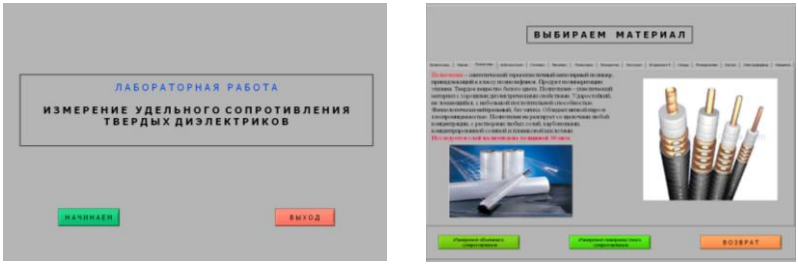
Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения удельного сопротивления диэлектрика специальной программой, выполняемой на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения удельного сопротивления ряда диэлектриков в зависимости от изменения температуры окружающей среды и влажности воздуха. Измерение производится стандартным методом амперметра-вольтметра. При измерении сопротивления диэлектрика используется трехэлектродный метод, описанный ранее. Измеряются объемное сопротивление и поверхностное сопротивление, а затем по известным параметрам исследуемого материала и измерительных электродов рассчитываются удельное объемное и поверхностное сопротивления.

При подготовке к работе необходимо изучить методические ука-

зания к лабораторной работе и затем получить у преподавателя задание. Для начала работы необходимо запустить файл «Сопротив_диэл» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.4,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и некоторые интуитивно понятные элементы управления. Лабораторная работа состоит из двух частей. В **первой части** работы исследуются *удельное объемное сопротивление твердых диэлектриков* и его зависимость от температуры, а **во второй части** исследуется *удельное поверхностное сопротивление* в зависимости от температуры и влажности воздуха. Выбор конкретного вида измерения (объемное или поверхностное сопротивление) выбирается в окне выбора материала (рис.4,б) щелчком левой кнопки мыши по соответствующей кнопке.

2.1. Измерение объемного сопротивления диэлектрика

После щелчка по кнопке «Измерение объемного сопротивления» открывается окно измерения объемного сопротивления диэлектрика, показанное на рис. 5. В этом окне отображаются измерительные приборы и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображается схема подключения измерительных электродов.



а б

Рис. 4. Внешний вид первого окна лабораторной работы (а) и окна выбора материала диэлектрика (б)

Необходимо включить приборы щелчком по тумблерам «Сеть». По умолчанию в виртуальной измерительной камере установлены температура 20 ^{0}С и влажность 5 %. Если включены не все приборы и не установлено какое-либо напряжение, то отображается мигающая надпись «Включите приборы и установите напряжение».

Измерение сопротивления диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимое напряжение источника питания, используя кнопки «Инкремент-декремент» рядом с цифровыми индикаторами на панели источника питания. Стрелочный прибор источника дублирует эти показания.



Рис. 5. Окно измерения объемного сопротивления диэлектрика

2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окне «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере. Считается, что объемное сопротивление диэлектрика от влажности воздуха не зависит.

3. Установить масштаб измерения тока прибором «Аттоамперметр», используя кнопки, расположенные под цифровым индикатором величины тока. Рекомендуется начинать с масштаба «нА» (10^{-9}А).

4. Щелкнуть по кнопке «Измерить ток». Через некоторое время на индикаторе отобразится величина тока через диэлектрик. Если моргает индикатор «Перегрузка», изменить масштаб аттоамперметра. Записать значение тока.

5. После проведения необходимого цикла измерений при данной температуре в измерительной камере изменить значение температуры в соответствии с п. 2 этого раздела.

6. Закончив полный цикл измерений объемного сопротивления диэлектрика, щелкнуть по кнопке «Закончить» и выбрать новый материал или режим измерения.

2.2. Измерение поверхностного сопротивления диэлектрика

После выбора режима измерения поверхностного сопротивления щелкнуть по кнопке «Изменить влажность», а в окно «Задатчик влаж-

ности» ввести с клавиатуры нужное значение влажности в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной влажности в измерительной камере и перейти к измерениям тока.

При необходимости изменять температуру в измерительной камере действовать, как указано в п. 2 раздела 2.1.

ВНИМАНИЕ! Процесс измерения поверхностного сопротивления диэлектрика ничем не отличается от измерения объемного сопротивления, но схема подключения измерительных электродов уже другая.

3. Последовательность выполнения работы

1. Исследовать зависимость объемного сопротивления диэлектрика от температуры в диапазоне температур, указанных преподавателем. Для каждого значения температуры в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Процесс измерения тока занимает определенное время, т.к. при больших сопротивления диэлектрика необходимо несколько секунд для установления стационарного состояния при перезарядке паразитных емкостей измерительных электродов. Данные занести в таблицу по приведенному ниже примеру. При расчете объемного сопротивления R_V использовать формулу (10), а при расчете удельного объемного сопротивления использовать формулу (5). Диаметр верхнего электрода 5 см.

Диэлектрик – полипропилен							
Напряжение на диэлектрике 200 В							
t, ^{0}C	T, K	10^4/T	$I_{СРЕД}$	Един. тока	R_V, Ом	ρ_V, Ом*м	$\log(\rho_V)$

Построить зависимость $\log(\rho_V) = F(10^4/T)$. Аппроксимировать эту зависимость прямой и найти тангенс угла наклона как

$$tg\alpha = \frac{\Delta \log(\rho_V)}{\Delta\left(\frac{10^4}{T}\right)} \quad . \tag{13}$$

Рассчитать энергию активации примеси как

$$W = 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot tg\alpha, \ \text{эВ}. \tag{14}$$

2. Исследовать зависимость поверхностного сопротивления диэлектрика от температуры в диапазоне температур и постоянной влажности, указанных преподавателем. Для каждого значения температуры в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Данные занести

в таблицу по приведенному ниже примеру. При расчете поверхностного сопротивления R_S использовать формулу (10), а при расчете удельного поверхностного сопротивления использовать формулу (12). Диаметр верхнего электрода 5 см, а внутренний диаметр кольцевого электрода 5.4 см.

Диэлектрик - полипропилен							
Напряжение на диэлектрике 200 В							
t, ^{0}C	T, K	10^4/T	$I_{СРЕД}$	Един. тока	R_S, Ом	ρ_S, Ом	log(ρ_S)

Построить зависимость $\log(\rho_S) = F(1/T)$. Аппроксимировать эту зависимость прямой и найти тангенс угла наклона как

$$tg\alpha = \frac{\Delta \log(\rho_S)}{\Delta\left(\frac{10^4}{T}\right)} \quad .$$

Рассчитать энергию активации примеси как

$$W = 8.625 \cdot 10^{-5} \cdot tg\alpha, \quad \text{эВ}.$$

3. Исследовать зависимость поверхностного сопротивления диэлектрика от влажности w при постоянной температуре, указанной преподавателем . Для каждого значения влажности в измерительной камере проводить не менее 5 – 7 измерений значений тока через диэлектрик и определять среднее значение. Данные занести в таблицу, по приведенному ниже примеру.

Диэлектрик - полипропилен				
Температура 20 ^{0}C				
Напряжение на диэлектрике 200 В				
w, %	$I_{СРЕД}$	Един. тока	R_S, Ом	ρ_S, Ом

Построить график $\rho_S = F(w)$.

4. Содержание отчета

4.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

4.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;

- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами;
- ссылку по ГОСТу на изученную справочную литературу.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое электропроводность вещества?
2. Назовите основные виды электропроводности диэлектриков.
3. Чем обусловлена электропроводность в газовых диэлектриках?
4. Нарисуйте и объясните график зависимости тока в газах от напряжения между электродами.
5. Что такое *ионизация* и *рекомбинация*?
6. Чем обусловлена электропроводность жидких диэлектриков?
7. Что такое объемное и поверхностное сопротивления твердых диэлектриков и в каких единицах они измеряются?
8. Что такое сопротивление изоляции твердых диэлектриков?
9. Что такое *энергия активации*?
10. Объясните характер температурной зависимости удельной проводимости диэлектриков.
11. Что такое *примесная* и *собственная* электропроводность твердых диэлектриков?
12. Чем обусловлено поверхностное сопротивление диэлектриков?
13. Как и почему влажность воздуха влияет на поверхностное сопротивление твердых диэлектриков?
14. Какие системы электродов и почему используют для измерения объемного и поверхностного сопротивления твердых диэлектриков?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь твердых диэлектриков резонансным методом, исследование температурной и частотной зависимости этих параметров.

1. Основные теоретические сведения

1.1. Поляризация диэлектриков

Одним из важных понятий при изучении поляризации диэлектриков является *электрический дипольный момент* (в дальнейшем просто

дипольный момент). Электрический дипольный момент определяется как совокупность двух равных по абсолютной величине разноимённых точечных электрических зарядов (это и есть диполь), находящихся на некотором расстоянии друг от друга. Основной характеристикой электрического диполя является его дипольный момент - вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному (рис. 1) и численно равный произведению заряда q на расстояние l между зарядами: $p = ql$. Дипольный момент определяет электрическое поле диполя на большом расстоянии R от него ($R>>l$), а также воздействие на диполь внешнего электрического поля.

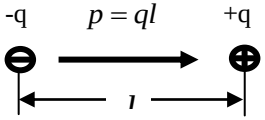


Рис. 1. Электрический диполь: заряды - q и +q на расстоянии $\boldsymbol{l}$ друг от друга. Дипольный момент $\boldsymbol{p = ql}$ полностью определяет электрическое поле диполя на расстояниях $\mathbf{R>>}\boldsymbol{l}$.

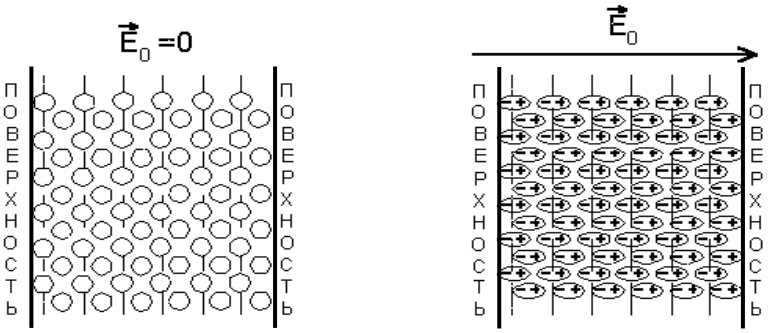
Действие внешнего электрического поля на диполь также пропорционально величине его дипольного момента. Однородное поле создаёт вращающий момент, стремящийся повернуть диполь так, чтобы его дипольный момент был направлен по полю. В неоднородном электрическом поле на диполь, кроме вращающего момента, действует также сила, стремящаяся втянуть его в область более сильного поля. Следует понимать, что если положительный и отрицательный заряды совпадают друг с другом (т.е. l=0), то электрическое поле будет отсутствовать.

Диэлектрики - это вещества, которые практически не проводят электрический ток. Поведение диэлектриков в электрическом поле определяется их внутренним строением. Как известно, мельчайшей частицей вещества, сохраняющей его химические свойства, является молекула. Молекулы состоят из атомов, в состав которых входят положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны. В целом молекулы электронейтральны. Согласно теории ковалентных связей устойчивость молекул достигается путем образования одной или нескольких пар электронов, которые становятся общими для соединяющихся атомов, т. е. одновременно входят в состав оболочек двух атомов.

Для каждого вида зарядов - положительных (ядер) и отрицательных (электронов) - можно найти такую точку, которая будет являться как бы их "*электрическим центром тяжести*". Эти точки называются *полюсами молекулы*. Если в молекуле электрические центры тяжести

положительных и отрицательных зарядов совпадут, то дипольный момент такой молекулы равен нулю, а следовательно, и электрическое поле, создаваемое этой молекулой, будет отсутствовать. Такую молекулу называют неполярной. Но если молекула построена несимметрично, например состоит из двух разнородных атомов, то общая пара электронов может быть в большей или меньшей степени смещена в сторону одного из атомов. Очевидно, что в этом случае, вследствие неравномерного распределения положительных и отрицательных зарядов внутри молекулы, их электрические центры тяжести не совпадут. Это приведет к возникновению дипольного момента молекулы и появлению электрического поля вокруг нее. Такие молекулы принято называть полярными.

Для описания макроскопических электрических свойств диэлектриков достаточно ограничиться представлением о том, что в них отсутствуют свободные носители заряда и при помещении диэлектрика в электрическое поле в материале возбуждается множество микроскопических диполей. В случае неполярных молекул это происходит путем смещения в пределах молекул их положительных зарядов в направле-



а б

Рис. 2. Поляризация однородного диэлектрика с неполярными молекулами: (а – внешнее электрическое поле отсутствует; б – при воздействии внешнего электрического поля)

нии внешнего поля и отрицательных в противоположном направлении (рис. 2).

Приобретаемый молекулой дипольный момент пропорционален напряженности поля, в котором находится молекула. В системе СИ он записывается как:

$$p=\beta\varepsilon_0 E\,, \qquad (1)$$

где β - коэффициент пропорциональности, который называется *поляризуемостью молекулы*, а ε_0 – системная константа, называемая *абсо-*

лютной диэлектрической проницаемостью вакуума (ε_0=8,8510^{-12} Ф/м).

Для вещества, состоящего из полярных молекул, под действием момента сил происходит преимущественное выстраивание молекул в направлении внешнего поля (рис. 3).

В обоих случаях (неполярных и полярных молекул) в результате появляется дипольный момент и у всего объема диэлектрика. Средний дипольный момент, индуцированный полем в единице объема, называется поляризованностью диэлектрика:

$$P = \frac{1}{\Delta V} \cdot \sum_{\Delta V} p \quad , \qquad (2)$$



Рис. 3. Ориентация полярной молекулы в электрическом поле

где суммирование производится по всем молекулам, находящимся в объеме ΔV, а дипольный момент p каждой молекулы определяется суммированием по всем заряженным частицам, входящим в молекулу:

$$p = \sum_i e_i l_i \quad , \qquad (3)$$

где e_i - заряд каждой частицы, а l_i - ее смещение под действием электрического поля.

Домножив и разделив правую часть выражения (3) на число молекул ΔN, находящихся в объеме ΔV , получим еще одно выражение для поляризованности:

$$p = n < p > \quad , \qquad (4)$$

где $n = \Delta N/\Delta V$ – концентрация молекул, а $< p >$ - средний дипольный момент молекулы.

Вообще говоря, P меняется в диэлектрике от точки к точке, но для широкого класса веществ в каждой точке $P \sim E$. Существуют вещества, обладающие поляризованностью и в отсутствие внешнего поля. Поскольку в целом молекулы нейтральны, то именно дипольный момент и определяет электрическое поле, создаваемое самим материалом, когда его помещают во внешнее поле. В соответствии с принципом суперпозиции поле внутри диэлектрика есть сумма внешнего поля и поля от всех диполей, индуцированных в диэлектрике:

$$E = E_0 + E' \quad , \qquad (5)$$

где E_0 - напряженность внешнего электрического поля, а E' – напряженность внутреннего электрического поля, созданного связанными

зарядами вещества диэлектрика. Связанными зарядами называются нескомпенсированные заряды, появляющиеся в результате поляризации молекул диэлектрика, тогда как сторонними - свободные заряды, находящиеся в диэлектрике или вне его. E_0 и E' представляют собой макрополя, т.е. усредненные по некоторому малому объему микрополя, создаваемые сторонними и связанными зарядами соответственно.

Так как каждая молекула поляризуется под воздействием как поля сторонних зарядов, так и поля, создаваемого всеми другими поляризованными молекулами, то поляризованность диэлектрика пропорциональна напряженности именно суммарного поля:

$$P = \kappa\varepsilon_0 E \ , \qquad (6)$$

где к – диэлектрическая восприимчивость вещества.

При поляризации неоднородного диэлектрика (см. рис. 3) смещения зарядов внутри любого выбранного слоя внутри диэлектрика происходят таким образом, что количество связанного заряда, покидающего слой, равно заряду, входящему в него. Таким образом, объемный заряд внутри диэлектрика не образуется. В поверхностных же слоях образуется связанный поверхностный заряд . В случае же неоднородного диэлектрика в каждый слой, мысленно выделенный внутри материала, с одной стороны входит больше заряда, чем выходит с другой, и связанный заряд образуется не только на поверхности, но и в объеме диэлектрика, как это показано на рис. 4.

С учетом вышеперечисленных явлений можно дать определение поляризации и поляризованности диэлектрика.

Поляризация диэлектриков — это явление, связанное со смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом дипольных (полярных) молекул под воздействием внешнего электрического поля. Поляризацию диэлектриков характеризует вектор электрической поляризации. Физический смысл *поляризованности* - это суммарный дипольный момент, который приобретают полярные молекулы, приходящийся на единицу объема диэлектрика. В этом случае в диэлектрике появляется дополнительный заряд $Q_д$, вызванный явлением *поляризации*, т.е. смещением связанных зарядов в диэлектрике.

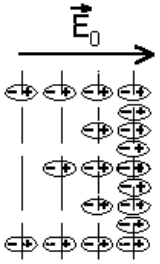


Рис. 4. Поляризация неоднородного диэлектрика

Наиболее наглядно явление поляризации проявляется в электрическом конденсаторе. Если на поверхность листового диэлектрического материала с однородными (изотропными) свойствами нанести металлические электроды и подать на них постоянное напряжение, то образо-

вавшийся конденсатор будет накапливать электрический заряд величиной Q = CU, где C – емкость конденсатора, U – приложенное напряжение. В свою очередь заряд Q в диэлектрике может быть представлен как $Q = Q_0 + Q_Д$, т.е. суммой заряда Q_0, когда вместо диэлектрика в конденсаторе вакуум, и $Q_Д$ – заряда обусловленного поляризацией диэлектрика. Отношение зарядов Q и Q_0 называется относительной диэлектрической проницаемостью (в дальнейшем просто диэлектрической проницаемостью) материала, т.е.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = 1 + \frac{Q_Д}{Q_0} \cdot \qquad (7)$$

Таим образом, *диэлектрическая проницаемость* ε – это скалярная безразмерная величина (всегда больше единицы), которую можно представить как отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости такого же конденсатора, между электродами которого вакуум.

1.2. Виды поляризации

В зависимости от механизма поляризации, поляризацию диэлектриков можно подразделить на следующие виды.

Электронная поляризация — упругое смещение электронных оболочек атомов под действием внешнего электрического поля. Это самая быстрая поляризация, время установления которой до 10^{-15} с. Не связана с потерями энергии.

Ионная поляризация — смещение узлов кристаллической структуры под действием внешнего электрического поля, причем смещение узлов решетки происходит на величину, меньшую, чем величина постоянной решетки. Время протекания 10^{-13} с и происходит без потерь энергии.

Дипольная (ориентационная) поляризация — протекает с потерями на преодоление сил связи и внутреннего трения. Связана с ориентацией диполей во внешнем электрическом поле.

Электронно-релаксационная поляризация — ориентация дефектных (слабо связанных) электронов во внешнем электрическом поле.

Ионно-релаксационная поляризация — смещение ионов слабо закрепленных в узлах кристаллической структуры, либо находящихся в междоузлиях.

Структурная поляризация — ориентация примесей и неоднородных макроскопических включений в диэлектрике. Самый медленный тип.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация — благодаря наличию этого типа поляризации в диэлектрике проявляется нелинейность свойств, то есть явление гистерезиса. Отличается очень высокими значениями диэлектрической проницаемости (от 900 до 7500 у некоторых

видов конденсаторной керамики).

Резонансная поляризация — ориентация частиц, собственные частоты которых совпадают с частотами внешнего электрического поля.

Миграционная поляризация - обусловлена наличием в материале слоев с различной проводимостью, образованием объемных зарядов, особенно при высоких градиентах напряжения, имеет большие потери и является поляризацией замедленного действия.

1.3. Частотная и температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Поляризация диэлектриков имеет максимальное значение в статических электрических полях. В переменных полях, в связи с наличием инерции электронов, ионов и электрических диполей, вектор электрической поляризации зависит от частоты. В связи с этим вводится понятие дисперсии диэлектрической проницаемости. Так как время установления, например, электронной поляризации весьма мало - 10^{-15} с, то даже при наиболее высоких частотах, применяемых в современной электротехнике и радиоэлектронике, поляризация неполярных диэлектриков успевает полностью установиться за время, которое пренебрежимо мало по сравнению с полупериодом переменного напряжения. Поэтому *у неполярных диэлектриков ε от частоты не зависит* (рис. 5).

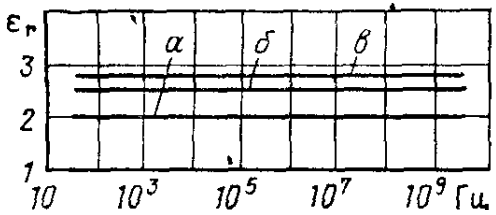


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости ε от частоты для твердых неполярных диэлектриков: а – фторопласт-4; б – полистирол; в - полидихлорстирол

У полярных диэлектриков при повышении частоты диэлектрическая проницаемость сначала также остается неизменной, но начиная с некоторой критической частоты, когда поляризация уже не успевает полностью установиться за один полупериод, величина ε снижается (рис. 6).

У неполярных диэлектриков ε слабо зависит от температуры, уменьшаясь при повышении температуры вследствие теплового расширения вещества, т. е. уменьшения количества поляризующихся молекул в единице объема вещества. Пример — рис. 7 (резкое изменение

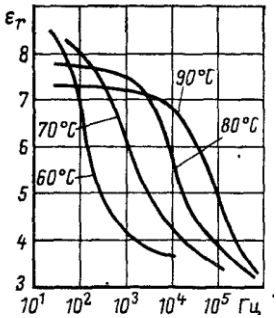


Рис. 6. Зависимость ε полярного диэлектрика (поливинилацетата) от частоты и температуры

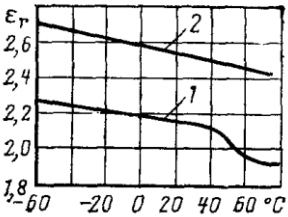


Рис. 7. Зависимость ε от температуры для неполярных диэлектриков; 1 – парафин; 2 – полистирол

ε на графике для парафина соответствует температуре плавления этого кристаллического материала, связанного со скачкообразным изменением плотности вещества).

У диэлектриков ионного строения ε при росте температуры обычно возрастает. Однако у некоторых ионных кристаллов ε при росте температуры уменьшается. У полярных диэлектриков в области низких температур, когда вещество обладает большой вязкостью или даже находится в кристаллическом состоянии, ориентация дипольных молекул невозможна или, во всяком случае, затруднена. При повышении температуры возможность ориентации диполей облегчается, вследствие чего ε существенно возрастает. Однако при еще более высоких температурах вследствие усиления хаотических тепловых колебаний молекул степень упорядоченности ориентации молекул снижается, поэтому ε, пройдя через максимум, уменьшается (рис. 8).

В полярных диэлектриках с различными видами поляризации при увеличении частоты происходит скачкообразное уменьшение величины диэлектрической проницаемости по мере того, как постепенно «отключаются» медленные виды поляризации. На температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости таких диэлектриков могут появляться несколько максимумов.

1.4. Потери в диэлектриках

Диэлектрическими потерями называют энергию, вызывающую нагрев диэлектрика, которая рассеивается в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля.

Потери энергии в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в любом материале протекает сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество

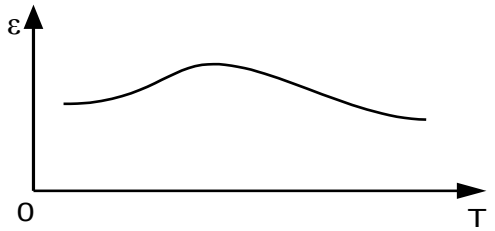


Рис. 8. Типовая зависимость ε от температуры для большинства полярных диэлектриков

материала характеризуется значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозной электропроводимости, возникает ряд добавочных причин, вызывающих потери энергии в диэлектрике. Для характеристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле пользуются понятием угла диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол δ, дополняющий до 90 градусов угол сдвига фаз φ между током I и напряжением U в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика I в такой цепи будет опережать вектор U на 90^0, при этом угол δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и соответственно tgδ (рис. 9).

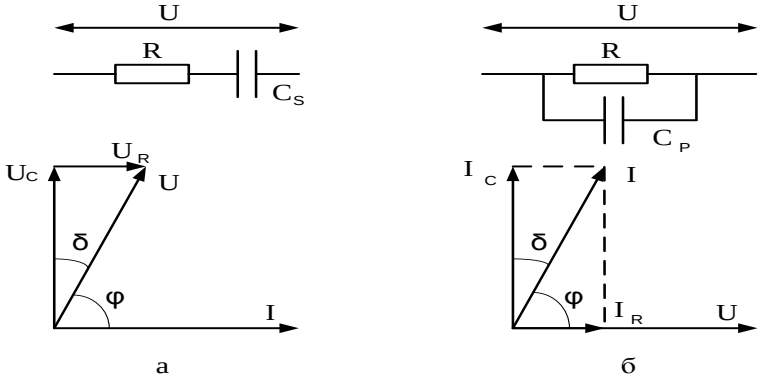


Рис. 9. Эквивалентные схемы и векторные диаграммы диэлектрика с потерями: а – последовательная схема, б – параллельная схема

Диэлектрические потери могут обусловливаться сквозным током

или активными составляющими поляризационных токов. При изучении диэлектрических потерь, непосредственно связанных с поляризацией диэлектрика, можно изобразить это явление в виде кривых, представляющих зависимость электрического заряда на обкладках конденсатора с данным диэлектриком от приложенного к конденсатору напряжения. При отсутствии потерь, вызываемых явлением поляризации, заряд линейно зависит от напряжения, и такой диэлектрик называется линейным.

Если в диэлектрике имеет место замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая зависимости заряда от напряжения приобретает нелинейную зависимость. В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь на сквозную электропроводность и потерь от замедленных видов поляризации, возникают электрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, окислов железа и т.д. и значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале. В случае высоких напряжений потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектриков, особенно интенсивно происходящей при высоких частотах. При изучении поведения диэлектрика с потерями при переменном напряжении часто оказывается целесообразным заменить рассматриваемый диэлектрик емкостью без потерь (учитывает явление поляризации) и активным сопротивлением (учитывает электропроводность), соединенными между собой параллельно или последовательно.

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями и находящимся в цепи переменного напряжения. Последовательная и параллельная схема представлены на рис. 8, там же даны соответствующие диаграммы токов и напряжений. Обе схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $z_1 = z_2 = z$ равны их активные и реактивные составляющие. Это условие будет соблюдено, если углы сдвига тока I относительно напряжения U равны и значения активной мощности одинаковы.

Из теории переменных токов известно, что:

$$P_a = U \cdot I \cdot \cos\varphi \ . \qquad (8)$$

Выразим P для последовательной и параллельной схемы через C_s и C_p и угол δ , который является дополнением угла φ до 90 градусов. Для последовательной схемы (рис. 9, а), используя выражения для P_a и соответствующую диаграмму, имеем:

$$P_a = \frac{U}{z} \cdot \frac{U_r}{z} = \frac{U_r^2}{x^2 + r^2} = \frac{U_r^2}{x^2 \cdot (1 + \frac{r^2}{x^2})} = \frac{U^2 \cdot \omega C_s \cdot tg\delta}{1 + tg\delta} \qquad (9)$$

и $tg\,\delta = \omega C_s R_s$.

Для параллельной схемы (рис. 9,б):

$$P_a = U^2 \cdot \omega C_P \cdot tg\delta \quad \text{и} \quad tg\delta = \frac{1}{\omega C_P R_S} \cdot \qquad (10)$$

Из формул (9) и (10) можно видеть, что диэлектрические потери приобретают серьезное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку величина диэлектрических потерь пропорциональна квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте поля. Материалы, предназначаемые для применения в указанных условиях, должны отличаться малым значением угла потерь и диэлектрической проницаемостью, т.к. в противном случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике, может стать недопустимо большой.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;

2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью диэлектрика;

3) ионизационные диэлектрические потери;

4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Рассмотрим каждый вид диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационными видами поляризации, в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери вызываются нарушением теплового движения частиц под влиянием сил электрического поля. Это нарушение приводит к рассеянию энергии и нагреву диэлектрика. В температурной зависимости tgδ релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества (рис. 10). При этой температуре время релаксации частиц диэлектрика примерно совпадает с периодом изменения приложенного переменного напряжения. Если температура такова, что время релаксации частиц значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения, то тепловое движение частиц будет менее интенсивным. Потери уменьшатся, если температура такова, что время релаксации частиц значительно меньше полу-

периода изменения напряжения, а интенсивность теплового движения будет больше, связь между частицами уменьшится, в результате чего потери также снизятся.

Классификация потерь в диэлектриках

Диэлектрические потери	**Главные особенности**	**Виды диэлектриков**
1.Обусловленные поляризацией		
релаксационные (дипольные и ионные)	Наличие максимума tgδ угла потерь, зависящяго от температуры и частоты	Дипольные жидкие и твердые диэлектрики, ионные с неплотной упаковкой
резонансные	Наличие резко выраженного максимума при некоторой частоте (выше 10^{15} Гц), положение которого не зависит от температуры	Все виды диэлектриков
2. Обусловленные электропроводностью	Независимость потерь от частоты (tgδ угла потерь с частотой снижается по гиперболе) и заметное возрастание с ростом температуры	Жидкие и твердые диэлектрики. Жидкие и твердые диэлектрики с большой электропроводностью
3. Ионизационные	Наблюдаются при напряжениях выше напряжения ионизации газов и газовых включений внутри диэлектрика	Газообразные и твердые диэлектрики с газообразными включениями
4. Обусловленные неоднородностью структуры	Сложная зависимость потерь от компонентов, входящих в состав диэлектрика и случайных примесей	Неоднородные диэлектрики

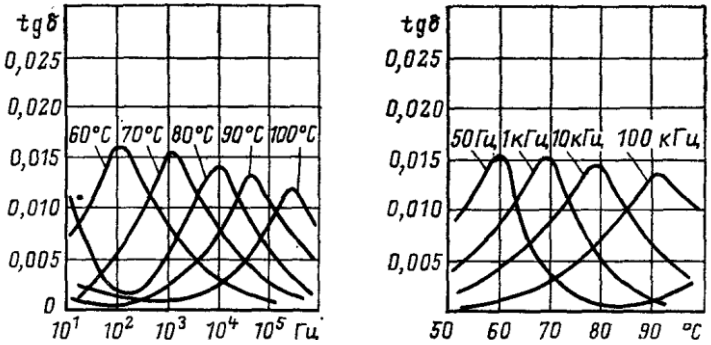


Рис. 10. Зависимость tgδ от частоты и температуры для полярного диэлектрика (поливинилацетат)

Резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при световых частотах. Этот вид потерь с особой четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенной частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля. Также эти потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости tgδ характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура на положение максимума потерь не влияет.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью. Диэлектрические потери, обусловленные сквозной проводимостью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную. Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты электрического поля, а tgδ уменьшается с частотой по гиперболическому закону. Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с ростом температуры по экспоненциальному закону.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значения, соответствующие началу ионизации данного газа.

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры. Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в производных слюды - миканитах, микалексе и т.д. В таблице приведена классификация потерь в диэлектриках.

1.5. Методика измерения

В лабораторной работе измерение ε и tgδ твердых диэлектриков производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора измерителя добротности или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности Q и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная схема Q-метра показана на рис. 11.

В приборе используется явление резонанса в высокодобротном последовательном колебательном контуре. Этот контур сформирован образцовой высокодобротной катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором C1. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G, частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G, изменяя емкость конденсатора C1, контур настраиваем в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре V2. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров V2 и V1, т.е. Q = V2/V1. Если поддерживать напряжение генератора сигнала G на известном уровне (например, 0,1 В), то шкалу вольтметра V2 можно проградуировать прямо в значениях добротности Q.

Если в контур вносится дополнительная емкость Cx, например в виде емкости, полученной при подключении исследуемого твердого диэлектрика, то изменяются резонансная частота контура и его добротность. Резонансная частота изменяется за счет увеличения суммарной емкости контура C = C1 + Cx, а добротность контура снижается за

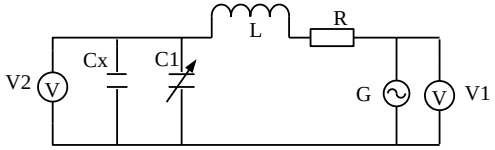


Рис. 11. Упрощенная схема измерителя добротности (Q-метра)

счет потерь различного типа, возникающих в диэлектрике. Настраивая контур вновь в резонанс на этой же частоте f_0, по разности показаний конденсатора C1 можно определить величину емкости Cx, т.е. это и есть емкость исследуемого диэлектрика. Зная геометрические размеры подключенного диэлектрика можно определить величину ε диэлектрика, используя формулу емкости плоского конденсатора.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 S}{d} \ , \qquad (11)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора, ε_0 - *абсолютная диэлектрическая проницаемость* вакуума (ε_0=8,8510^{-12} Ф/м), S – площадь обкладок конденсатора, d – расстояние между обкладками конденсатора.

Определяя значение емкости Cx подключенного диэлектрика и учитывая размеры электродов (в работе используется круглый электрод диаметром 3 см), можно рассчитать ε диэлектрика как:

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot S} \quad . \tag{12}$$

Уменьшение добротности контура позволит оценить величину потерь, вносимых диэлектриком в колебательный контур, а следовательно, и tgδ. При этом tgδ можно рассчитать по формуле

$$tg\delta = \frac{(Q_1 - Q_2) \cdot C_1}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)} \quad , \tag{13}$$

где Q_1 и C_1 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при неподключенном диэлектрике, Q_2 и C_2 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при подключенном диэлектрике.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков с использованием прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого применяется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда диэлектриков в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. Принцип измерения ε и tgδ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

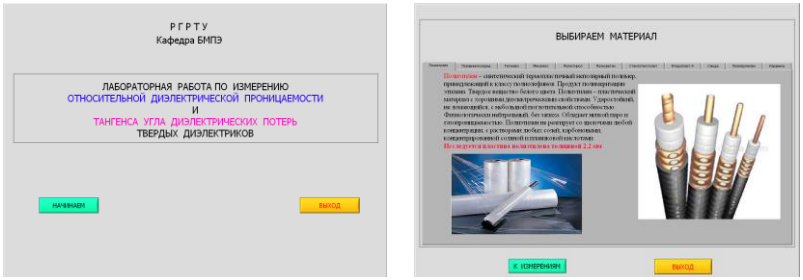
Для начала работы необходимо запустить файл «Танг_диэл» на Рабочем столе ПК. после чего появится окно, изображенное на рис.12,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора материалов, как показано на рис. 12,б.

Выбор материала осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием материала. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного материала диэлектрика.

2.1. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения параметров выбранного диэлектрика, показанное на рис. 13. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом диэлектрика. Здесь же отображаются схема подключения исследуемого образца диэлектрика и используемые при этом электроды.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 0 ^{0}C.

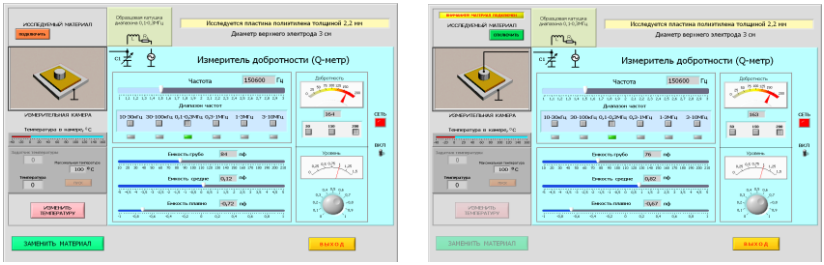


а б

Рис. 12. Внешний вид окна начала работы (а) и выбора материала диэлектрика для исследования (б)

Измерение ε и tgδ диэлектрика необходимо производить в следующей последовательности.

Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.



а б

Рис. 13. Внешний вид окна для проведения измерений без подключенного к Q-метру исследуемого образца диэлектрика (а) и с подключенным образцом диэлектрика (б)

1. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на 1.
2. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задатчик

температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.

3. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1. Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.

4. Подключить образец диэлектрика щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2, измеренным при подключенном в контур диэлектрике.

5. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с пп. 1-3 и продолжить в соответствии с пп. 4,5.

6. При необходимости выбрать другой диэлектрик, используя кнопку «Заменить материал».

3. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретного диэлектрика в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1, C_1 и Q_2, C_2 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже.

Диэлектрик 1								
Темпер.	Частота	Q_1	C_1	Q_2	C_2	Cx	ε	tgδ

3. Рассчитать значения ε и tgδ для исследуемых диэлектриков по формулам (12) и (13) и построить графики зависимости этих параметров от частоты и температуры в соответствии с заданием.

4. Содержание отчета

4.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

4.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

5. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое дипольный момент и на что он влияет в диэлектрике?
2. Чем отличается полярная молекула от неполярной?
3. Что такое поляризация диэлектрика и на что влияет это явление?
4. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости.
5. Перечислите основные виды поляризации.
6. Чем отличаются электронная поляризация от электронно-релаксационной, ионная от ионно-релаксационной?
7. Какие виды поляризации присущи полярным и неполярным диэлектрикам?
8. Нарисуйте график зависимости ε от частоты для полярных и неполярных диэлектриков.
9. Нарисуйте график зависимости ε от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.
10. Что такое потери в диэлектриках?
11. Что такое tgδ для последовательной схемы замещения диэлектрика?
12. Что такое tgδ для параллельной схемы замещения диэлектрика?
13. Нарисуйте график зависимости tgδ от частоты для полярных и неполярных диэлектриков.
14. Нарисуйте график зависимости tgδ от температуры для полярных и неполярных диэлектриков.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Цель работы*:* измерение с помощью прибора Q-метра емкости и добротности конденсатора при различных частотах и температурах, расчет эквивалентной схемы конденсатора.

1. Теоретические сведения

1.1. Общие сведения о конденсаторах

Конденсаторы, как и резисторы, представляют широкий класс компонентов современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В настоящее время имеется достаточно широкая номенклатура этих элементов, использующих последние достижения науки и техники. Продолжается разработка новых типов конденсаторов с более высокими электрическими, технологическими и эксплуатационными параметрами. Конденсатор – компонент РЭА, предназначенный для накопления электрической энергии и возвращения ее в электрическую цепь. Состоит из электродов (обкладок), разделенных диэлектриком.

Конденсатор характеризуется номинальной емкостью, допустимым отклонением емкости от номинального значения, номинальным рабочим напряжением, сопротивлением изоляции, добротностью и другими параметрами.

Номинальная емкость конденсатора – емкость, которую должен иметь конденсатор в соответствии с ГОСТом. Номинальное значение емкостей, в соответствии с рекомендациями МЭК (Международная электротехническая комиссия), стандартизовано и выбирается из определенных рядов чисел Е3; Е6; Е12; Е24; Е48; Е96; Е192 (цифра указывает количество номинальных значений в каждой декаде). Так, например, для ряда Е6 номинальные значения в пределах декады составляют величины 1.0; 1.5, 2.2; 3.3; 4.7; 6.8. Полное указание номинальной емкости состоит из цифры и обозначения единицы измерений: Ф – фарада; мкФ – микрофарада (10^{-6} Ф); нФ – нанофарада (10^{-9} Ф); пФ – пикофарада (10^{-12} Ф). Фактическое значение емкости может отличаться от номинального в пределах поля допуска, которое исчисляется в процентах от номинального значения и также подчиняется ряду. Имеются буквенная международная кодировка допусков и соответствующие отечественные обозначения. Стоит отметить, что большинство зарубежных компаний – производителей конденсаторов имеют свои условные обозначения типов и параметров конденсаторов. Таблица допусков и их условное обозначение представлены в приложении.

Емкость большинства конденсаторов зависит от температуры. Для ее учета вводят *температурный коэффициент емкости* (ТКЕ), показывающий относительное изменение емкости при изменении температуры на один градус. Для обозначения используется буквенно-цифровая или цветовая (в виде цветных полос или цвета корпуса конденсатора) кодировка. По разновидности ТКЕ конденсаторы разделяют на конденсаторы с ненормируемым ТКЕ, с линейной зависимостью ТКЕ и нелинейной зависимостью ТКЕ.

Для конденсаторов с ненормируемым ТКЕ и нелинейной зависи-

мостью ТКЕ указывается разброс номинальной емкости в диапазоне рабочих температур. Для конденсаторов с линейной зависимость емкости от температуры указывается температурный коэффициент 10^{-6}/°С (ppm/^{0} С) в рабочем диапазоне температур (обычно -60 +85 ^{0}С). Таблица условных обозначений ТКЕ представлена в приложении.

Номинальное рабочее напряжение – максимальное напряжение, при котором конденсатор может надежно работать в течение гарантированного срока с сохранением своих параметров. Номинальное напряжение меньше испытательного в 1,5...3 раза и значительно ниже пробивного. При испытательном напряжении конденсатор может работать лишь кратковременно. Номинальные напряжения также подчиняются стандартному ряду.

Сопротивление изоляции – сопротивление конденсатора постоянному току.$R_{из}=U/I_{ут}$, где U – напряжение; $I_{ут}$ – сквозной ток (ток утечки). Сквозной ток проводимости имеет электронную или ионную природу. Сопротивление изоляции конденсаторов всех видов, кроме электролитических, велико и выражается в мегаомах, гигаомах, тераомах (10^6, 10^9, 10^{12}).

Постоянная времени конденсатора $\tau=R_{из}*C$ характеризует конденсатор при использовании его в цепи постоянного тока. Постоянная времени обычно используется для характеристики пленочных конденсаторов.

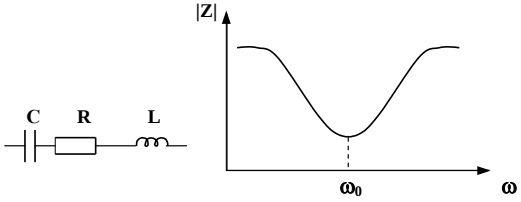
Потери энергии в конденсаторе на заданной частоте определяет *тангенс угла потерь* ***tgδ***. Потери определяются типом диэлектрика, его качеством, температурой окружающей среды, частотой переменного тока. Изменение *tgδ* происходит в широких пределах от $(10\text{-}15)\cdot10^{-4}$ для фторопластовых, слюдяных, высокочастотных керамических, полистирольных конденсаторов и до $(500\text{-}3500)\cdot10^{-4}$ для оксидных.

Добротность конденсатора $Q=\frac{1}{tg\delta}$, где $tg\delta=tg\delta_{\varepsilon}+tg\delta_{M}$. Суммарные потери определяются потерями в диэлектрике и металлических обкладках. На высоких частотах потери за счет поверхностного эффекта растут и добротность конденсатора снижается. Добротность меняется также из-за частотной и температурной зависимости потерь в диэлектрике.

Конденсатор, включенный в цепь переменного тока, обладает полным сопротивлением (импедансом), включающим кроме емкости омическое сопротивление и индуктивность. На высоких частотах они оказывают большое влияние на амплитуду и форму напряжений и токов цепи, в которую включен конденсатор. Упрощенная эквивалентная схема и амплитудно-частотная характеристика модуля полного сопротивления конденсатора представлены на рис. 1.

На частоте f конденсатор имеет сопротивление (импеданс)

$$Z = \sqrt{r^2 + [\frac{1}{2\pi fC} - 2\pi fL]^2}. \qquad (1)$$



а) б)

Рис. 1. Эквивалентная схема (а) и амплитудно-частотная характеристика модуля полного сопротивления конденсатора (б)

На высоких частотах конденсатор можно рассматривать как последовательный колебательный контур с резонансной частотой

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{П}}C}}. \qquad (2)$$

На резонансной частоте компенсируются емкостная и индуктивная составляющие импеданса, т. е. $\frac{1}{2\pi fC} = 2\pi fL$. Сопротивление резко снижается, и конденсатор имеет чисто активное сопротивление. На частотах ниже резонансной реактивное сопротивление носит емкостный характер, на частоте выше резонансной – индуктивный (рис. 1, б). Резонансная частота должна быть в 2-3 раза выше рабочей.

Паразитная индуктивность обычно мала, составляет единицы нГн у керамических, слюдяных конденсаторов и сотни нГн у бумажных и пленочных конденсаторов большого номинала. В конденсаторах, изготовленных из диэлектрика с релаксационными видами поляризаций, снижение емкости на частотах $10^5...10^6$ Гц связано с уменьшением диэлектрической проницаемости. В электролитических конденсаторах емкость начинает уменьшаться уже на частотах $10^2...10^4$ Гц.

1.2. Конденсаторы для современной малогабаритной РЭА

Современная РЭА характеризуется повсеместной миниатюризацией и уменьшением ее массогабаритных характеристик. Широкое применение больших интегральных микросхем (БИС) позволило резко снизить размеры и массу большинства образцов РЭА. Применение поверхностного монтажа элементов и миниатюризация пассивных компонентов электронных устройств потребовали уменьшения размеров конденсаторов основных типов, соизмеримых по габаритным характе-

ристикам с размерами основных элементов для поверхностного монтажа. Такие конденсаторы выпускаются в специальных корпусах (SMD), и их называют ЧИП конденсаторы. Пример такого рода конденсаторов показан на рис. 2. Обычно ЧИП конденсаторы упаковываются в ленту, которая снабжена перфорацией и позволяет легко выбирать их различными автоматами при установки на печатную пла-

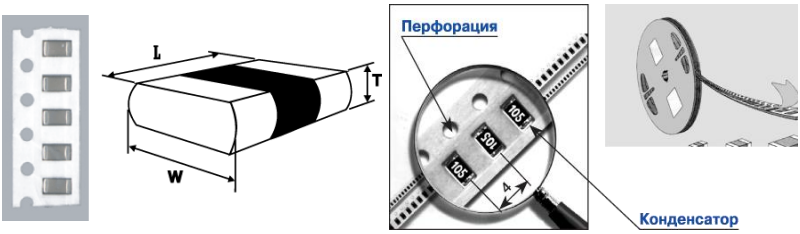


Рис. 2. ЧИП конденсаторы

ту.

Линейные размеры таких конденсаторов лежат в пределах от десятых долей до единиц миллиметров. ЧИП конденсаторы используются в малогабаритных, переносных и других типах РЭА. В настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом большое количество компаний производят ЧИП конденсаторы от простых керамических до электролитических с величинами номиналов от единиц пикофарад до десятков микрофарад. Такие конденсаторы могут использоваться практически в любых диапазонах частот. В качестве примера ниже в табл. 1 и 2 приведены типовые размеры и некоторые параметры ЧИП конденсаторов компании производителя Vibrant Development.

Таблица 1

Типоразмеры ЧИП конденсаторов компаний Vibrant Development

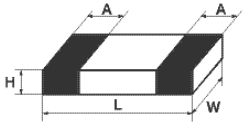
Типоразмер	L	W	H		A
			Min	Max	
1210 	3,2 мм	2,60 мм	1,0 мм	1,25 мм	0,75 мм

Таблица 2

Параметры ЧИП конденсаторов компаний Vibrant Development

Диэлектрик	NPO	X7R
Диапазон номинальных емкостей	1пФ - 3.3нФ	470 пФ-0.1мкФ
Диапазон рабочих температур	-55 + 125 °C	-55 + 125 °C

2. Методика проведения измерений

В данной работе определяются параметры конденсатора: номинальная емкость, tgδ, активное сопротивление потерь и ТКЕ. В лабораторной работе измерение параметров конденсаторов производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора - измерителя добротности, или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности Q и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная

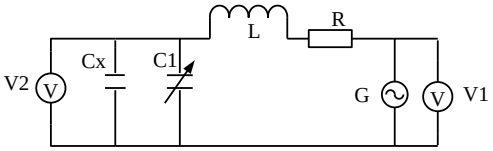


Рис. 3. Упрощенная схема измерителя добротности (Q-метра)

схема Q-метра показана на рис. 3.

В приборе используется явление резонанса в высокодобротном последовательном колебательном контуре. Этот контур сформирован образцовой высокодобротной катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором С1. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G, частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G, изменяя емкость конденсатора С1, контур настраиваем в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре V2. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров V2 и V1, т.е. Q = V2/V1. Если поддерживать напряжение генератора на известном уровне (например, 1 В), то шкалу вольтметра V2 можно проградуировать в значениях добротности.

Если в контур вносится дополнительная емкость Сх, например в виде емкости исследуемого конденсатора, то изменяются резонансная частота контура и его добротность. Резонансная частота изменяется за счет увеличения суммарной емкости контура С = С1 + Сх, а добротность контура снижается за счет потерь различного типа, возникающих в подключенном конденсаторе. Настраивая контур вновь в резонанс на этой же частоте f_0 , по разности показаний конденсатора С1 можно определить величину емкости Сх, т.е. это и есть емкость исследуемого конденсатора.

Уменьшение добротности контура позволит оценить величину потерь, вносимых конденсатором в колебательный контур, а следова-

тельно, и его tgδ. При этом tgδ можно рассчитать по формуле

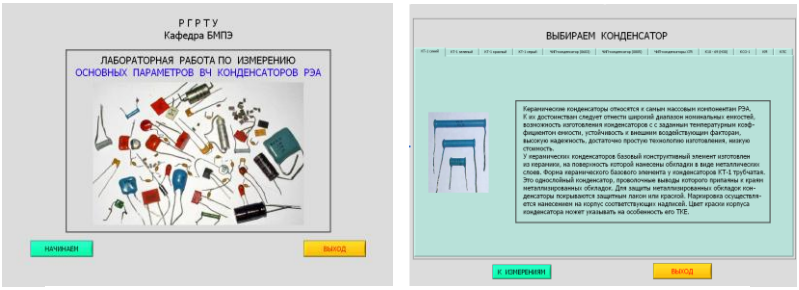
$$tg\delta = \frac{(Q_1 - Q_2)\cdot C_1}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot (C_1 - C_2)} \quad , \qquad (3)$$

где Q_1 и C_1 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при неподключенном исследуемом конденсаторе, Q_2 и C_2 – добротность контура и емкость переменного конденсатора при подключенном к Q-метру исследуемом конденсаторе.

3. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом емкости исследуемого конденсатора и тангенса угла его диэлектрических потерь с применением прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда конденсаторов от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. Принцип измерения C_X и tgδ описан выше. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Лаб_конденсатор» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис. 4,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, применяемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора



а б

Рис. 4. Окна запуска лабораторной работы

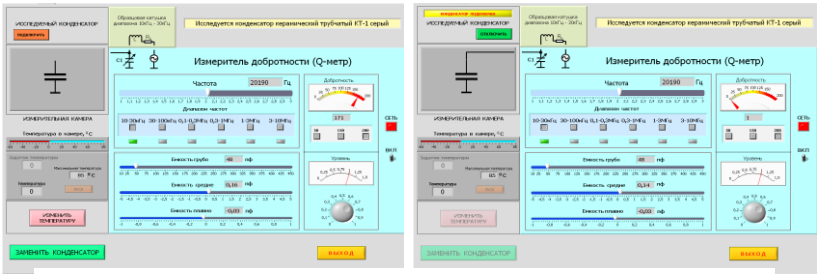
конденсатора, как показано на рис. 4,б.

Выбор конденсатора осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием конденсатора. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранного типа конденсаторов

для исследования в лабораторной работе.

3.1. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно проведения измерений прибором Q-метр, показанное на рис. 5. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом конденсатора. На рис. 5,а исследуемый конденсатор не подключен к прибору Q-метр, а на рис. 5,б подключен. Здесь же отображается функциональная схема подключения исследуемого кон-



а б

Рис. 5. Окно проведения измерений прибором Q-метр

денсатора.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 ^{0}C. Измерение параметров конденсатора необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.
2. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на отметку «1».
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру», в окно «Задатчик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и нажать кнопку «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере.
4. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1. В процессе проведения измерений на одной частоте значения Q_1 и емкость C_1 остаются постоянными. Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного

конденсатора.

5. Подключить исследуемый конденсатор щелчком по кнопке «Подключить образец» и повторить измерения в соответствии с п. 4. Новые величины добротности и емкости будут соответствовать значениям Q_2 и C_2, измеренным при подключенном в контур конденсаторе.

6. Отключить образец кнопкой «Отключить образец», при необходимости изменить частоту или температуру в измерительной камере в соответствии с пп. 1-3 и продолжить измерения как в пп. 4,5.

7. При необходимости выбрать другой конденсатор, используя кнопку «Заменить конденсатор».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретных конденсаторов в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1, C_1 и Q_2, C_2 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже.

3. Рассчитать значения C, X_C, Q, $R_П$ для исследуемых конденсаторов по формулам (4) – (8) и построить графики зависимости этих параметров от частоты и температуры в соответствии с заданием преподавателя:

– емкость конденсатора $C = C_2 - C_1$; (4)

– реактивное сопротивление $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$; (5)

– добротность конденсатора $Q = \frac{(C_2 - C_1)Q_1 Q_2}{C_1(Q_1 - Q_2)}$; (6)

– активное сопротивление $R_П = \frac{C_1 Q_1 / Q_2 - Q_1}{2\pi f C_1 Q_1 Q_2}$; (7)

- тангенс угла потерь конденсатора $tg\delta = 1/Q$. (8)

4. Определить ТКЕ конденсатора в указанном диапазоне температур и сопоставить его со значениями, указанными в приложении к лабораторной работе.

5. Содержание отчета

5.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

5.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;

- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

6. Классификация и маркировка конденсаторов

Классифицируют конденсаторы по типу диэлектрика. Сокращенные обозначения содержат три элемента. Первый элемент - буква или сочетание букв - определяет тип конденсатора (К - постоянной емкости; КП - переменной емкости; КТ - подстроечный; КС - конденсаторной сборки). Второй элемент – число, обозначающее используемый вид диэлектрика: 10 – керамические на номинальное напряжение до 1600 В; 15 – керамические на номинальное напряжение 1600 В и выше; 20 – кварцевые; 21 – стеклянные; 22 – стеклокерамические; 23 – стеклоэмалевые; 31 – слюдяные малой мощности; 32 – слюдяные большой мощности; 40 – бумажные на номинальное напряжение до 2 кВ с обкладками из фольги; 41 – бумажные на номинальное напряжение 2 кВ и выше с обкладками из фольги; 50 – электролитические фольговые алюминиевые; 51 – электролитические фольговые танталовые, ниобиевые и др.; 52 – электролитические объемно-пористые; 53 – полупроводниковые оксидные; 54 – металлические оксидные; 60 – воздушные; 61 – вакуумные; 71 – полистирольные; 72 – фторопластовые; 73 – полиэтилентерефталатные лавсановые; 72 – комбинированные; 76 – лакопленочные; 77 – поликарбонатные. Третий элемент – порядковый номер, присваиваемый при разработке. Дополнительно может содержать буквенное обозначение (П – для работы в цепях постоянного и переменного токов; Ч – для работы в цепях переменного тока; И – для работы в импульсных режимах; У – для работы в цепях постоянного тока и в импульсных режимах).

Обозначения и маркировка применяются двух типов в зависимости от размера конденсатора. На конденсаторах большого размера обозначаются тип, номинальная емкость, допустимое отклонение емкости в процентах, номинальное напряжение, марка завода-изготовителя, месяц и год выпуска.

При маркировке применяются обозначения полные или сокращенные (кодированные). Кодированные обозначения номинальной емкости состоят из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква обозначает множитель *р, n,* μ , *m* , F (соответственно 10^{-12}, 10^{-9}, 10^{-6}, 10^{-3}, 1) для значений емкости, выраженных в фарадах. Например, 5,6 пФ–5*р*6; 150 пФ-150*р*(*n*15); 2,2 мкФ-2 μ 2; 10

мФ-10*m*. Кодированные обозначения допустимых отклонений приводятся в справочной литературе (в таблицах).

Ниже представлена кодировка допускаемых отклонений емкости конденсаторов. Буквенное обозначение допуска указано для международного и российского стандартов.

Допуск, %	**Буквенное обозначение**	**Цвет**
±0,1 пФ*	B (Ж)	Не указан
±0,25 пФ*	C (У)	Оранжевый
±0,5 пФ*	D (Д)	Желтый
±1 пФ*	F (Р)	Коричневый
±2	G (Л)	Красный
±5	J (И)	Зеленый
±10	K (С)	Белый
±20	M (В)	Черный
±30	N (Ф)	Не указан
-10…+30	Q (О)	Не указан
-10…+50	T (Э)	Не указан
-10…+100	Y (Ю)	Не указан
-20…+50	S (Б)	Фиолетовый
-20…+80	Z (А)	Серый
* Для конденсаторов емкостью меньше 10 пФ		

Кодировка ТКЕ конденсаторов.

Конденсаторы с ненормируемым ТКЕ			
Группа ТКЕ	**Допуск при -60…+85 °С (%)**	**Буквенный код**	**Цвет***
H10	± 10	B	Оранжевый (+черный)
H20	± 20	Z	Оранжевый (+красный)
H30	± 30	D	Оранжевый (+зеленый)
H50	± 50	X	Оранжевый

			(+голубой)
Н70	± 70	E	Оранжевый (+фиолетовый)
Н90	± 90	F	Оранжевый (+белый)

* Современная цветовая кодировка. Цветные полоски или точки. Второй цвет может быть представлен цветом корпуса.

Конденсаторы с линейной зависимостью емкости от температуры

Обозначение ГОСТ	**Международное**	**ТКЕ (ppm/°C) ***	**Буквенный код**	**Цвет****
П100	Р100	+100	А	Красный (+фиолетовый)
П33		+33	N	Серый
МП0	NP0	0(+30…-75)	С	Черный
М33	N030	-33 (+30…-80)	Н	Коричневый
М47	N050	-47 (+30…-80)	М	Желтый
М75	N080	-75 (+30…-80)	L	Красный
М150	N150	-150 (+30…-105)	Р	Оранжевый
М220	N220	-220 (+30…-120)	R	Желтый
М330	N330	-330 (+60…-180)	S	Зеленый

M470	N470	-470 (+60…-210)	T	Голубой
M750	N750	-750 (+120…-330)	U	Фиолетовый
M1500	N1500	-1500(-1300)	V	Оранжевый (+оранжевый)
M2200	N2200	-2200	K	Желтый (+оранжевый)

* В скобках приведен реальный разброс для импортных конденсаторов в диапазоне температур
-55…+85°С.
** Современная цветовая кодировка. Цветные полоски или точки. Второй цвет может быть представлен цветом корпуса.

Конденсаторы с нелинейной зависимостью от температуры

Группа ТКЕ*	**Допуск, %**	**Температура,** °С**	**Буквенный код*****	**Цвет*****
Y5F	± 7,5	-30…+85		
Y5P	± 10	-30…+85		Серебряный
Y5R		-30…+85		Серый
Y5S	± 22	-30…+85	R	Коричневый
Y5U	+22…-56	-30…+85	S	
Y5V (2F)	+22…-82	-30…+85	A	
X5F	± 7,5	-55…+85		
X5P	± 10	-55…+85		
X5S	± 22	-55…+85		
X5U	+22…-56	-55…+85		Синий

X5V	+22…-82	-55…+85		
X7R (2R)	± 15	-55…+85		
Z5F	± 7,5	-10…+85	B	
Z5P	± 10	-10…+85	C	
Z5S	± 22	-10…+85		
Z5U (2E)	+22…-56	-10…+85	E	
Z5V	+22…-82	-10…+85	F	Зеленый

* Обозначение приведено в соответствии со стандартом EIA, в скобках - IEC.
** В зависимости от технологий, которыми обладает фирма, диапазон может быть другим.
*** В соответствии с EIA. Некоторые фирмы пользуются другой кодировкой.

Отечественное обозначение ТКЕ	**Замена на:**
М1500, М750	X7R
Н10, Н20, Н30, Н50, Н70, Н90	Y5V
П33, МП0, М47	NP0

7. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. От чего зависит емкость конденсатора?
2. Для чего используют конденсаторы в РЭА?
3. Что такое тангенс дельта и добротность конденсатора?
4. От чего зависит добротность конденсатора?
5. Нарисуйте эквивалентную схему конденсатора и объясните назначение ее элементов.
6. Что такое номинальная емкость конденсатора и допускаемые отклонения?
7. Что такое ТКЕ и от чего он зависит?
8. Как классифицируются конденсаторы?
9. Как сокращенно обозначаются значения емкости конденсаторов?

10. Из каких диэлектрических материалов выполняются конденсаторы?
11. Объяснить зависимости, полученные в работе.
12. Объяснить график частотной зависимости полного сопротивления конденсатора.
13. На какие группы разделяют ТКЕ конденсаторов?
14. Как добротность конденсатора зависит от температуры?
15. Как добротность конденсатора зависит от частоты?
16. Каковы конструктивные особенности СВЧ конденсаторов?
17. Какие конструктивные особенности конденсаторов для малогабаритной аппаратуры?
18. Почему растет tgδ конденсатора на высоких частотах?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов измерения пробивного напряжения и определение электрической прочности диэлектрических материалов

1. Основные теоретические сведения

1.1. Электрический пробой твердых диэлектриков

Надежность и долговечность электрической изоляции проводов, диэлектрика конденсаторов и других деталей радиоэлектронной аппаратуры, особенно работающих при повышенных электрических напряжениях, зависят от электрической прочности диэлектрика. Электрическая прочность диэлектрика зависит от напряжения пробоя $U_{пр}$, т.е. напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, а именно потеря диэлектриком изолирующих свойств.

Электрическую прочность диэлектрика в однородном электрическом поле определяют величиной пробивного напряжения $U_{пр}$, отнесенной к толщине диэлектрика d или расстоянию между электродами, – т.е. напряженностью электрического поля при пробое $E_{пр}$. Пробивное напряжение $U_{пр}$ в большинстве случаев прямо пропорционально величине d, зависит от параметров диэлектрика и окружающей среды и характеризует конкретную конструктивную особенность данного изделия. Напряженность электрического поля при пробое $E_{пр}$ не зависит от толщины и поэтому характеризует электрическую прочность материала диэлектрика:

$$E_{пр}=\frac{U_{пр}}{d}. \qquad (1)$$

Электрическая прочность измеряется в В/м, однако допускаются

производные единицы измерения: МВ/м, кВ/мм, кВ/см. Величина $E_{пр}$ характеризует способность диэлектрика противостоять разрушающему действию электрического поля и зависит в первую очередь от агрегатного состояния изолятора и его свойств.

Различают четыре вида электрического пробоя твердых диэлектриков.

1) электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков;

2) электрический пробой неоднородных диэлектриков;

3) тепловой (электротепловой) пробой;

4) электрохимический пробой.

Каждый из указанных видов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля (постоянного пли переменного, импульсного, низкой или высокой частоты), наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор, от условий охлаждения, времени воздействия напряжения.

Электрический пробой обычно происходит в диэлектриках с низкой электропроводностью, низким тангенсом угла диэлектрических потерь и хорошим отводом тепла.

1. Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков характеризуется весьма быстрым развитием. Он протекает за время, меньшее $10^{-7} – 10^{-8}$ с, и не обусловлен тепловой энергией, хотя электрическая прочность при электрическом пробое в некоторой степени все же зависит от температуры.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих изначально свободных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Под действием электрического поля и имея некоторую длину свободного пробега λ, электроны разгоняются и получают дополнительную кинетическую энергию $W = qU_{\lambda}$, где q - заряд; U_{λ} - падение напряжения на длине свободного пробега λ. Электроны, достигшие определенной критической скорости при столкновении с нейтральной молекулой или атомом, могут производить отщепление одного или нескольких новых электронов. Каждый из отщепленных от атомов и молекул электронов может ускоряться электрическим полем и выбить при достаточно набранной энергии еще несколько других электронов. Таким образом, возникает лавинообразное увеличение количества свободных электронов и за счет лавинного умножения таких электронов возникает участок в диэлектрике с повышенной проводимостью.

Это приводит к резкому возрастанию проводимости твердого диэлектрика в месте формирования электронной лавины, и возникает явление электрического пробоя. Как правило, резкое возрастание тока

приводит к повышенному выделению тепла и в месте возникновения лавины происходит разрушение структуры диэлектрика.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние разогрева диэлектрика за счет высокой электропроводности и диэлектрических потерь, также обусловливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. Для однородного поля и полной структурной однородности материала напряженность поля при электрическом пробое может служить мерой электрической прочности вещества. Такие условия удается наблюдать для монокристаллов щелочно-галоидных соединений и некоторых органических полимеров. В этом случае $E_{пр}$ достигает сотен мегавольт на метр и более. Для однородных материалов наблюдается существенная разница между значениями пробивного напряжения в однородном и неоднородном электрических полях.

2. Электрический пробой неоднородных диэлектриков характерен для технических диэлектриков, содержащих газовые включения. Так же, как и электрический пробой однородного диэлектрика, он весьма быстро развивается.

Наличие газовых включений и других неоднородностей с величиной диэлектрической проницаемости ε, меньшей чем в самом материале диэлектрика, приводит к неравномерному распределению напряженности электрического поля по объему материала. Это влечет увеличение напряженности электрического поля в веществе с меньшей величиной ε и первоначальное возникновение пробоя именно в этом месте. Возникновение пробоя, например в газовом промежутке, приводит к нарушению структуры вещества диэлектрика в месте его соприкосновения с неоднородностью и местному разогреву. Возникают локальные механические и тепловые напряжения, приводящие к растрескиванию вещества. Все это ведет к росту проводимости в локальном месте диэлектрика, увеличению плотности тока и дальнейшему разогреву. Электропроводность диэлектриков увеличивается с ростом температуры, и, следовательно, растет ток в локальном месте. Таким образом формируется лавинообразный процесс увеличения электропроводности в локальном месте диэлектрика и возикает пробой. Напоминаем, что причиной этого процесса являлась неоднородность в структуре диэлектрика.

Пробивные напряжения для неоднородных диэлектриков, находящихся во внешнем однородном или неоднородном поле, как правило, имеют невысокие значения и мало отличаются друг от друга.

Принято считать, что в однородном поле электрическая прочность стекол, фарфора и других твердых диэлектриков не зависит от толщины образца. Однако основные работы по изучению влияния сте-

пени однородности поля на электрическую прочность проводились лишь со стеклом при очень малых толщинах образцов - от 0,05 до 0,2 - 0,5 мм, когда число дефектов невелико. Понятно, что с увеличением толщины образца усиливается неоднородность структуры, возрастает число газовых включений и снижаются электрические прочности как в однородном, так и в неоднородном поле. Иногда на опыте можно видеть, что электрическая прочность керамики при электродах, создающих внешнее неоднородное поле, будет даже выше, чем при электродах, обеспечивающих однородное поле. Так, электрическая прочность образцов рутиловой керамики толщиной 1,6 - 1,7 мм при постоянном напряжении для электродов игла - плоскость составляет примерно 24 МВ/м, а для плоских электродов - всего 12,5 - 15 МВ/м.

Из этого следует, что чем меньше площадь электродов, тем выше может быть значение электрической прочности керамических материалов вследствие уменьшения числа инородных включений, попадающих в пределы поля, хотя поле в этом случае резко неоднородное. Снижение электрической прочности твердых диэлектриков при увеличении площади электродов наблюдается не только у керамики, но и у других материалов: бумаги, картона, лакотканей .

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее значения. Выше этого значения наблюдается заметное снижение электрической прочности, что говорит о появлении теплового механизма пробоя.

Низкой электрической прочностью отличаются диэлектрики с открытой пористостью (непропитанная бумага, дерево, пористая керамика). Электрическая прочность их сравнительно мало отличается от таковой для воздуха; исключение составляет бумага с повышенной плотностью. Твердые диэлектрики с закрытыми порами, например плотная керамика, характеризуются более высокой электрической прочностью. Наличие газовых включений в твердой изоляции особенно опасно при высоких частотах. На высоких частотах в газовых промежутках возникает сильная ионизация и возможно образование плазмы. Это приводит к появлению активных химических веществ по краям газового включения, которые могут иметь более высокую проводимость, инициировать локализацию тока и вызвать электрический пробой в локальном месте, как описано выше. Электрический пробой неоднородных диэлектриков при прочих равных условиях требует применять материалы с большей толщиной для улучшения изоляционных свойств электроустановок.

Высокой электрической прочностью характеризуются диэлектрики, имеющие плотную структуру и не содержащие газовых включений. К ним относятся: слюда, пропитанная жидким диэлектриком бу-

мага, стекла. Статистические исследования напряжения пробоя диэлектриков показали, что коэффициент вариации (Квар) напряжения пробоя для неоднородных диэлектриков превышает значение 0,15, а для однородных - менее 0,15. Чем однороднее диэлектрик, тем меньше для него значение Квар.

3. Тепловой пробой. Характерен для диэлектриков с высокой электропроводностью, большим значением тангенса угла диэлектрических потерь и плохим теплоотводом. Этот пробой сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих потере им электроизоляционных свойств в локальном месте, связанной с чрезмерным возрастанием сквозной электропроводности или диэлектрических потерь. Пробивное напряжение при тепловом пробое зависит от целого ряда факторов: частоты электрического поля, условий охлаждения, температуры окружающей среды и др. При нахождении диэлектрика в электрическом поле часть энергии электрического поля рассеивается в диэлектрике из-за диэлектрических потерь, сквозной проводимости, в результате чего диэлектрик нагревается. Повышение температуры диэлектрика по сравнению с окружающей средой ведет к увеличению теплоотвода. Дальнейшее развитие процессов зависит от соотношения скоростей отвода тепла и тепловыделения. На рис.1 показаны зависимости мощности тепловыделения ($P_{тв}$) и мощности отвода тепла ($P_{то}$) от температуры окружающей среды для неполярного диэлектрика.

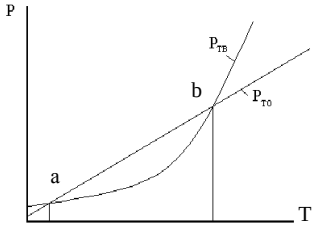


Рис. 1. Зависимости мощности выделения тепла (Ртв) и мощности отвода тепла (Рто) от температуры

Как видно из приведенного рисунка, в области температур от точки a до точки b мощность отвода тепла превышает мощность тепловыделения, поэтому повышения температуры не происходит, т.е. система находится в равновесии. Для перехода в область за точку b необходимо дополнительное выделение тепла. Это обусловлено тем, что при росте температуры увеличивается электропроводность диэлектрика, растут ток и выделяемое в диэлектрике тепло. Рост температуры увеличивает электропроводность и выделяемое тепло. Создается лавинообразный процесс увеличения тепловыделения, кривая тепловыделения $P_{ТВ}$ на рис. 1 поднимается выше кривой теплоотвода и начинается необратимый разогрев диэлектрика, приводящий к его пробою и разрушению. Этот процесс может происходить достаточно быстро, и

температура диэлектрика начинает быстро расти. Нагрев материала диэлектрика может привести к его растрескиванию, оплавлению, обугливанию, что снижает электрическую прочность диэлектрика и ведет к его разрушению.

Очевидно, что стойкость к электротепловому пробою зависит как от свойств самого материала (у полярных диэлектриков диэлектрические потери выше и стойкость к электротепловому пробою ниже), так и от конструкции изолятора. Чем больше поверхность изолятора, тем больше тепла рассеивается в окружающую среду и меньше вероятность электротеплового пробоя.

Следует также отметить, что в случае, когда рабочая температура изолятора приближается к точке b, любое повышение температуры приведет к выходу изоляции из строя. В то же время в случае, когда рабочая температура находится ниже точки b, колебания температуры не столь опасны. Нагрев диэлектрика (при нахождении его при температуре ниже точки b) приведет к увеличению мощности отвода тепла. Поэтому мощности выделения и отвода тепла сравняются.

4. Электрохимический пробой имеет особенно существенное значение при нахождении диэлектрика в химически агрессивных средах, при повышенной температуре и высокой влажности воздуха. Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, когда в материале развиваются электролитические процессы, обусловливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции. Уменьшение сопротивления диэлектрика стимулирует увеличение через него тока и дополнительное выделение тепла. Температура диэлектрика возрастает, и это активизирует электролитические и электрохимические процессы в веществе, что в свою очередь уменьшает сопротивление изоляции и приводит к росту тепловыделения. Таким образом, возникает лавинообразный процесс роста температуры изоляции и к ее разрушению.

Такое явление часто называют старением диэлектрика в электрическом поле, поскольку оно приводит к постепенному снижению электрической прочности, заканчивающемуся пробоем при напряженности поля, значительно меньшей пробивной напряженности, полученной при кратковременном испытании. Это явление имеет место в органических (пропитанная бумага, резина и т.д.) и некоторых неорганических диэлектриках (например, титановая керамика).

Электрохимический пробой требует для своего развития длительного времени. Это связано с явлением электропроводности, приводящим к медленному выделению в материале малых количеств химически активных веществ, или с образованием полупроводящих соединений. В керамике, содержащей окислы металлов переменной валентно-

сти (например, TiO2), электрохимический пробой встречается значительно чаще, чем в керамике, состоящей из окислов алюминия, кремния, магния, бария.

Наличие щелочных окислов в алюмосиликатной керамике способствует возникновению электрохимического пробоя и ограничивает допустимую рабочую температуру. При электрохимическом пробое большое значение имеет материал электрода. Серебро, из которого могут быть выполнены электроды, способно диффундировать в керамику и облегчает электрохимический пробой в противоположность, например, золоту.

1.2. Физические явления электрического пробоя в газообразных диэлектриках

Внешней изоляцией во многих видах электротехнических конструкций, таких как трансформаторы, конденсаторы, линии электропередачи, служит воздух. Электрическая прочность воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с $E_{пр}$ большинства жидких и твердых диэлектриков.

Небольшое число содержащихся в газе положительных и отрицательных ионов и электронов вызвано в основном внешними воздействиями (радиационный фон, ультрафиолетовое излучение и др.). Эти носители зарядов, как и нейтральные молекулы газа, находятся в беспорядочном тепловом движении. При наложении электрического поля заряды получают некоторую добавочную скорость и начинают перемещаться вдоль вектора поля или в противоположном направлении, в зависимости от знака заряда. При этом заряженная частица в газе приобретает дополнительную энергию

$$W = qU_{\lambda} , \qquad (2)$$

где q - заряд; U_{λ} - падение напряжения на длине свободного пробега λ. носителя заряда

Если поле достаточно однородно, то можно принять $U_{\lambda} = E\lambda$, где E - напряженность поля. Отсюда

$$W = Eq\lambda . \qquad (3)$$

Добавочная энергия заряженных частиц сообщается молекулам, с которыми они сталкиваются. Если эта энергия достаточно велика, происходит возбуждение атомов и молекул, связанное с переходом электрона на более удаленную от ядра орбиту, или даже ионизация молекул, т. е. их расщепление на электроны и положительные ионы. Условие, определяющее возможность ионизации:

$$W \geq W_{и} , \qquad (4)$$

причем W включает в себя и энергию теплового движения, обычно

небольшую при нормальной температуре.

Из формул (2) и (3) получаем условие ионизации нейтральной молекулы вещества:

$$Eq\lambda \geq W_{и} \ . \qquad (5)$$

Энергию ионизации $W_{и}$ обычно характеризуют ионизационным потенциалом

$$U_{и} = W_{и}/q \ . \qquad (6)$$

Ионизационный потенциал большинства различных газов изменяется в пределах от 4 до 25 эВ, что соответствует энергии ионизации 4 - 25 эВ.

При заданных значениях давления газа и температуры ударная ионизация начинается при определенной напряженности поля, поскольку q и λ постоянны для каждого газа при данных конкретных условиях. Эта напряженность поля $E_{пр}$ называется начальной напряженностью.

В некоторых газах, например в кислороде, углекислом газе, парах воды, отделившийся электрон при одной из ближайших встреч с другой нейтральной молекулой соединяется с ней, превращая ее в электроотрицательный ион. Присоединение, «прилипание» электрона к нейтральной молекуле приводит в подобных случаях к такой перестройке ее электронной оболочки, что в итоге энергия молекулы, захватившей лишний электрон, оказывается меньше энергии нейтральной молекулы на некоторую величину, которую называют энергией сродства к электрону. Она колеблется у большинства различных газов в пределах 0,75 - 4,5 эВ. В инертных газах - в аргоне, неоне, гелии, криптоне, ксеноне, а также в азоте - отрицательные ионы не возникают. При разряде в воздухе образуются положительные ионы газов, содержащихся в атмосфере: O^{+}, O_2^{+}, N^{+}, N_2^{+}, NO^{+}.

Скорость электрона (километр в секунду), прошедшего без столкновений разность потенциалов U (вольт), определяется выражением

$$v \approx 600\sqrt{U} \ . \qquad (7)$$

Подставляя в эту формулу ионизационные потенциалы, получаем, что электрон способен ионизировать газовые молекулы, когда скорость его движения свыше 1000 км/с.

Казалось бы, подобно электронам, и положительные ионы, разогнанные полем, сталкиваясь с нейтральными частицами газа, должны вызывать ионизацию газа. В действительности при энергиях до сотен и тысяч электрон-вольт соударения положительных ионов с частицами газа непосредственно не приводят к ионизации газа. Такое различное действие электронов и положительных ионов на частицы газа объясня-

ется тем, что электроны имеют значительно большую подвижность, чем ионы. Кроме того, отщепляемый электрон отталкивается электроном, столкнувшимся с частицей газа, и, наоборот, притягивается положительным ионом. Сказывается также и то, что для электрона длина свободного пробега больше, чем для иона. Если положительный ион, разогнанный полем, испытывает соударение с периферическим электроном на внешней электронной оболочке нейтральной частицы, то условия для отщепления электрона оказываются неблагоприятными, так как при большом различии массы энергия, отдаваемая электрону при ударе, мала. Ионизация при соударении ионов с частицами газа зависит от химической природы столкнувшихся частиц, поскольку соударения являются элементарным актом химической реакции. При разряде в газе, находящемся между металлическими электродами, положительные ионы высвобождают электроны из металла, бомбардируя поверхность катода.

В некоторых случаях электрон, разогнанный полем, может не ионизировать молекулу, а привести ее, как указывалось выше, в возбужденное состояние. В следующий момент эта возбужденная молекула отдает свою избыточную энергию в форме электромагнитного излучения — испускает фотон. Фотон может поглощаться какой-либо другой молекулой, которая получает дополнительную энергию, и ее электро-

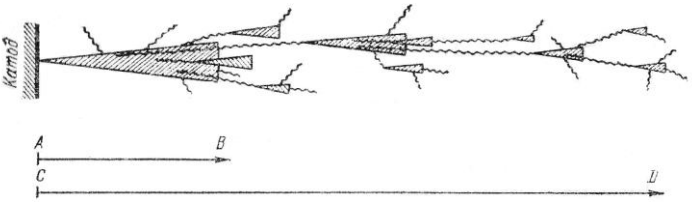


Рис. 2. Схемотехническое изображение распределения стримера при пробое газа

ны внешней оболочки уже имеют меньшую энергию ионизации. Эти молекулы гораздо легче ионизируются другими электронами. Такая внутренняя фотонная ионизация газа благодаря большой скорости распространения излучения приводит к особенно быстрому развитию в разрядном промежутке каналов с повышенной проводимостью газа.

На рис.2 представлена схема, поясняющая, почему рост электропроводящего канала — стримера — происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. На рис.2 лавины условно показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути

фотонов. Внутри каждого конуса, представляющего собой развивающуюся лавину, газ ионизируется ударами электронов; вновь отщепленные электроны, разгоняемые полем, ионизируют встречаемые ими частицы газа, и таким образом лавинообразно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число положительных ионов, направляющихся к катоду.

Волнистые линии исходят из атомов, которые были возбуждены ударами электронов и вслед за тем испустили фотоны. Двигаясь со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, фотоны обгоняют лавину и в каком-то месте, соответствующем концу волнистой линии, увеличивают энергию электронов молекул газа. В таких молекулах ионизация происходит при меньших энергиях разогнанного полем электрона и освобожденные здесь электроны, устремляясь к аноду, порождают новую лавину далеко впереди первой лавины. Таким образом, пока первая лавина вырастает, скажем, на длину малой стрелки AB (рис.2), намечающийся канал повышенной проводимости газа, т. е. стример, распространяется на длину большой стрелки CD**.**

В следующей стадии отдельные лавины в отрицательном стримере, нагоняя друг другу, сливаются, образуя сплошной канал ионизированного газа.

Одновременно с ростом стримера, направленного от катода к аноду, начинается образование встречного лавинного потока положительно заряженных частиц, направленного к катоду. Положительный стример представляет собой канал газоразрядной плазмы. Поясним это подробнее. Электронные лавины оставляют на своем пути большое число вновь образованных положительных ионов, концентрация которых особенно велика там, где лавины получили свое наибольшее развитие, т. е. около анода. Если концентрация положительных ионов здесь достигает определенного значения (близкого к 10^{12} ионов в 1 $см^3$), то, во-первых, обнаруживается интенсивная фотонная ионизация, во-вторых, электроны, освобождаемые частицами газа, поглотившими фотоны, притягиваются положительным пространственным зарядом в головную часть положительного стримера и, в-третьих, вследствие ионизации концентрация положительных ионов на пути стримера увеличивается. Насыщение электронами пространства, заполненного положительными зарядами, превращает эту область в проводящую газоразрядную плазму. Под влиянием ударов положительных ионов на катоде образуется катодное пятно, излучающее электроны. В результате указанных процессов и возникает пробой газа. Обычно пробой газа происходит практически мгновенно: длительность подготовки пробоя газа при длине промежутка 1 см составляет порядка $10^{-7} – 10^{-8}$ с. Чем больше напряжение, приложенное к газовому промежутку, тем быстрее

может развиться пробой. Если длительность воздействия напряжения очень мала, то пробивное напряжение повышается. Это повышение обычно характеризуют коэффициентом импульса

$$\beta = U_{пр} / U_{пр50}\,, \qquad (8)$$

где $U_{\text{пр}}$ - пробивное напряжение при данном импульсе; $U_{\text{пр}50}$ - пробивное напряжение при постоянном или переменном напряжении частотою 50 Гц. Коэффициент импульса в резко неоднородных электрических полях может достигать значения 1,5 и даже превышать его. Явление пробоя газа зависит от степени однородности электрического поля, в котором осуществляется пробой. Рассмотрим явление пробоя газа в однородном поле. Однородное поле можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между сферами при расстоянии между ними, соизмеримом с диаметром сферы. В таком поле пробой наступает практически мгновенно при достижении строго определенного напряжения, зависящего от температуры и давления газа. Между электродами возникает искра, которая затем переходит в дугу, если источник напряжения имеет достаточную мощность. Появление искры при заданном расстоянии между электродами используют для определения значения приложенного напряжения (измерение высоких напряжений с помощью шаровых разрядников).

При малых расстояниях между электродами наблюдается значительное увеличение электрической прочности воздуха. Это явление можно объяснить трудностью формирования разряда при малом расстоянии между электродами. При нормальных условиях, т. е. при давлении 0,1 МПа и температуре около 20 °С, электрическая прочность воздуха при расстоянии между электродами 1 см составляет примерно 3 МВ/м; а при h = 5 мкм она достигает 70 МВ/м.

Электрическая прочность газа в сильной степени зависит от его плотности (т. е. от давления, если температура постоянна). При малых изменениях температуры и давления газа пробивное напряжение пропорционально плотности газа. Поэтому для расчета пробивных напряжений воздуха применяется формула

$$U_{пр} = U_{пр0}\delta\,, \qquad (9)$$

где $U_{\text{пр}}$ - пробивное напряжение при данных температуре и давлении; $U_{\text{пр}0}$ - пробивное напряжение при нормальных условиях (t= 20 °С и давлении р = 0,1 МПа). Относительная плотность воздуха δ рассчитывается по соотношению

$$\delta = 0{,}386\frac{p}{t+273}\,, \qquad (10)$$

где t - температура, °С; p - давление, мм рт. ст. При нормальных ус-

ловиях окружающей среды $\delta = 1$.

При больших давлениях и соответственно повышенной плотности газа расстояние между отдельными молекулами становится меньше; тем самым уменьшается длина свободного пробега электронов и, как следует из формулы (4), для того чтобы пробой произошел, должна быть увеличена напряженность электрического поля.

При уменьшении давления вначале наблюдается падение электрической прочности, как это видно из рис.3; когда же давление доходит до некоторого предела (ниже атмосферного давления) и разрежение достигает высоких степеней, электрическая прочность начинает снова возрастать. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разрежении и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами. При высоком вакууме пробой можно объяснить явлением вырывания электронов из поверхности электрода (холодная эмиссия). В этом случае электрическая прочность доходит до весьма высоких значений, зависит от материала и состояния поверхности электродов и больше не изменяется («полочка» на рис.3). Большую электрическую прочность вакуума используют в технике при конструировании вакуумных конденсаторов для больших напряжений высокой частоты.

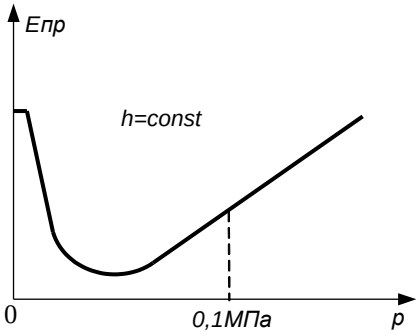


Рис. 3. Зависимость электрической прочности газа от давления

Газы при больших давлениях применяются в качестве изоляции для высоковольтной аппаратуры, а также в производстве кабелей и конденсаторов высокого напряжения. Химический состав газа заметно влияет на электрическую прочность. Закономерности, которым подчиняется пробой газов в неоднородном поле, заметно отличаются от описанных выше закономерностей, наблюдаемых при пробое в однородном поле. Неоднородное поле возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, между проводами линий электропередачи, между сферическими поверхностями при расстоянии между ними, превышающем диаметр сферы, и т. д.

Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде короны в местах, где напря-

женность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения между электродами.

Электрическая прочность воздушного зазора зависит от радиационного фона. Это связано с тем, что рост радиации приводит к увеличению количества свободных носителей заряда в газе и облегчает формирование электронной лавины. Радиоактивность измеряется в различных единицах. Мерой радиоактивности служит активность. Одной из единиц измерения служит Беккерель (Бк), что соответствует 1 распаду в секунду. Содержание активности в веществе часто оценивают на единицу веса вещества (Бк/кг) или объема (Бк/куб.м).

Также используется еще такая единица активности, как кюри (Ки). Это - огромная величина: 1 Ки = 37000000000 Бк. Активность радиоактивного источника характеризует его мощность. Так, в источнике активностью 1 кюри происходит 37000000000 распадов в секунду.

Как было сказано выше, при этих распадах источник испускает ионизирующее излучения. Мерой ионизационного воздействия этого излучения на вещество является экспозиционная доза. Часто измеряется в рентгенах (Р). Поскольку 1 рентген - довольно большая величина, на практике удобнее пользоваться миллионной (мкР) или тысячной (мР) долями рентгена.

1.3. Статистические методы исследования электрического пробоя диэлектриков

О величине электрической прочности материала нельзя судить по результатам одного опыта из–за большого разброса значений $U_{пр}$, полученных в одних и тех же условиях испытания (толщина диэлектрика, размер электродов, температура окружающей среды, скорость повышения напряжения и т.д.). Разброс значений $U_{пр}$ одинаковых образцов может достигать 50 %.

Чтобы судить о величине электрической прочности материала, необходимо произвести большое число испытаний на пробой (не менее 10), а экспериментальные результаты обработать статическим методом. Наилучшим приближением к истинному значению пробивного напряжения является среднее арифметическое из **n** измерений:

$$U_{пр} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Uinp \cdot \qquad (11)$$

Мера отклонения отдельного измерения величины пробивного напряжения U_i от истинного значения $U_{пр}$ есть среднеквадратичное отклонение σ, которое не зависит от числа измерений, но зависит от свойств самого материала и от условий проведения эксперимента. Мера отклонения среднего значения пробивного напряжения от истинного значе-

ния $U_{пр}$ есть среднеквадратичная величина σ_m, которая зависит от числа измерений **n**. Величины σ и σ_m связаны между собой соотношением

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \qquad (12)$$

Для определения σ_m можно воспользоваться формулой Питерса. Если определим для i – го измерения остаток

$$|\Delta_i| = U_{inp} - U_{np} \qquad (13)$$

и найдем среднее значение **n** остатков, взятых без учета знака,

$$r = \frac{1}{n}\sum_i |\Delta_i|, \qquad (14)$$

то формула Питерса примет вид

$$\sigma_m \approx \frac{5}{4}\frac{r}{\sqrt{n-1}}. \qquad (15)$$

Это выражение связывает среднеквадратичное отклонение среднего значения пробивного напряжения от истинного. Пробивное напряжение в этом случае

$$U_{пр} = U_{пр} + \sigma_m. \qquad (16)$$

Чем менее однородным является материал, тем больше σ_m и σ. Степень однородности определяется по коэффициенту вариации:

$$K_{вар} = \frac{\sigma}{U_{пр}}. \qquad (17)$$

К однородным материалам относятся такие, для которых $K_{вар} < 0{,}15$, к неоднородным – материалы с $K_{вар} > 0{,}15$. Пробивную напряженность (электрическую прочность) определяют по формуле (1) при постоянном напряжении, переменном напряжении промышленной частоты, напряжениях высокой частоты и импульсных напряжениях. Чаще всего определение $E_{пр}$ производят при переменном напряжении промышленной частоты.

2. Методика измерений электрической прочности

Измерение пробивного напряжения диэлектрика производят обычно с помощью установок, обобщенная принципиальная схема которых приведена на рис.4. Схема содержит: Т – повышающий трансформатор, максимальное выходное напряжение которого может быть 10 кВ и более. Коэффициент трансформации определяет максимальное напряжение, которого можно достичь при заданном максимальном входном напряжении. АТ - автотрансформатор с плавной регулировкой напряжения; Р – реле максимального тока, отключающее высоковольтный трансформатор при пробое образца; МП1, МП2 – магнитные пускатели; которые подключают сеть к автотрансформатору. Л1 и Л2– сигнальные лампы. V – вольтметр переменного тока. Резистор R ограничивает максимальную величину тока через образец при пробое.

При испытании образцы располагают на плоском нижнем электроде, выполненном из нержавеющей стали. В качестве верхнего электрода обычно применяют шары различных диаметров. Для определения пробивного напряжения испытуемый образец располагают между электродами, находящимися под защитным колпаком, имеющим блокировочный контакт. Магнитные пускатели подключают электрическую сеть к автотрансформатору, после чего можно подавать с него напряжение на первичную обмотку трансформатора Т. Путем ручного или автоматического увеличения автотрансформатором напряжения на первичной обмотке трансформатора Т напряжение на испытуемом образце плавно повышается до его пробоя. Напряжение, при котором произойдет пробой, фиксируют с помощью вольтметра V. В случае пробоя испытуемого образца магнитные пускатели МП1 и МП2 отключают автотрансформатор от электрической сети. После этого образец материала заменяют на другой и обеспечивают подготовку следующего цикла измерения.

3. Выполнение лабораторной работы

При подготовке к работе необходимо изучить методические ука-

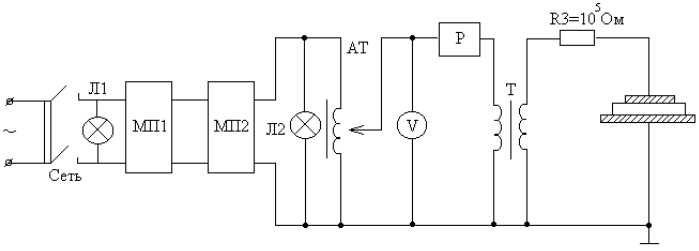
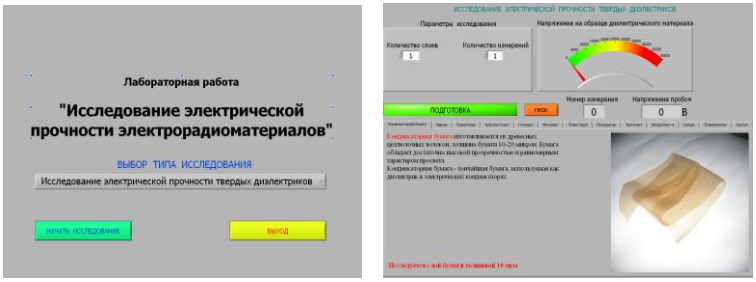


Рис. 4. Функциональная схема установки для измерения напряжения электрического пробоя твердых диэлектриков

зания к лабораторной работе и затем получить у преподавателя задание. Для начала работы необходимо запустить файл «Пробой_диэл» на Рабочем столе ПК. После чего появится окно, изображенное на рис.5,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и некоторые интуитивно понятные элементы управления.

Лабораторная работа состоит из двух частей. В **первой части** исследуется *электрическая прочность твердых диэлектриков*, а **во второй части** исследуется *электрическая прочность воздушного зазора*. Начинать работу можно с любой из частей, выбрав в меню «Выбор типа исследования» щелчком левой кнопки мыши нужный тип исследования. Начинается исследование со щелчка левой кнопкой мыши по кнопке «Начать исследование».

3.1. Исследование электрической прочности твердых



а б

Рис. 5. Внешний вид окна «Выбора типа исследования» (а) и окна исследования пробивного напряжения диэлектрика (б)

диэлектриков

Панель управления выполнением этой части лабораторной работы показана на рис.5,б. В нижней части панели происходит выбор материала для исследования щелчком по соответствующей вкладке. На каждой вкладке представлены конкретный материал диэлектрика и его краткое описание. Указывается толщина исследуемого образца материала. В верхней части панели задаются параметры исследования в виде количества слоев материала и количества необходимых измерений. Числовые значения в цифровые элементы управления задаются стандартным способом операционной системы Windows. (выделить и изменить).

ВНИМАНИЕ! Процесс измерения полностью автоматизирован и заканчивается автоматически после выполнения заданного количества измерений. Индикатор зеленого цвета «Подготовка» указывает на то, что происходит подготовка высоковольтной установки к началу измерений. Процесс измерения задается нажатием кнопки «Пуск». Процесс измерения напряжения пробоя отображается индикатором «Внимание! Высокое напряжение». Полученный массив измеренных данных отображается на специальном *индикаторе массива* справа в верхней части панели. Элементы массива, не уместившиеся на индикаторе, могут быть просмотрены с использованием кнопок *инкремент – декремент,* отображаемых слева в верхней части индикатора массива (рис.6). Цифровой индикатор рядом с кнопками *декремент – инкремент* указывает на индекс элемента массива, который всегда отображается в верхней строке *индикатора массива*. После выполнения полного цикла заданного количества измерений на панели управления появляются дополнительные кнопки, которые позволяют изменить параметры исследования (количество слоев, количество измерений) или прекратить исследования и перейти на выбор другого исследования (рис.7). На панель управления также выведены дополнительные индикаторы, отображающие процесс выполнения исследований.

После выполнения полного цикла заданного количества измерений на панели управления появляются дополнительные кнопки, которые позволяют изменить параметры исследования (количество слоев, количество измерений) или прекратить исследования и перейти на выбор другого исследования (рис.7). На панель управления также выведены дополнительные индикаторы, отображающие процесс выполнения исследований.

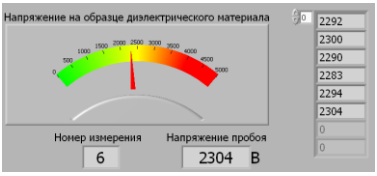


Рис. 6. Отображение массива измеренных значений

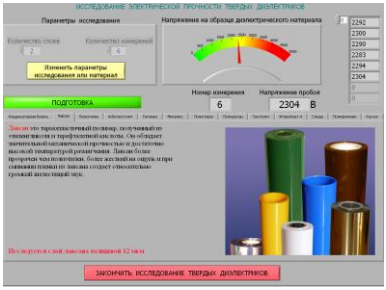


Рис. 7. Экран ПК после выполнения цикла измерений

3.2. Исследование электрической прочности воздушного зазора

Это исследование происходит в различных состояниях воздушного зазора в измерительной камере. Исследуется напряжение пробоя при различных *давлениях воздуха* и *радиационных фонах.* Для перехода к этой части лабораторной работы необходимо в первом окне ра-

боты (рис.5,а) выбрать из меню соответствующий пункт. Панель управления выполнением этой части лабораторной работы показана на рис.8. Она состоит из двух частей. Каждая их них активизируется только в своем режиме работы. После перехода к исследованию воздушного зазора появляется панель управления насосом (рис. 8,а), задающим давление в измерительной камере. После задания нужного давления, включения насоса и достижения заданного давления можно переходить к измерению напряжения пробоя. Для этого используются соответствующие кнопки панели управления.

Панель управления исследованием напряжения пробоя воздушного зазора показана на рис. 8,б. Элементы управления этой панели во многом соответствуют ранее описанной панели управления при исследовании напряжения пробоя твердых диэлектриков.



а б

Рис. 8. Окна управления насосом (а) и измерения напряжения пробоя воздушного зазора (б)

4. Последовательность выполнения работы

4.1. Исследовать электрическую прочность твердых диэлектриков, указанных преподавателем. Для этого:

а) произвести указанное количество (N) измерений напряжения пробоя для каждого слоя. Количество слоев также указывает преподаватель;

б) определить среднюю величину пробивного напряжения U_m для каждого из слоев как $U_m = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_i$;

в) построить график $U_m = F(N)$ и определить среднюю величину пробивной напряженности электрического поля (электрическую прочность) как $E = U_m/d$, где d – толщина исследуемого образца;

г) для максимального количества слоев исследуемого диэлектрика разделить диапазон напряжений пробоя между максимальным и минимальным значениями на несколько (5-7) зон и построить гистограмму распределения количества напряжений пробоя попавших в вы-

деленные зоны;

д) определить среднеквадратичное отклонение σ напряжений пробоя для максимального количества слоев диэлектрика как $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(U_i - U_m)^2}{N}}$;

е) определить коэффициент вариации напряжения пробоя для максимального количества слоев диэлектрика.

4.2. Исследовать электрическую прочность воздушного зазора. Для этого:

а) установить величину давления (P) в измерительной камере по указанию преподавателя и для обычного радиационного фона 15 мкР/ч произвести указанное количество (N) измерений напряжения пробоя;

б) произвести измерения (по п. 2.2 а) для указанных преподавателем давлений в измерительной камере при неизменном радиационном фоне4

в) определить среднюю величину пробивного напряжения U_m воздушного зазора для каждого значения давления в измерительной камере;

г) построить график $U_m = F(P)$;

д) установить давление в измерительной камере 750 мм рт. ст. и, увеличивая указанное преподавателем значение радиационного фона (R), произвести по 5 измерений напряжения пробоя воздушного зазора для каждого значения радиационного фона;

е) определить пробивного напряжения U_m для каждого значения радиационного фона R и построить график $U_m = F(R)$.

5.Содержание отчета

5.1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.

5.2. Отчет должен содержать:

- название работы;
- цель работы;
- основные теоретические сведения;
- схемы измерения;
- полученные расчетные данные;
- необходимые графики, требуемые по заданию;
- сравнение полученных данных со справочными материалами.

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Что такое электрический пробой диэлектриков?
2. В каких единицах и почему именно в них измеряется электри-

ческая прочность диэлектриков?

3. В каких диэлектриках возможен электрический пробой, тепловой пробой, электрохимический пробой?

4. Что такое энергия ионизации?

5. Как возникает электрический пробой в газообразных диэлектриках?

6. Что такое стример и какова его роль в электрическом пробое газообразных диэлектриков?

7. Как развивается тепловой пробой?

8. Как и почему происходит электрический пробой твердых неоднородных диэлектриков?

9. Как происходит электрический пробой твердых однородных диэлектриков?

10. Как происходит электрохимический пробой твердых диэлектриков?

11. Как и почему электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от давления газа?

12. Что такое коэффициент вариации пробивного напряжения и что он определяет?

13. Как пробивное напряжение диэлектрика зависит от его толщины?

14. Почему для исследования пробивной прочности диэлектрика используют статистические методы?

15. Как и почему электрическая прочность газообразных диэлектриков зависит от уровня радиации?

16. Почему при одинаковой толщине газообразного и твердого диэлектрика пробивное напряжение твердого диэлектрика значительно выше, чем у газообразного?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Цель работы: ознакомление с основными электрическими параметрами высокочастотных катушек индуктивности и методами измерения этих параметров на переменном токе высокой частоты.

1. Краткие теоретические сведения

1.1. Общие сведения о катушках индуктивности

Катушки индуктивности, трансформаторы, дроссели относятся к моточным компонентам радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Основ-

ной рабочий элемент – обмотка, используемая для реализации магнитных свойств. Доля моточных компонентов в устройствах РЭА составляет от 3 до 8 %. В высокочастотных катушках индуктивности используется индуктивный характер сопротивления в диапазоне 100 кГц – 10 ГГц. Катушки индуктивности обладают свойством оказывать реактивное сопротивление переменному току при незначительном сопротивлении постоянному току. Совместно с конденсаторами они используются для создания фильтров, осуществляющих частотную селекцию электрических сигналов, а также для создания элементов задержки сигналов и запоминающих элементов, осуществления связи между цепями через магнитный поток и т.д. В отличие от резисторов и конденсаторов они не являются стандартизованными изделиями, а изготавливаются для конкретных целей и имеют такие параметры, которые необходимы для осуществления тех или иных преобразований электрических сигналов. Катушки индуктивности в основном применяются:

- для колебательных контуров (параллельных и последовательных);
- получения магнитной связи за счет магнитного поля между отдельными участками цепей РЭА (связанные контуры);
- создания в электрической цепи реактивного сопротивления индуктивного характера (дроссели).

Материал проводника обмотки катушки – металл с большой проводимостью. Форма катушек может быть любой, но большее применение получили катушки цилиндрические.

Виды намотки – однослойная, многослойная, однослойная с шагом, универсальная, внавал.

Катушки индуктивности по конструкции можно разделить на несколько групп: каркасные и бескаркасные, с сердечниками и без сердечников, экранированные и неэкранированные.

Свойства высокочастотных катушек индуктивности характеризуются следующими параметрами:

– номинальная величина индуктивности (от единиц нГн до сотен мГн);

– добротность катушки (порядка 10-200);

– собственная емкость катушки (в зависимости от конструкции от долей до десятков пФ);

– температурный коэффициент индуктивности (ТКИ).

Однослойная катушка образуется путем размещения провода по поверхности каркаса в один слой по винтовой линии. Витки обмотки располагаются плотно, виток к витку, или на некотором расстоянии друг от друга. В первом случае обмотка называется сплошной, во втором – с шагом. Фактически при сплошной обмотке не представляется

возможным уложить провод без зазора, и расстояние между осевыми линиями двух соседних витков (шаг намотки τ) оказывается несколько больше, чем диаметр провода в изоляции *($d_{из}$):*

$$\tau = \alpha d_{из}, \qquad (1)$$

где α – коэффициент неплотности обмотки.

Длиной обмотки однослойной катушки ℓ является расстояние между осевыми линиями двух крайних витков:

$$\ell = \tau(N-1), \qquad (2)$$

где N – число витков катушки.

Наружный диаметр катушки:

$$D = D_0 + 2d_{из}, \qquad (3)$$

где D_0 – диаметр каркаса. Для однослойных катушек с достаточной точностью можно считать $D \approx D_0$.

Величина индуктивности L_0 однослойной катушки без сердечника определяется по формуле:

$$L_0 = K_L N^2 D \cdot 10^{-8}, \text{ Гн}, \qquad (4)$$

где K_L – поправочный коэффициент, значение которого приведено в табл. 1; значение D подставляется в мм.

Таблица 1

ℓ / D	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
K_L	20	17	15,5	13	11,3	10	9,2	7,7
ℓ / D	1	1,5	2	3	4	5	6	10
K_L	6,8	5	4	2,7	2,2	1,8	1,5	1

При введении в катушку *магнитного сердечника* ее индуктивность возрастает в μ_C pas (μ_C – действующая магнитная проницаемость сердечника):

$$L_C = L\mu_C. \qquad (5)$$

Величина μ_C зависит от начальной магнитной проницаемости материала, формы и размера сердечника, размеров катушки и от частоты. Сердечники различают по материалу и по форме. В качестве сердечников могут использоваться как магнитные, так и немагнитные материалы. Наиболее широкое применение находят сердечники круглого и прямоугольного сечения, броневые (с замкнутой или разомкну-

той магнитной цепью) и цилиндрические. Индуктивность катушек с кольцевыми сердечниками и равномерно распределенной однослойной обмоткой определяется по формуле:

$$L_C = \frac{LSN^2 \mu_a 10^{-7}}{D_{\text{ср}}}, \text{ Гн}, \qquad (6)$$

где $D_{\text{ср}}$ - средний диаметр кольца, м; S – сечение кольца, м^2; N – число витков; μ_a – начальная магнитная проницаемость кольца.

Цилиндрические сердечники применяются для увеличения индуктивности катушек и как элемент настройки. Индуктивность катушки с цилиндрическим сердечником и однослойной равномерной обмоткой рассчитывается по формуле:

$$L_C = \frac{\mu_C N^2 D^2 \cdot 100}{(\ell / D) + 0{,}44}, \text{ Гн}, \qquad (7)$$

где ℓ – длина намотки; D - диаметр намотки. Формула (7) справедлива при соотношении $\ell / D \le 5$.

Индуктивность катушки с многослойной намоткой и магнитным сердечником определяется по формуле:

$$L = \frac{\mu_C N^2 D_{cp} \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{3D_{\text{ср}} + 9h + 10t} - \Delta L, \text{ Гн}, \qquad (8)$$

где $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр намотки; h – высота катушки; t – радиальная ширина намотки; ΔL - поправка на шаг намотки.

$$\Delta L = \mu_C \left[\ln\left(d_{\text{из}} / \mathrm{d}_0\right) + 0{,}1\right]. \qquad (9)$$

В катушках индуктивности помимо основного эффекта взаимодействия тока и магнитного поля наблюдаются паразитные эффекты, вследствие которых сопротивление катушки не является чисто реактивным и равным $X_L = \omega L$. Наличие паразитных эффектов ведет к появлению потерь в катушке, оцениваемых сопротивлением потерь r_n, которое определяет добротность катушки индуктивности.

Добротность катушек индуктивности в общем случае определяется формулой:

$$Q = \frac{wL}{r_{\text{п}}}, \qquad (10)$$

где L – индуктивность катушки, Гн; w – частота, рад/с; $r_{\text{п}}$ – общее сопротивление потерь в катушке, Ом.

Потери в катушке создаются в обмотке, каркасе и экране. Рас-

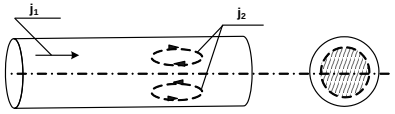


Рис. 1. Иллюстрация скин-эффекта

смотрим некоторые из них.

1. Скин - эффект

При прохождении высокочастотного тока магнитное поле тока J_1 наводит индуктивный ток J_2 ,который на поверхности совпадает с током J_1, а в объеме - противоположно направлен. Поэтому уменьшается действующее сечение проводника (см. рис.1, заштрихованная часть проводника).

2. Эффект близости

Если расстояние между витками большое, то поля соседних витков не влияют друг на друга. При сближении наблюдается процесс вытеснения тока к внутренним областям (рис. 2).

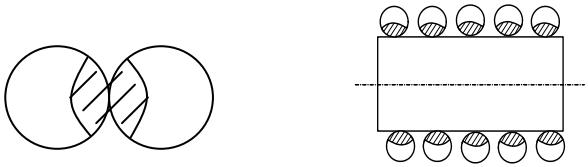
Увеличение диаметра d провода приводит к уменьшению омического (активного) сопротивления катушки, а также обусловленного действием магнитного поля внутри витка, но к росту сопротивления за счет эффекта «близости», обусловленного действием соседних витков. Поэтому существует оптимальное сечение провода при заданных габаритах катушки, значениях её индуктивности и рабочей частоты.

3. Сердечники.

Введение ферромагнитного сердечника позволяет увеличить индуктивность катушки:

$$L_C = L\mu_C. \qquad (11)$$

При той же индуктивности можно уменьшить число витков. Сердечник вносит дополнительные потери, однако при определенных условиях добротность катушки возрастает, если индуктивное сопротивление растет больше, чем потери, вносимые сердечником. В качестве



а б

Рис. 2. Иллюстрация эффекта близости: а - в соседних витках; б - в соседних слоях

сердечников используются ферромагнетики с высоким удельным сопротивлением (малы потери на вихревые токи). Это ферриты и магнитодиэлектрики.

Магнитодиэлектрики - композиционный материал, где наполнителем служит ферромагнитный порошок, а в качестве связующего звена - органический (фенолоформальдегидная смола, эпоксидная смола, полистирол) или неорганический (стёкла) изолятор. За счет высокого

сопротивления связующих веществ сопротивление сердечника очень высокое и потери на вихревые токи минимальны.

Добротность катушки с сердечником:

$$Q = \frac{\mu_C wL}{r_{\text{п}} + r_{\text{с}}}, \qquad (12)$$

где r_c – сопротивление потерь, вносимых сердечником в катушку.

При $r_C \langle\langle r_{\text{п}}$ добротность катушки при введении сердечника возрастает в μ_C раз. При увеличении частоты тока μ_C уменьшается, а потери растут. При некотором значении частоты

$$\frac{\mu_C}{1+(r_C / r_{\text{п}})} < 1 \qquad (13)$$

добротность катушки уменьшается.

Собственная емкость катушек индуктивности (C_0) слагается из суммарных емкостей, существующих между отдельными витками, а также между витками и другими элементами конструкции катушки. Наименьшим значением C_0 обладают однослойные катушки.

Температурная стабильность параметров катушек индуктивности характеризуется температурным коэффициентом индуктивности (ТКИ). Значение ТКИ, как правило, положительное. ТКИ задается следующим соотношением:

$$ТКИ = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T}, \qquad (14)$$

где ΔL – изменение значения индуктивности в диапазоне температур ΔT.

Увеличение индуктивности катушки при росте температуры определяется следующими явлениями:

– увеличиваются длина и диаметр каркаса, что приводит к изменению шага обмотки и диаметра витков;

– увеличиваются длина и диаметр провода обмотки, что приводит к тем же последствиям;

– увеличивается сопротивление провода обмотки, что может снижать добротность катушки;

– увеличиваются потери в материалах каркаса и изменяется его диэлектрическая проницаемость, что может изменять собственную емкость C_0.

Все перечисленные явления приводят к изменениям индуктивности, добротности и собственной емкости катушек, что в большинстве случаев крайне нежелательно. Устранить или скомпенсировать действие этих дестабилизирующих факторов не представляется возможным, однако при рациональном выборе конструкции их действие можно свести к минимуму. Зависимость *Q* от температуры определяется температурным коэффициентом добротности *ТКД*.

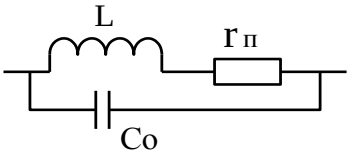


Рис. 3. Эквивалентная схема катушки

$$ТКД = \frac{\Delta Q}{Q \cdot \Delta T} \cdot \quad (15)$$

Практически величина добротности лежит в пределах от 10 до 200. Повышение добротности достигается оптимальным выбором диаметра провода, увеличением размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями. С учетом потерь и собственной емкости катушку индуктивности можно представить в виде эквивалентной схемы, показанной на рис. 3. Сопротивление $r_п$ характеризует общие потери энергии в катушке индуктивности, вызванные различными факторами, а C_0 - собственную емкость катушки индуктивности.

1.2. Катушки индуктивности современной РЭА

Современная РЭА характеризуется повсеместной миниатюризацией и уменьшением массогабаритных характеристик. Широкое применение больших интегральных микросхем (БИС) позволило резко снизить размеры и массу большинства образцов РЭА. Применение поверхностного монтажа элементов и миниатюризация пассивных компонентов электронных устройств потребовали уменьшения размеров катушек индуктивности, соизмеримых по габаритным характеристикам с размерами основных элементов для поверхностного монтажа.

Обычно катушки индуктивности для поверхностного монтажа имеют три конструктивных разновидности: многослойные, толстопленочные и намотанные. На рис. 4 показан внешний вид малогабаритных ЧИП катушек.

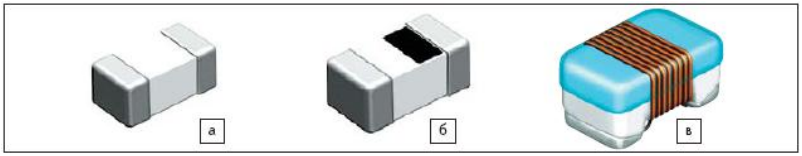


Рис. 4. Внешний вид ЧИП катушек индуктивности для поверхностного монтажа: а - многослойные индуктивности, б - толстопленочные индуктивности, б - намотанные индуктивности

Типичные варианты конструкций катушек индуктивности, например, компании MuRata показаны на рис. 5. Конструктивно катушки выполнены в четырех вариантах, схематично изображенных на рис. 5.

Катушки, представленные на рис. 5,а, содержат в конструкции сердечник из окиси алюминия с вертикальным расположением проволочной обмотки. Катушки такой конструкции являются высокочастотными и предназначены для работы на частотах до 6 ГГц. Эти конструкции отличаются высокой добротностью и большими токами.

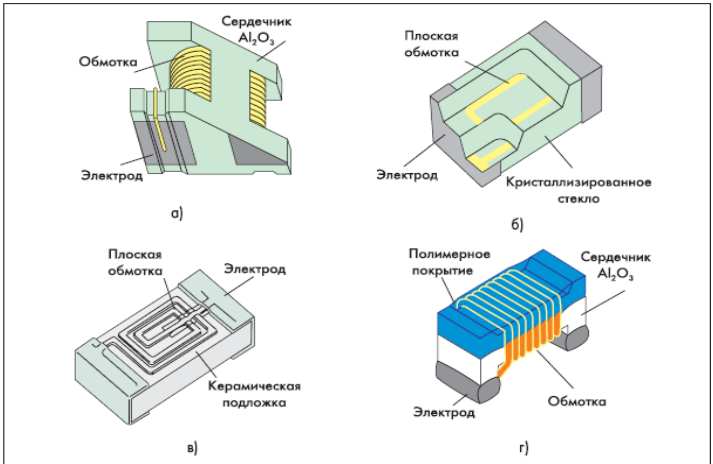


Рис. 5. Конструкции катушек компании MuRata

Катушки, приведенные на рис. 5,б, представляют собой многослойную конструкцию, где в качестве каркаса используют специальное стекло. Обмотка катушки в таком варианте выполнена пленочным проводником, нанесенным несколькими слоями внутри каркаса. Это позволяет получить катушку индуктивности для высокочастотного диапазона с малыми размерами корпуса и достаточно большими тока-

ми. Катушки, представленные на рис. 5,в, изготовлены на стеклянной основе однослойным пленочным проводником. Эти катушки обладают малыми отклонениями от номинала и имеют рекордно малые размеры (0,6х0,3х0,3 мм). Они предназначены для применения в сложной малогабаритной переносной РЭА, например такой, как мобильные телефоны.

Катушки, представленные на рис. 5,г, отличаются от других горизонтальной проволочной обмоткой. При этом каркас катушки выполнен из окиси алюминия, а корпус сверху покрыт полимерным материалом, который защищает и фиксирует обмотку. Эти катушки допускают работу в диапазоне температур -50...+120 ^{0}С. Верхняя рабочая частота ограничена собственным резонансом катушки и для некоторых катушек составляет 11 – 18 ГГц.

Некоторые производители малогабаритных катушек используют в качестве каркаса высококачественную ферритовую керамику. В настоящее время различные производители выпускают широкую номенклатуру катушек индуктивности для поверхностного монтажа. Так, например, в табл. 2 представлены основные характеристики и внешний вид некоторых образцов катушек индуктивности компании SUMIDA

Таблица 2

Максимальные размеры, мм			**Индуктивность, мкГн**	**Внешний вид**
Высота	**Длина**	**Ширина**	**Мин**	
3,5	4,8	4,3	1	
4,8	6,1	5,5	10	
4,0	8,1	7,3	10	
5,5	10,4	9,6	10	
5,9	13,1	12,1	10	

В табл. 3 представлены основные параметры некоторых катушек индуктивности для поверхностного монтажа компании Yageo (ЧСР – частота собственного резонанса катушки).

Таблица 3

Серия	Индуктивность, L	Точность, %	Добротность, Q	ЧСР, мГц	Сопротивление, Ом	Сила тока, мА
CL	0,047 – 18мкГн	10,20	25 –45	18 – 320	0,15 –0,75	5 –300
NL	0,1 – 1000мкГн	10,20	28 –50	2,5 – 700	0,44 –50	30 – 450
CLH	1,0 –470 нГ	5,10	8	1250 – 6000	0,1 –2,0	200,300
LCN	1,6 –270 нГ	5,10	16 –40	900 – 12500	0,03 –2,8	170 – 700

В табл. 4 представлены основные параметры некоторых СВЧ катушек индуктивности компании MuRata, выполненные по конструктивному варианту, показанному на рис. 5, а.

Таблица 4

Внешний вид	Индуктивность, нГн	Добротность	ЧСР, мГц	Сопротивление, Ом
	39 ± 5%	80	1700	0.09
	47 ± 5%	65	1600	0,23
	68 ± 5%	65	1200	0,23
	100 ± 5%	60	900	0,38
	150 ± 5%	35	350	0,26
	220 ± 5%	45	500	0,7

1.3. Метод измерения параметров катушек индуктивности

В лабораторной работе измерение основных параметров катушек индуктивности производится хорошо известным резонансным методом с применением прибора измерителя добротности, или Q-метра. Как следует из его названия, он может применяться для измерения добротности и обычно применяется при измерении добротности катушек индуктивности. Упрощенная схема Q-метра показана на рис. 6.

В приборе используется явление резонанса в последовательном

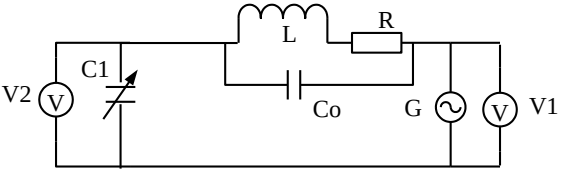


Рис. 6. Принципиальная схема измерителя добротности (Q-метра)

колебательном контуре. Этот контур сформирован исследуемой катушкой индуктивности L и образцовым (обычно воздушным) переменным конденсатором C1. На контур подается напряжение с высокочастотного генератора G, частоту f которого можно изменять в широких пределах. На определенной частоте f_0 сигнала генератора G, изменяя емкость конденсатора C1, контур настраивается в резонанс, который фиксируется по максимальному значению напряжения на вольтметре V2. Сопротивление R характеризует общие потери во всех элементах колебательного контура. В момент резонанса добротность контура Q определяется как отношение показаний вольтметров V2 и V1, т.е. Q = V2/V1. Если поддерживать напряжение генератора G на известном уровне (например, 1 В), то шкалу вольтметра V2 можно проградуировать прямо в значениях добротности Q. При предположении, что конденсатор C1 практически не имеет потерь, добротность в контуре при резонансе будет определять параметр Q катушки индуктивности.

Рассмотрим основные соотношения в системе катушка индуктивности со своей эквивалентной схемой (рис. 3) и последовательно включенным образцовым конденсатором C1. В этой системе возможны два вида резонанса - последовательный на частоте Fпос, определяемой соотношением

$$F_{ПОС} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot (C_1 + C_0)}}\ , \qquad (16)$$

и параллельный на частоте Fпар, определяемой соотношением

$$F_{ПАР} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_0}}\ . \qquad (17)$$

Параллельный резонанс – это собственный резонанс катушки индуктивности, обусловленный собственной емкостью C_0. На частоте собственного резонанса добротность катушки индуктивности максимальна. После частоты собственного резонанса добротность катушки индуктивности резко падает из за влияния собственной емкости катушки, поэтому катушки индуктивности практически не используют

на частотах выше частоты собственного резонанса.

Последовательный резонанс в контуре Q-метра происходит на более низкой частоте, чем параллельный. Добротность всего контура при этом практически соответствует добротности исследуемой катушки, если не учитывать потери в конденсаторе C_1. При $C_1 >> C_0$, как обычно и бывает, можно по формуле (16) определить индуктивность исследуемой катушки.

Используя соотношение (17) можно определить собственную емкость катушки индуктивности, построив график зависимости добротности от частоты и определить частоту максимального значения добротности катушки.

2. Выполнение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется путем моделирования процесса измерения резонансным методом параметров катушек индуктивности с использованием прибора – измерителя добротности (Q-метра). Для этого используется специальная программа, выполняемая на персональном компьютере (ПК). В эту программу заложены модели изменения характеристик ряда катушек индуктивности, в зависимости от изменения параметров окружающей среды и внешних воздействий, а также используется модель прибора Q-метр. При подготовке к работе необходимо изучить методические указания к лабораторной работе.

Для начала работы необходимо запустить файл «Лабор_индукт» на Рабочем столе ПК, после чего появится окно, изображенное на рис.7,а. Оно отображает название выполняемой лабораторной работы и кнопки управления, назначение которых интуитивно понятно. Управление программой осуществляется обычным способом, приме-



а б

Рис. 7. Вид рабочих окон программы: а - вид окна начала работы с программой; б - вид окна выбора катушки индуктивности для исследования

няемым повсеместно в операционной системе Windows. После щелчка по кнопке «Начинаем» появится окно выбора типа катушки индуктивности, как показано на рис. 7,б.

Выбор катушки индуктивности осуществляется щелчком по соответствующей закладке с названием. На закладке представлены описание и некоторые характеристики выбранной катушки индуктивности.

3. Проведение измерений

После щелчка по кнопке «К измерениям» открывается окно измерения добротности катушки индуктивности прибором Q-метр, показанное на рис. 8. В этом окне отображаются прибор - измеритель добротности и измерительная камера с образцом катушки. Здесь же отображается схема подключения исследуемой катушки индуктивности.

Необходимо включить прибор щелчком по тумблеру «Сеть». По



Рис. 8. Окно управления прибором Q-метр

умолчанию в измерительной камере установлена температура 20 ^{0}C. Измерение добротности катушки необходимо производить в следующей последовательности.

1. Установить необходимую частоту генератора, используя кнопки выбора диапазона и движок на шкале плавного изменения частоты.
2. Ручкой под стрелочным индикатором «Уровень» установить стрелку на шкале прибора на «1».
3. Щелкнуть по кнопке «Изменить температуру» и в окно «Задат-

чик температуры» ввести с клавиатуры нужную температуру в измерительной камере и щелкнуть по кнопке «Пуск». Дождаться момента установления заданной температуры в измерительной камере и перейти к измерениям.

4. Изменяя значение емкости переменного конденсатора по шкалам «Емкость грубо», «Емкость средне» и «Емкость плавно», по стрелочному прибору «Добротность» добиться резонанса в колебательном контуре по максимальному отклонению стрелки прибора. Записать в черновике значение температуры, частоты измерительного сигнала, значения добротности Q_1 с цифрового индикатора внизу стрелочного прибора и значение емкости переменного конденсатора C_1. Емкость конденсатора в пикофарадах определяется суммированием значений цифровых индикаторов под соответствующими шкалами изменения емкости переменного конденсатора.

5. Изменить частоту сигнала и произвести новые измерения как в п. 4.

6. При необходимости изменить температуру в камере как в п. 3.

7. При необходимости выбрать другую катушку, используя кнопку «Заменить катушку».

4. Последовательность выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на исследование конкретной катушки индуктивности в указанном диапазоне температур и частот.

2. Для каждого значения температуры провести измерения Q_1, C_1 на фиксированной частоте и полученные значения занести в таблицу, пример которой показан ниже. Рекомендуется начать с температуры в измерительной камере 20 ^{0}C.

Темпер.	Частота	Q_1	C_1	L	$r_П$	μ_C

3. Рассчитать значения L для исследуемых катушек, используя формулу (16), и построить графики зависимости добротности и индуктивности от частоты при температуре 20 ^{0}C.

4. Рассчитать значение сопротивления потерь $r_П$ катушки, используя формулу (10), и построить график зависимости $r_П$.от частоты.

5. На частоте, указанной преподавателем, определить среднее значение ТКИ и ТКД по формулам (14) и (15).

6. В случае исследования катушки с магнитным сердечником дополнительно рассчитать значение μ_C , используя формулу (5), и занести данные в дополнительный столбец таблицы. Построить зависимость μ_C от температуры при фиксированной частоте.

5. Содержание отчета

1. Отчет выполняется каждым студентом индивидуально.
2. Отчет должен содержать:
   - название работы;
   - цель работы;
   - основные теоретические сведения;
   - конструктивные особенности исследуемых катушек;
   - схемы измерения;
   - полученные расчетные данные;
   - необходимые графики, требуемые по заданию.

6. Вопросы для подготовки к защите лабораторной работы

1. Назначение катушек индуктивности при использовании их в РЭА.
2. От чего зависит величина индуктивности катушки?
3. Назовите основные классические конструкции катушек индуктивности.
4. Перечислите основные параметры катушек индуктивности.
5. Что такое собственная емкость катушки индуктивности и от чего она появляется?
6. Какие способы уменьшения собственной емкости катушки вы знаете?
7. Нарисуйте эквивалентную схему катушки индуктивности и объясните назначение ее элементов.
8. Зачем в катушку индуктивности помещают магнитный сердечник и на какие параметры катушки индуктивности он влияет?
9. Что такое ТКИ и как он определяется?
10. Что такое ТКД и как он определяется?
11. Что такое собственный резонанс катушки индуктивности?
12. Что такое собственное сопротивление катушки и из чего оно состоит?
13. Как каркас катушки влияет на ее параметры?
14. Какие конструкции современных катушек индуктивности используют для поверхностного монтажа?
15. Что такое ЧИП катушки и как конструктивно они выполнены?

Библиографический список

1. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005.- 350 с.: ил.

2. Пасынков В. В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1986. - С. 325-359.

3. Электрорадиоматериалы / под ред. Б. М. Тареева. - М.: Высшая школа, 1978. - С. 122 – 130.

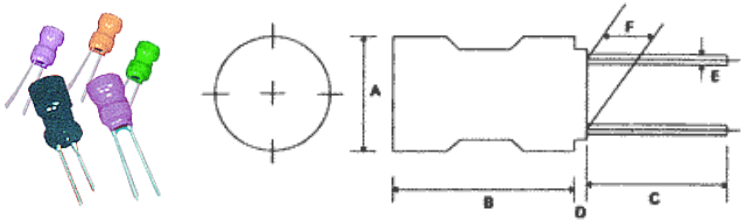
4. Справочник по схемотехнике для радиолюбителя /под ред. В.П.Боровского.- Киев: Техника, 1987.- 431 с.

5. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т /под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 1. изд. 2-е, перераб.- М.: Энергия, 1974. - 584 с., ил.

6. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 3. изд. 2-е, перераб.- М.: Энергия, 1974. - 896 с., ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Параметры и характеристики некоторых малогабаритных катушек индуктивности отечественных производителей



Индуктивность РК0406

Ана-

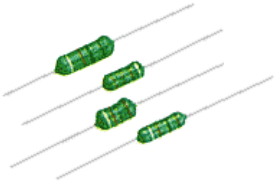
A (макс)	**B (макс)**	**C (мин)**	**D (макс)**	**E (±0.05)**	**F (макс)**
5.0	8.0	15.0	3.0	0.55	2.0±0.5

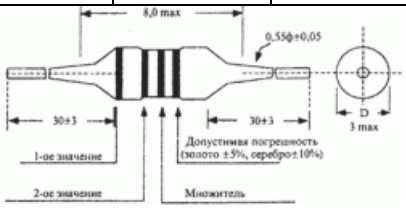
лог

КИГ

Тип	**Индуктивность, мкГн**	**Добротность, Q, мин**	**Резонансная частота, МГц, мин**	**Активное сопротивление, Ом, макс**
РК0406-1R0M-S0	1.0	130	120	0.035
РК0406-4R7M-S0	4,7	100	50	0,140
РК0406-6R8M-	6,8	100	30	0,15

S0				
PK0406-100M-S0	10	80	20	0,23
PK0406-220K-S0	22	80	10	0,45





Индуктивность EC24
Аналоги ДПМ, ДМ

Система обозначений

EC	24-	330	K-	T5	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

(1) Тип
(2) Форма
(3) Индуктивность
(4) Точность
(5) Вид формовки
(6) "A" -- упаковка в ленте

Цвет	Значение	Множитель	Точность, %
Черный	0	1	-
Коричневый	1	10	-
Красный	2	100	-
Оранжевый	3	1000	-
Желтый	4	-	-
Зеленый	5	-	-
Голубой	6	-	-
Фиолетовый	7	-	-
Серый	8	-	-
Белый	9	-	-
Черный	-	-	±20
Серебряный	-	0.01	±10
Золотой	-	0.1	±5

Тип	Индуктивность, мкГн	Точность, %	Добротность, Q, мин	Тестовая частота, МГц	Резонансная частота, МГц, мин	Активное сопротивление, макс, Ом
EC24-R027M-CC	0.027	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	500	0.02
EC24-R033M-CC	0.033	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	490	0.02
EC24-R039M-CC	0.039	M(±20%) [K(±10%)]	40	50.0	480	0.02

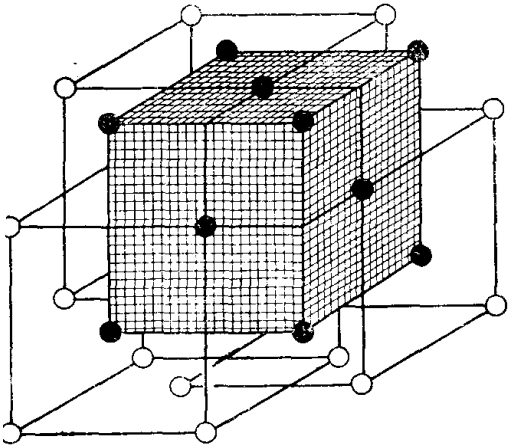
Тип	Индук-тивность, мкГн	Точность, %	Доброт-ность, Q, мин	Тестовая частота, МГц	Резонансная частота, МГц, мин	Активное со-противление, макс, Ом
EC24-R33K	0.33	M(±20%) [K(±10%)]	40	25.2	350	0.16
EC24-R39K	0.39	M(±20%) [K(±10%)]	40	25.2	320	0.18
EC24-R47K	0.47	M(±20%) [K(±10%)]	40	25.2	300	0.26
EC24-R56K	0.56	M(±20%) [K(±10%)]	40	25.2	280	0.38
EC24-R68K	0.68	M(±20%) [K(±10%)]	40	25.2	250	0.42
EC24-R82K	0.82	M(±20%) [K(±10%)]	40	25.2	200	0.55
EC24-150K	15	K(±10%) [J(±5%)]	50	2.52	16	0.88
EC24-180K	18	K(±10%) [J(±5%)]	50	2.52	15	1.00
EC24-220K	22	K(±10%) [J(±5%)]	60	2.52	13	1.20
EC24-270K	27	K(±10%) [J(±5%)]	60	2.52	11	1.35
EC24-330K	33	K(±10%) [J(±5%)]	50	2.52	10	1.50
EC24-390K	39	K(±10%) [J(±5%)]	50	2.52	9.5	1.70
EC24-470K	47	K(±10%) [J(±5%)]	50	2.52	8.5	2.30

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.П.ВИХРОВ, Т.А.ХОЛОМИНА

МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ: СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ



Рязань 2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Рязанский государственный радиотехнический университет

С.П.ВИХРОВ, Т.А.ХОЛОМИНА

МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ: СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

Учебное пособие

Рязань 2013

УДК 621.38+615.83

Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб. пособие/ С.П. Вихров, Т.А. Холомина; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2013. 96 с.

Рассмотрены общие сведения о строении и свойствах металлов и сплавов, их классификация, особенности процессов кристаллизации. Проведен анализ основных типов диаграмм состояния сплавов. Особое внимание уделено анализу диаграммы состояния системы железо - углерод, а также влияния термической и химико-термической обработки на свойства сталей. Проанализированы свойства, классификация и применение сталей, чугунов, а также цветных металлов и сплавов в технике.

Предназначено для самостоятельной работы студентов, обучающихся по направлению 210302.62 очной и заочной форм обучения, а также направлениям 140400.62, 140600.62, 201000.62, 200100.62, 210100.62, 210200.62, 200400.62,080500.62 дневного отделения.

Табл. 6. Ил. 30. Библиогр.:10 назв.

Металлы, сплавы, диаграмма состояния сплава, маркировка, практическое применение

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра ИИБМТ (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В.И. Жулев)

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Интенсивное развитие науки и техники невозможно без решения проблемы совершенствования качества и экономичности материалов – вещественной основы любой продукции. Новые технические материалы появляются в результате предварительного глубокого изучения экономических, функциональных и потребительских свойств различных веществ, а также технологии их получения и обработки.

Металлы и сплавы относятся к наиболее широко применяемым в технике материалам. Практическое использование материалов в приборостроении, электронной технике и медицине определяется их свойствами, которые зависят от состава, структуры и воздействия внешних факторов.

В учебном пособии рассмотрены классификация твердых проводниковых материалов, особенности их строения, механических и электрофизических свойств. Приведены основные типы диаграмм состояния сплавов; проанализированы структурные превращения в системе железо – углерод, происходящие при изменении температуры и состава. Рассмотрены особенности влияния термической и химико-термической обработки на свойства сталей, их классификация и применение в технике. Проанализированы классификация, особенности строения и свойств, а также маркировка и применение в технике основных групп чугунов.

Значительное внимание уделено рассмотрению свойств и особенностей применения в различных отраслях промышленности цветных металлов и сплавов на основе меди, алюминия и титана.

Целью учебного пособия является краткое и доступное по форме изложение учебного материала, предусмотренного действующими образовательными стандартами. Учебное пособие рекомендуется для самостоятельной работы студентов, обучающихся по направлению 210302.62 очной и заочной форм обучения, а также направлениям 140400.62, 140600.62, 201000.62, 200100.62, 210100.62, 210200.62, 200400.62,080500.62 дневного отделения.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВОЙСТВАХ И СТРОЕНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

1.1. Классификация металлов и сплавов

К металлам относятся вещества, обладающие высокими теплопроводностью и электрической проводимостью, ковкостью, блеском и другими характерными свойствами, которые обусловлены наличием в их кристаллической решетке большого числа свободных электронов. Единственным объективным критерием, позволяющим отнести материал к металлам, считается наличие электропроводности при Т = 0 К и положительного температурного коэффициента удельного сопротивления. Указанными выше свойствами обладают свыше 80 простых веществ (элементов) и множество металлических сплавов.

Все металлы и сплавы делят на ***черные*** (к ним относят железо и сплавы на его основе; на их долю приходится около 95 % производимой в мире металлопродукции) и ***цветные*** (все остальные металлы и сплавы). По физическим и химическим свойствам и характеру залегания в земной коре цветные металлы делят на следующие группы: *легкие* – алюминий, магний, титан, бериллий, литий, натрий, калий, стронций, барий и др.; *тяжелые* – медь, никель, кобальт, свинец, олово, цинк, кадмий, сурьма, висмут, ртуть и др.; *тугоплавкие* – вольфрам, молибден, ниобий, тантал, ванадий, хром, цирконий и др.; *благородные* – золото, серебро, платина и платиноиды (рутений, родий, палладий, осмий, иридий); *рассеянные* – галлий, индий, таллий; *редкоземельные* – скандий, иттрий, лантан и все лантаноиды; *радиоактивные* – технеций, франций, радий, полоний, актиний, торий, уран и трансурановые элементы.

Приведенная классификация условна: многие металлы могут быть отнесены одновременно к разным группам. Например, легкий металл титан является также тугоплавким; тугоплавкий металл рений – типичный рассеянный элемент и т.д.

Металлы играют огромную роль в современной технике. Обычно металлы применяют не в чистом виде, а в виде сплавов, количество которых превышает 10 тысяч наименований.

Металлы получают из руд, а также путем вторичной переработки материалов. Рудами называют горные породы, которые технически возможно и экономически целесообразно перерабатывать для извлечения содержащихся в них металлов. К основным процессам

металлургического процесса относятся: обработка руд с целью их подготовки к извлечению металлов (дробление, обогащение, окускование и пр.); извлечение металлов из руд и других материалов; очистка металлов от нежелательных примесей; производство металлов и сплавов; термическая, химико-термическая и термомеханическая обработка; формообразование давлением и литьем; покрытие в декоративных или защитных целях поверхности изделий из металла слоями другого металла.

К основным свойствам металлов и сплавов относятся физические (в том числе механические), химические, технологические и функциональные. К физическим свойствам относятся: температура плавления, цвет, плотность, магнитная восприимчивость, электропроводность, теплоемкость и др. Особую группу составляют механические свойства: прочность, пластичность, твердость, ударная вязкость и др.

Химические свойства металлов определяются способностью их атомов легко отдавать валентные электроны и переходить в состояние положительно заряженных ионов. Указанное определяет особенности химического взаимодействия металлов и сплавов с агрессивными средами.

К технологическим свойствам металлов и сплавов относится их способность к формоизменению (ковкость, свариваемость и т.д.). Важное значение имеет жидкотекучесть – свойство расплавленного металла заполнять и точно воспроизводить литейную форму.

Функциональные или эксплуатационные свойства включают в себя коррозионную стойкость, хладостойкость, жаропрочность, жаростойкость, антифрикционность и другие характеристики материалов, определяемые условиями их работы.

1.2. Механические свойства

Для металлов и сплавов, особенно конструкционных, важное значение имеют механические свойства, основными из которых являются прочность, пластичность, твердость и ударная вязкость [1]. Механические свойства материала проявляются в виде ответной реакции на нагружение и изменение формы.

Деформация – это изменение формы и размеров твердого тела под действием внешних сил или в результате физических процессов, возникающих при фазовых превращениях, усадке и т.п. Деформация может быть *упругая* (исчезает после снятия нагрузки) и *пластическая*

(сохраняется после снятия нагрузки). При возрастающей нагрузке упругая деформация, как правило, переходит в пластическую, и далее образец разрушается. Количественной мерой деформации является относительное увеличение или уменьшение размеров.

Кроме указанных, для неметаллических материалов должны рассматриваться такие механические свойства, как упругость, текучесть и вязкость [1,2].

Прочность – это способность материала сопротивляться воздействию внешних сил, не разрушаясь. Прочность материалов характеризуется пределами прочности при растяжении (σ_p, МПа), сжатии (σ_c, МПа), изгибе и кручении. Прочность оценивается для большинства материалов величиной предела прочности:

$$\sigma_p = \frac{P}{F} \cdot \qquad (1.1)$$

В этой формуле P – сила в ньютонах (Н), при которой образец материала разрушается; F – площадь поперечного сечения испытуемого стандартного образца материала в квадратных метрах ($м^2$). Таким образом, значение σ_p определяется в Па или МПа.

Для некоторых материалов, например для чугуна, стекла, имеющих сравнительно низкую прочность на растяжение, применяют показатель прочности на сжатие, измеряемый аналогичными показателями. Так, например, прочность пластмасс и стекла на сжатие в 15 – 20 раз больше, чем на растяжение и сопоставима с прочностью на растяжение стали (до 100 МПа).

Твердость – это способность материалов сопротивляться проникновению или вдавливанию в них какого-либо тела. Этот показатель имеет особое значение для металлов. Существуют обоснованные методы определения твердости для металлов: метод Бринелля (вдавливанием стального шарика) и метод Роквелла (вдавливанием конусообразной алмазной пирамиды). Число твердости определяют по специальным таблицам и обозначают соответственно HB и HRC. По Бринеллю определяют твердость сырых (термически не обработанных) металлов, по Роквеллу – твердых закаленных изделий, например режущих инструментов. Существуют и другие методы испытания на твердость: по Викерсу, Польди и на микротвердость, но они менее распространены, чем первые два.

Упругость – это способность материала изменять свою форму под действием внешних сил и восстанавливать ее после прекращения

действия этих сил. Высокой упругостью, например, должна обладать сталь для различных пружинящих инструментов (пинцеты, кровоостанавливающие зажимы и др.). Упругость – свойство, обратное пластичности.

Отношение нагрузки, при которой у образца появляются остаточные удлинения, к площади его первоначального поперечного сечения называется ***пределом упругости***. Таким образом, предел упругости σ_y измеряется так же, как и предел прочности (в МПа). Сталь имеет предел упругости около 30 МПа, а свинец, почти не обладающий упругостью, всего 0,25 МПа.

Изменение деформации во времени при постоянной нагрузке называется **ползучестью**. Если после снятия нагрузки по истечении некоторого времени деформация исчезает полностью, то такое последействие называется упругим.

При воздействии циклических нагрузок на материалы и конструкции разрушение может наступить при напряжениях, меньших предела упругости.

Процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящий к образованию трещин и разрушению, называют **усталостью**. При циклически изменяющихся напряжениях прочность материала характеризуют пределом выносливости – наибольшим напряжением, при котором образец не разрушается при любом большом числе циклов. Величина предела выносливости зависит как от свойств материала, так и от характера изменения напряжений во времени, от состояния поверхности элемента конструкции и наличия в ней концентраторов напряжений.

Природа усталостного разрушения обусловлена особенностями строения материала. При этом структурные неоднородности и местные неравномерности в распределении внутренних сил являются определяющими. С ростом внешних сил число очагов пластической деформации и микротрещин возрастает. В предельном состоянии этот процесс приобретает лавинообразный характер. Усталостное разрушение представляет собой процесс, состоящий из двух фаз. Первая фаза – образование заметной микротрещины, вторая – развитие микротрещины и разрушение образца.

Жесткость – это способность элемента конструкции сопротивляться образованию деформаций. **Устойчивость** – способность конструкции противостоять воздействиям, стремящимся вывести ее из исходного состояния равновесия.

Вязкость – это способность материалов не разрушаться при действии на них ударных нагрузок. Вязкость характеризует скорость процесса деформации материала под действием растягивающей силы. Вязкость также определяется как свойство твердых тел необратимо превращать тепловую энергию, сообщенную телу в процессе его деформации, в механическую.

Ударная вязкость – это способность материала сопротивляться динамическим нагрузкам, т.е. механическая характеристика, оценивающая работу разрушения предварительно надрезанного образца на маятниковом копре. Ударная вязкость определяется как отношение затраченной на излом образца работы W (МДж) к площади его поперечного сечения F ($м^2$) в месте надреза.

Для испытания изготавливают специальные стандартные образцы, имеющие форму квадратных брусочков с надрезом. Испытывают образец на маятниковых копрах. Свободно падающий маятник копра ударяет по образцу со стороны, противоположной надрезу. При этом фиксируется работа, затраченная на излом.

Хотя ударная вязкость – условная характеристика, сильно зависящая от размеров образца, формы и состояния поверхности надреза, и не может быть введена в расчет на прочность, ее практическое значение очень велико, так как по температурной зависимости ударной вязкости оценивается склонность материала к хрупкому разрушению – хладноломкости. Высокой ударной вязкостью должны обладать, например, медицинские долота и молотки, чтобы они не разрушались при ударе.

Циклическая вязкость – это способность материалов поглощать механическую энергию при повторно-переменных нагрузках. Материалы с высокой циклической вязкостью быстро гасят вибрации, которые часто являются причиной преждевременного разрушения.

Вязкость жидкостей и газов – свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

Динамическая вязкость – количественная характеристика сопротивления жидкости или газа смещению одного слоя относительно другого. Единица измерения динамической вязкости – Пуаз (Па·с).

Кинематическая вязкость – отношение динамической вязкости к плотности жидкости. Единица измерения кинематической вязкости $мм^2/с$.

Пластичность – это способность материалов деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять измененную форму после прекращения действия этих сил.

Свинец, например, является одним из наиболее пластичных металлов. Мерой пластичности может служить относительное удлинение перед разрывом (Θ, %). Эта величина измеряется в процентах от первоначальной длины образца при испытании на растяжение. При нагревании пластичность металлов, стекла, ряда пластмасс возрастает, а прочность уменьшается. Эти свойства материалов используют для придания им нужной формы методами ковки, прессования, штамповки, прокатки.

Хрупкость – это способность материалов под действием внешних сил не изменять или почти не изменять своей формы, но быстро разрушаться. Хрупкость – свойство, противоположное пластичности. Хрупкими являются стекло, чугун, некоторые пластмассы, например полистирол. Для хрупких материалов величина удлинения перед разрывом не превышает 2 – 5 %, а иногда измеряется долями процента. Большое влияние на проявление свойств пластичности и хрупкости оказывает время пребывания под нагрузкой. При быстром нагружении более резко проявляется свойство хрупкости, а при длительном воздействии нагрузки – свойство пластичности.

Ряд неметаллических материалов таких, как резина, пластмассы, имеют склонность к старению, т.е. к изменению (снижению) прочности с течением времени под влиянием различных факторов внешней среды. Так, под воздействием солнечной радиации, озона, изменения температуры ускоряется процесс ухудшения механических свойств резины и ряда пластмасс. Например, пластмассовые шприцы многоразового использования по мере увеличения количества циклов температурной стерилизации постепенно теряют прозрачность, затем материал растрескивается и расслаивается. Старение металлов и сплавов происходит в течение гораздо более длительного времени и обусловлено особенностями взаимодействия с окружающей средой.

Несомненно, механические свойства материалов важны при использовании их в любой конструкции. Особое значение имеют механические свойства материалов-имплантатов для внутритканевого применения при эндопротезировании.

1.3. Химические свойства

Химические свойства определяются химическим составом материала. Показатели содержания основных веществ и примесей для

большинства материалов широко используются при оценке их свойств. Знание химического состава дает возможность судить о ряде свойств материала и его устойчивости к различным воздействиям. Так, например, определенный процент содержания хрома в стали делает ее нержавеющей; повышенное содержание серы и фосфора превращает сталь в хрупкий, непригодный к применению материал.

Химостойкость – это стойкость материала к взаимодействию с различными химически активными веществами. Для металлов большое значение имеет коррозионная стойкость. При определении химостойкости образцы материалов на длительное время помещают в условия, близкие к тем, в которых они должны реально выполнять свои функции, или еще более суровые с точки зрения концентрации, химической активности среды, температуры и т.д. После этого определяют изменение внешнего вида образцов, их массы, а в определенных случаях – характеристики находившегося в контакте с материалом объекта. Одним из наиболее важных требований к материалам, применяемым в медицине, является их биологическая инертность, т.е. полное отсутствие химических реакций с тканями живого организма. Особое значение для микро- и наноэлектроники имеют чистота и тщательно контролируемый химический состав используемых материалов.

1.4. Электро– и теплопроводность металлов и сплавов

Электропроводность металлов и сплавов

Классическая электронная теория представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из катионов металлов в узлах кристаллической решетки, внутри которой находится электронный газ коллективизированных свободных валентных электронов. На ранних этапах развития физики к электронному газу применялись представления и законы обычных газов, молекулы которых взаимодействуют между собой по закону упругих шаров. Это привело к выводу законов Ома и Джоуля – Ленца, что позволило описать и объяснить ранее обнаруженные экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах.

Однако исчерпывающее объяснение явлений электропроводности металлов оказалось возможным на основе квантовой механики, в основе которой лежит квантово-волновой дуализм микрочастиц. В соответствии с квантово-механическими представлениями причиной

наличия электрического сопротивления твердых тел является не столкновение свободных электронов с атомами решетки (как в классической теории Друде), а рассеяние их на дефектах решетки.

Идеально правильная, бездефектная неподвижная решетка имеет строго периодическое распределение потенциала и не способна рассеивать носители заряда, поэтому она должна обладать нулевым электрическим сопротивлением. Наличие структурных дефектов приводит к нарушению периодичности потенциала, рассеянию носителей и к электрическому сопротивлению кристалла.

В общем случае, когда в материале присутствуют носители заряда разных видов, удельная электрическая проводимость σ представляет собой сумму отдельных составляющих электропроводности:

$$\sigma = \sum \left| q_i \right| n_i \mu_i, \qquad (1.2)$$

где $\left| qi \right|$ - заряд носителя i-го типа; n- концентрация; μ - подвижность, причем суммирование распространяется на все виды носителей заряда.

Подвижность и длина свободного пробега электронов в твердом теле (среднее расстояние между актами рассеяния) зависят от структуры материала. Чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного электрического сопротивления ρ. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ. С позиций квантовой механики рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона; нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн де Бройля. В металлическом проводнике, где длина волны электрона порядка 5 Å, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов и длину свободного пробега, и, следовательно, приводят к росту ρ.

Так как в металлах концентрация электронного газа практически не зависит от температуры (*T*), то зависимость удельного сопротивления ρ [и обратной величины удельной электропроводности σ, описываемой соотношением (1.2)] от температуры полностью определяется температурной зависимостью подвижности (μ) и пропорциональной ей длиной свободного пробега электронов (λ).

При низкой температуре, когда тепловые колебания узлов кристаллической решетки несущественны, удельное сопротивление и проводимость металла или сплава полностью определяются

рассеянием на дефектах кристаллической решетки (и соответствующей величиной подвижности), практически не зависят от температуры (рис. 1.1).

Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшается среднестатистическая длина свободного пробега λ, уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 1.1).

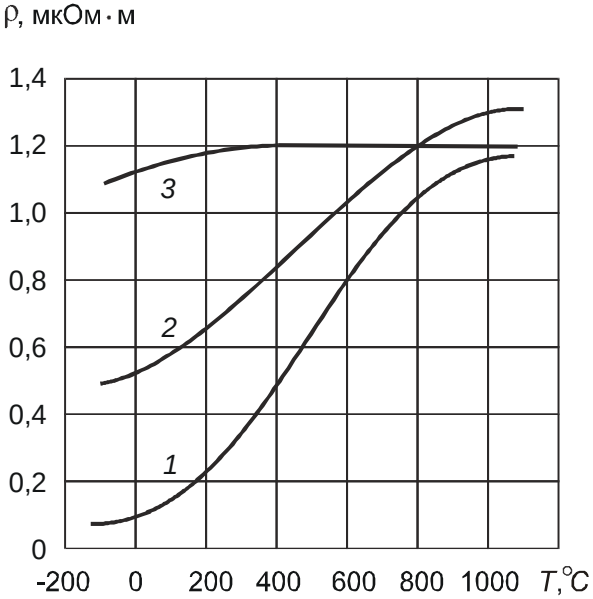


Рис. 1.1. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры: *1* – железо; *2* – электротехническая сталь с содержанием 4 % Si; *3* – сплав Fe-Ni-Cr

Как указывалось, примеси и нарушения правильной структуры металлов ведут к увеличению их электрического удельного сопротивления. Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, когда они образуют твердый раствор, т.е. создают при отвердевании совместную кристаллизацию и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого.

Зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих твердый раствор, от процентного содержания каждого из них представлена на рис.1.2 (кривая а). Кривая имеет максимум, соответствующий некоторому соотношению содержания компонентов в сплаве; при уменьшении содержания каждого из них ρ падает, приближаясь к соответствующим значениям ρ чистых металлов.

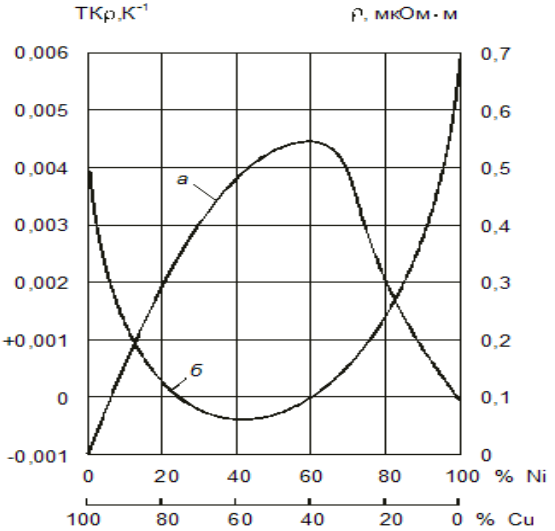


Рис. 1.2. Зависимость ρ (*а*) и ТК ρ (*б*) сплавов системы Cu-Ni от состава (в процентах по массе)

Обычно наблюдается определенная закономерность и в изменении TKρ (ТК – температурный коэффициент): относительно высокими значениями TKρ обладают чистые металлы, а у сплавов TKρ меньше и даже может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения (рис. 1.2, кривая б). Это объясняется тем, что у сплавов изменение ρ вызывается не только изменением подвижности носителей заряда, но в некоторых случаях и возрастанием концентрации носителей при повышении температуры.

Теплопроводность

Тепло через металл передается в основном теми же свободными электронами, которые определяют и электропроводность металлов; количество их в единице объема металла весьма велико по сравнению с диэлектриками. Поэтому, как правило, коэффициент

теплопроводности η металлов много больше, чем у диэлектриков. Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше удельная электрическая проводимость σ металла, тем больше его коэффициент теплопроводности η. При повышении температуры, когда подвижность электронов в металле и соответственно его удельная электрическая проводимость σ уменьшается, отношение коэффициента теплопроводности металла к его удельной электрической проводимости η/σ должно возрастать. Математически это выражается законом Видемана – Франца:

$$\eta/\sigma = L_0 T, \qquad (1.3)$$

где T – абсолютная температура, К; L_0 – число Лоренца, равное

$$L_0 = \frac{\pi^2}{3}\frac{k^2}{e^2}. \qquad (1.4)$$

Подстановка в (1.4) значений постоянной Больцмана $k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К и заряда электрона $e = -1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл дает $L_0 = 2{,}45\cdot10^{-8}$ В^2/К^2.

Закон Видемана – Франца, утверждающий, что при постоянной температуре отношение теплопроводности к удельной электрической проводимости постоянно, для большинства металлов хорошо подтверждается при температурах, близких к нормальной или несколько повышенных.

Проверим справедливость этого закона для меди при нормальной температуре. Подставляя в формулу (1.3) параметры меди: $\sigma = 57\cdot10^6$ См/м и η= 390 Вт/(м·К), получаем (при T = 293 К) $L_0 = 2{,}54\cdot10^{-8}$ В^2/К^2, что весьма близко к теоретическому значению. При нормальной температуре для алюминия $L_0 = 2{,}1\cdot10^{-8}$, для свинца и олова $2{,}5\cdot10^{-8}$, для железа $2{,}9\cdot10^{-8}$ В^2/К^2. Однако в области низких температур коэффициент при T в уравнении (1.3) уже не остается неизменным: так, для меди при охлаждении он проходит через минимум, а при приближении к абсолютному нулю вновь близок к теоретическому значению L_0.

1.5. Магнитные свойства

Все вещества в природе являются магнетиками, т.е. обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. Магнитные свойства

вещества зависят от магнитных свойств изолированных элементарных частиц, структуры атомов и молекул, а также их групп.

Магнитные свойства атома в основном определяются магнитными свойствами электронов. Магнетизм других частиц относительно мал. Так, магнитный момент атомного ядра приблизительно в тысячу раз меньше магнитного момента электронной оболочки атома. Магнитный момент электрона возникает вследствие движения электрона по орбите (орбитальный момент) и наличия у него спина (спиновый момент). Магнитный момент многоэлектронного атома представляет собой сумму магнитных моментов всех электронов, включая как орбитальные моменты, так и спиновые. Каждый электрон вносит в полный магнитный момент атома независимый векторный вклад.

В соответствии с современными представлениями о магнетизме различают следующие основные типы магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм (нескомпенсированный антиферромагнетизм). Вещества, в которых проявляются эти состояния, соответственно называют: ***диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.*** Схематическое расположение моментов электронов атомов для разных по магнитным свойствам веществ иллюстрируется рис. 1.3.

К основным магнитным величинам относятся: намагниченность M, А/м; $M = \kappa \vec{H}$, где κ – магнитная восприимчивость; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м. Магнитная индукция B, Тл (тесла) характеризует суммарное магнитное поле внутри материала:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1+\kappa)\vec{H} = \mu_0\mu\vec{H} = \mu_a\vec{H}\,, \qquad (1.5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, численно равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, характеризующая магнитную проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума (величина безразмерная); $\mu_a = \mu_0\mu$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

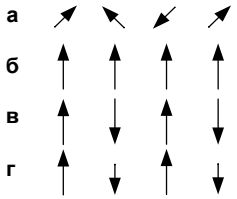


Рис. 1.3. Схематическое расположение спинов в парамагнитных (*а*), ферромагнитных (*б*), антиферромагнитных (*в*) и ферримагнитных (*г*) веществах. Диамагнетикам свойственна полная взаимная компенсация магнитных моментов атомов

Отдельные классы магнетиков различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости, а также по характеру зависимости магнитных характеристик от температуры и напряженности магнитного поля.

Диамагнетиками называют вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов электронов. Физическая природа диамагнетизма основана на классическом представлении об атоме как системе электронов, движущихся вокруг ядра по определенным замкнутым траекториям-орбитам с некоторой угловой скоростью.

Если на атом накладывается медленно меняющееся магнитное поле, то эта угловая скорость меняется, а радиус орбиты, естественно, остается неизменным. Изменение угловой скорости приводит к возникновению магнитного момента $\vec{\mu}_m$ величиной

$$\vec{\mu}_m = -\frac{e^2}{4m}\mu_0 r^2 \vec{H}, \qquad (1.6)$$

где e – заряд электрона, m – его масса, r – радиус электронной орбиты, $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, приложенного перпендикулярно к плоскости орбиты. Атомная магнитная восприимчивость κ, рассчитанная по (1,5), (1.6), имеет порядок $\kappa \approx -(10^{-6} - 10^{-5})$, т.е. соответствует величине, измеряемой экспериментально для диамагнитных твердых тел, и не зависит от температуры [3]. Магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu \approx 0{,}99999$ и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Изменение угловой скорости электрона, связанное с наложением магнитного поля, всегда обусловливает отрицательную магнитную восприимчивость. Атом с циркулирующим в нем электроном ведет себя подобно индуктивности, в которой в соответствии с правилом Ленца возникла эдс противоположного знака. Таким образом, во всем объеме твердого тела возникают индуцированные внешним магнитным полем незатухающие микроскопические вихревые токи, обусловленные прецессией электронных орбит. Направление индуцированных магнитных моментов всегда противоположно направлению внешнего магнитного поля, поэтому диамагнетики отличаются тем, что выталкиваются из неоднородного магнитного поля.

Диамагнетизм является результатом прецессии всех электронов атомов и молекул, поэтому присущ всем веществам, но проявляется только в том случае, если не перекрывается более сильными пара- и ферромагнетизмом и лишь при взаимодействии с магнитным полем.

К «чистым» диамагнетикам, как правило, относятся вещества со значительной атомной массой и наличием большого количества электронных оболочек атома с большими радиусами, поскольку возникающий магнитный момент, согласно (1.6), пропорционален квадрату радиуса оболочки r^2. У атомов диамагнетиков, кроме того, должны отсутствовать нескомпенсированные магнитные моменты.

К диамагнитным веществам относятся водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Cu, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Mg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Диамагнетизм не имеет простого практического применения. К числу наиболее интересных диамагнетиков относятся сверхпроводники. Они обладают бесконечно большой диамагнитной восприимчивостью – свойством, которое чрезвычайно полезно при конструировании сверхпроводящих магнитов [3].

Парамагнетиками называются вещества, в которых взаимодействие между постоянными магнитными моментами атомов – элементарными магнитными диполями – мало, в результате чего при обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты атомов располагаются статистически равновероятно относительно любого направления и суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, т.е. тело оказывается намагниченным, однако при обычных полях и температурах

намагниченность парамагнетиков очень мала. Магнитная восприимчивость их положительна и имеет значение $\kappa \sim (10^{-5} – 10^{-2})$, относительная магнитная проницаемость $\mu \approx 1{,}001$.

Проявлением парамагнетизма является независимая ориентация магнитных моментов атомов и ионов под действием внешнего магнитного поля. Так как моменты ориентируются в направлении поля и тем самым увеличивают его, магнитная восприимчивость κ больше нуля.

Парамагнетизм характеризуется двумя независимыми факторами. Один из них – температурная зависимость суммарной намагниченности всего образца, другой – природа самих магнитных моментов атомов.

Для парамагнитных газов и редкоземельных элементов температурная зависимость магнитной восприимчивости характеризуется законом Кюри, установленным экспериментально в 1895 г.:

$$\kappa = C/T, \qquad (1.7)$$

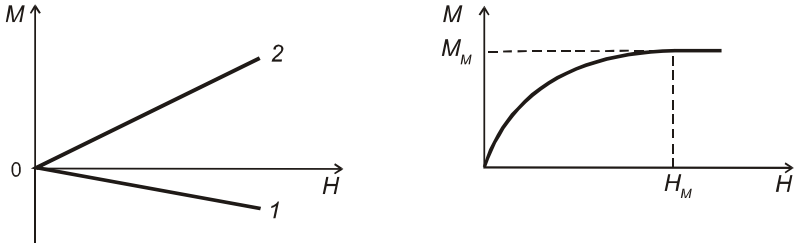
где C – постоянная Кюри, T – температура, К.

Для переходных парамагнитных металлов, у которых взаимодействием между элементарными носителями магнетизма (молекулярным полем) пренебречь нельзя, справедлив более общий закон Кюри – Вейса.

$$\kappa = C/(T - \Delta), \qquad (1.8)$$

где Δ – постоянная Вейса, различная для разных веществ (может быть и больше, и меньше нуля).

На рис. 1.4, а показана зависимость намагниченности $M(H)$ для диа- и парамагнетиков при слабых полях и при обычных или высоких температурах [4]. В обоих случаях значение M пропорционально H, что свидетельствует о независимости κ от H. Для намагничивания парамагнетиков до насыщения (рис. 1.4, б), т.е. до состояния, когда все элементарные магнитные моменты будут параллельны внешнему полю, требуется при комнатной температуре поле напряженностью примерно 10^{11} А/м, а при $T = 1$ К примерно $3 \cdot 10^5$ А/м [5]. Однако в последние годы выяснилось, что в парамагнетиках можно создать высокую намагниченность, не прибегая к сильным магнитным полям, а используя поток квантов света (оптическую накачку).



а *б*

Рис. 1.4. Зависимость намагниченности *M* от напряженности магнитного поля *H*: *а* – для диамагнетиков *(1)* и парамагнетиков *(2)*; *б*– для парамагнетиков при низких температурах или очень сильных полях

С повышением температуры при неизменной напряженности магнитного поля возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул, и поэтому намагниченность убывает. Парамагнетики отличаются тем, что они втягиваются в неоднородное магнитное поле.

Поскольку все заполненные электронные оболочки имеют нулевой полный момент количества движения, они обладают также нулевым полным магнитным моментом. В частности, атомы или ионы, обладающие только заполненными оболочками, не имеют постоянных магнитных моментов и, следовательно, не могут быть парамагнитными. Никаких исключений из этого правила не обнаружено [5]. Инертные газы *He, Ar, Kr* и т.д. и такие ионы, как Na^+ и Cl^-, диамагнитны. Диамагнитны также и многие газы, такие как H_2 и др., поскольку все электроны в их молекулах спарены. Свободные атомы других веществ обнаруживают парамагнетизм, если у них имеются неспаренные спины или нескомпенсированный момент количества движения.

К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, Al, Cr, Mo, Mn, Pt, Pb и др.

Парамагнетизм в атомах или ионах не существует в одиночку: одновременно с ним всегда имеют место и диамагнитные свойства. Поскольку оба эти эффекта противоположны друг другу по знаку, суммарные магнитные свойства материала определяются наибольшим из них. У большинства материалов величина парамагнитной восприимчивости значительно больше диамагнитной, т.е. парамагнетизм обычно преобладает над диамагнетизмом.

Парамагнитные вещества используются в качестве рабочих тел в квантовых парамагнитных усилителях и генераторах.

Ферромагнетиками называют вещества, характеризующиеся наличием недостроенных внутренних оболочек атомов, поскольку магнитные моменты заполненных оболочек равны нулю, а внешние валентные электроны металла обобществлены. Такими элементами являются переходные металлы группы железа, имеющие недостроенную 3*d*-оболочку, и редкоземельные элементы с недостроенной 4*f*-оболочкой. Наличие магнитного момента у атомов обусловлено только нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами, поскольку орбитальные магнитные моменты весьма малы. При этом между электронами внутренних незаполненных оболочек соседних атомов возникает особый вид электростатического взаимодействия, называемого обменным. Для ферромагнетиков в отсутствие внешнего поля энергетически выгодным является параллельное расположение магнитных моментов соседних атомов внутри домена.

При помещении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно происходят процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещения их границ (изменения объема). В слабом поле преобладает процесс обратимого смещения границ, т.е. рост объема доменов, у которых магнитный момент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При усилении поля процесс идет более интенсивно и приобретает необратимый характер, кривая намагничивания $B(H)$ становится круче (рис. 1.5) (процесс вращения). При дальнейшем увеличении напряженности поля магнитное состояние материала достигает технического насыщения.

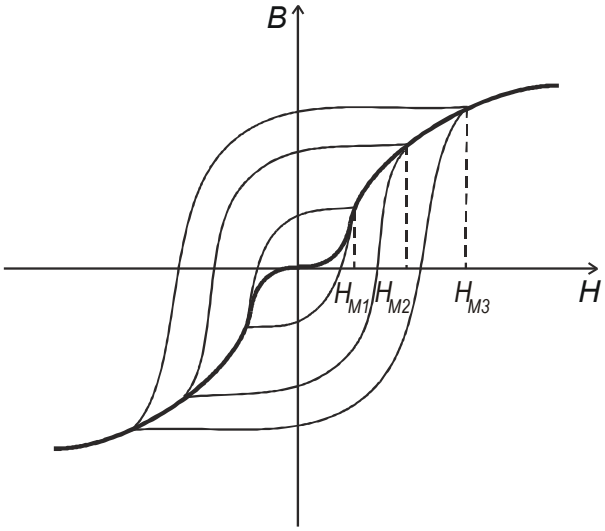


Рис. 1.5. Основная кривая намагничивания и семейство гистерезисных циклов

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется, и его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 1.5. Сплошная кривая, проходящая по вершинам петель, называется нормальной (или основной) кривой индукции.

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы вращения вектора намагниченности, а также задержка роста зародышей перемагничивания, под которыми понимают небольшие объемы с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Ферромагнетики характеризуются большими положительными значениями κ и μ (до сотен тысяч и миллионов), а также сложной нелинейной зависимостью этих параметров от напряженности внешнего магнитного поля (рис. 1.6).

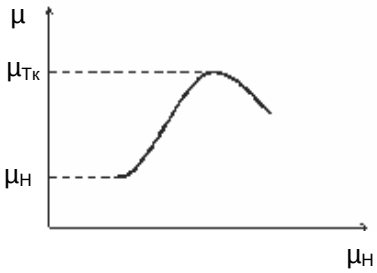


Рис. 1.6. Зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля

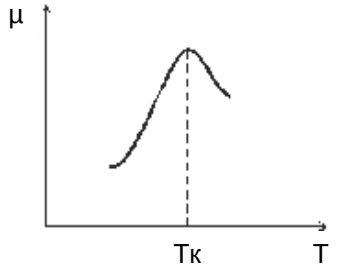


Рис.1.7. Зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнетиков от температуры

При температурах выше точки Кюри $T_к$, определенной для каждого материала, ферромагнитное состояние переходит в парамагнитное (рис. 1.7) вследствие того, что хаотическое тепловое движение атомов нарушает параллельную ориентацию их магнитных моментов и, следовательно, доменное строение ферромагнетика. Точка Кюри чистого железа составляет 768, никеля – 631, кобальта – 1404 °С [5].

Антиферромагнетики – это вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, поэтому имеет место их взаимная компенсация. Магнитная восприимчивость антиферромагнетиков мала и составляет $\kappa \approx (10^{-5} - 10^{-3})$. В слабых полях κ (и μ) практически не зависят от напряженности внешнего магнитного поля, в сильных являются сложной функцией напряженности поля. В некоторой степени свойства антиферромагнетиков схожи со свойствами парамагнетиков. Пара- и антиферроманитные вещества объединяют положительная магнитная восприимчивость и компенсация магнитных моментов атомов. Различие заключается в том, что спиновые моменты парамагнетиков ориентированы хаотически, а антиферромагнетиков – антипараллельно друг другу.

По мере повышения температуры от 0 К величина κ растет, достигая максимума при температуре, называемой точкой Нееля, и далее начинает уменьшаться, подчиняясь на этом участке закону Кюри – Вейса.

К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, а также Cr и Mn; многие окислы, хлориды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца: MnO, $MnCl_2$, MnF_2, MnS_2 и др., аналогично – на основе Fe, Co, Ni, Cr и др. [3-6].

Феррримагнетиками (или нескомпенсированными антиферромагнетиками) называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, однако величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой.

К феррримагнетикам относятся ферриты, представляющие собой магнитную керамику, состоящую из смеси окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов. Структурная формула ферритов $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me – двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg и др.). Многие свойства феррримагнетиков качественно аналогичны свойствам ферромагнетиков, однако имеются и существенные различия. Например, феррримагнетики (ферриты) отличаются от ферромагнетиков меньшей величиной индукции насыщения и имеют более сложную температурную зависимость основных магнитных параметров.

Преимущества ферритов при работе в ВЧ- и СВЧ-диапазонах обусловлены тем, что их удельное электрическое сопротивление в 10^6 – 10^{11} раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, так как они являются оксидными материалами, а не металлами. По значению удельного электрического сопротивления ρ они относятся к классу полупроводников или диэлектриков. Вследствие этого вихревые токи (и соответствующая мощность магнитных потерь) в ферритах очень малы, и они применяются в качестве магнитного материала при частотах до сотен мегагерц, тогда как металлические магнитные материалы применяются при частотах до нескольких десятков мегагерц.

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость феррримагнетиков ниже, чем у ферромагнетиков, и достигает значений нескольких десятков тысяч.

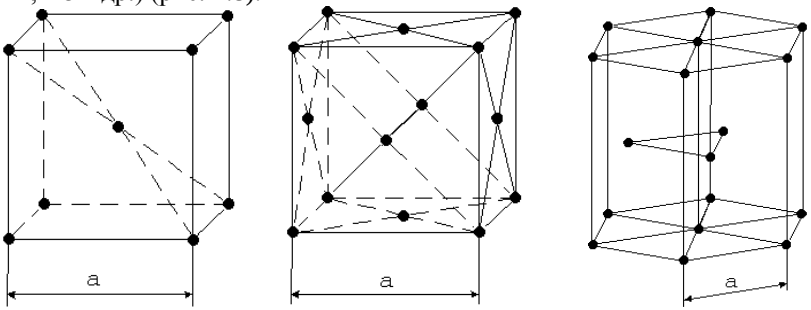
Диа-, пара- и антиферромагнетики объединяются в группу слабомагнитных веществ, а ферро- и феррримагнетики – в группу сильномагнитных .

1.6. Строение и кристаллизация металлов и сплавов

Металлы и сплавы в твердом состоянии имеют поликристаллическую структуру, состоящую из отдельных зерен – монокристаллических областей, ориентированных друг относительно друга под различными углами. На границе между зернами атомы имеют менее правильное расположение, чем в объеме зерна. Линейный размер зерен составляет $1 – 10^3$ мкм.

С помощью рентгеноструктурного анализа установлено, что кристаллическое строение твердых тел, состоящих из различных атомов, описывается 14 различными типами пространственных элементарных ячеек.

Наиболее широко применяются металлы и сплавы, образованные одним из трех типов пространственных решеток, определяемых отдельно взятой элементарной ячейкой: объемноцентрированной кубической ОЦК (α–Fe, Cr, W, Mo, V и др.); гранецентрированной кубической ГЦК(γ–Fe, Cu, Al, Ni, Pb и др.); гексагональной (Ti, Mg, Zn, Be и др.) (рис. 1.8).



а *б* *в*

Рис. 1.8. Атомно-кристаллическое строение металлов с объемноцентрированной кубической *(а)*, гранецентрированной кубической *(б)* и гексагональной *(в)* элементарными ячейками

Формирование структуры металла при гомогенной (самопроизвольной) кристаллизации. Переход металла из жидкого состояния в твердое (кристаллическое) называется ***кристаллизацией***. Кристаллизация протекает в условиях, когда система переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с меньшей энергией Гельмгольца (свободной энергией) F, т. е. когда энергия кристалла меньше, чем энергия жидкой фазы. Если превращение происходит с

небольшим изменением объема, то $F = U - TS$, где U — внутренняя энергия фазы, T — абсолютная температура, S — энтропия.

Изменение свободной энергии металла в жидком и твердом состоянии в зависимости от температуры показано на рис. 1.9. Выше температуры $T_п$ более устойчив жидкий металл, имеющий меньший запас свободной энергии, а ниже этой температуры устойчив твердый металл. При температуре $T_п$ значения энергий металла в жидком и твердом состояниях равны. Температура $T_п$ соответствует равновесной температуре кристаллизации (или плавления) данного вещества, при которой обе фазы (жидкая и твердая) могут сосуществовать одновременно. Процесс кристаллизации при этой температуре еще не начинается. Процесс кристаллизации развивается, если созданы условия, когда возникает разность энергий ΔF, образующаяся вследствие меньшей свободной энергии твердого металла по сравнению с жидким.

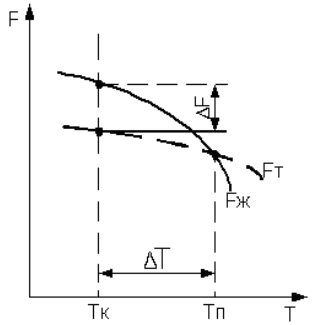


Рис. 1.9. Изменение энергии Гельмгольца F (свободной энергии) металла в жидком $F_ж$ и твердом $F_т$ состояниях в зависимости от температуры ($T_к$ – температура, при которой происходит кристаллизация)

Следовательно, процесс кристаллизации может протекать только при переохлаждении металла ниже равновесной температуры $T_п$. Разность между температурами $T_п$ и $T_к$, при которых может протекать процесс кристаллизации, носит название ***степени переохлаждения:***

$$\Delta T = T_П - T_К.$$

Кривые охлаждения (термические кривые), характеризующие процесс кристаллизации чистых металлов при охлаждении с разной скоростью V, показаны на рис. 1.10. При очень медленном охлаждении степень переохлаждения невелика и процесс кристаллизации протекает при температуре, близкой к равновесной $T_п$ (рис. 1.10, кривая V_1). При температуре кристаллизации на

термической кривой отмечается горизонтальная площадка (остановка в падении температуры), образование которой объясняется выделением скрытой теплоты кристаллизации, несмотря на отвод теплоты при охлаждении.

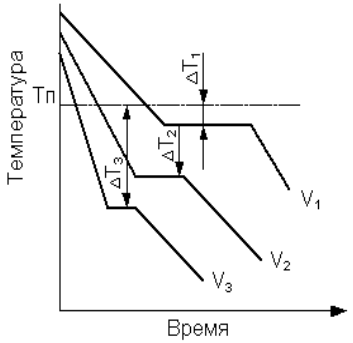


Рис. 1.10. Кривые охлаждения металла при кристаллизации с разной скоростью: $v_1<v_2<v_3$

С увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения возрастает (кривые V_2, V_3**)** и процесс кристаллизации протекает при температурах, лежащих значительно ниже равновесной температуры кристаллизации. Чем чище жидкий металл, тем более он склонен к переохлаждению. При затвердевании очень чистых металлов степень переохлаждения ΔT может быть очень велика. Однако чаще степень переохлаждения не превышает 10 – 30 °С.

Кристаллизация начинается с образования зародышей кристаллов (центров кристаллизации) и продолжается в процессе роста их числа и размеров. При переохлаждении сплава ниже температуры $T_п$ во многих участках жидкого сплава образуются устойчивые, способные к росту кристаллические зародыши (рис. 1.11).

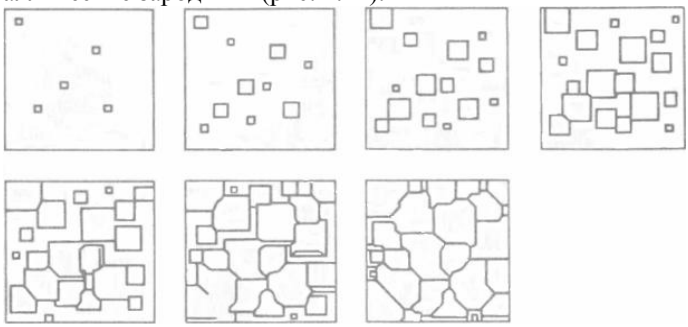
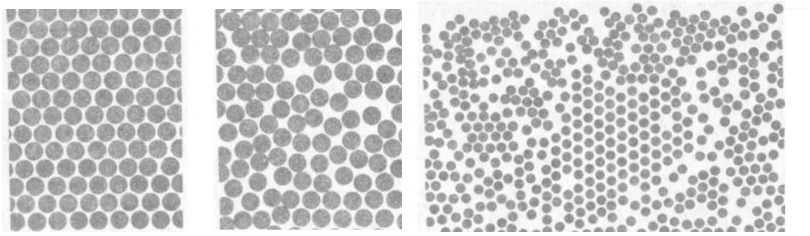


Рис. 1.11. Схема кристаллизации металла

Пока образовавшиеся кристаллы растут свободно, они имеют более или менее правильную геометрическую форму. Однако при столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается, так как в этих участках рост граней прекращается. Рост продолжается только в тех направлениях, где есть свободный доступ «питающей» жидкости. В результате растущие кристаллы, имевшие сначала геометрически правильную форму, после затвердевания получают неправильную внешнюю форму и поэтому называются ***кристаллитами*** или ***зернами.*** Выше отмечалось, что металлы и сплавы имеют поликристаллическое строение.

Явления, протекающие в процессе кристаллизации, сложны и многообразны. Особенно трудно представить начальные стадии процесса, когда в жидкости образуется первый кристаллик, или центр кристаллизации. Очевидно, что для выяснения условий появления этих центров надо ясно представить строение исходного жидкого металла. Схематические модели кристаллической и жидкой фаз представлены на рис. 1.12. В жидком металле атомы не расположены хаотично, как в газообразном состоянии, и в то же время в их расположении отсутствует правильный порядок, характерный для твердого кристаллического тела (рис. 1.12, а), где атомы сохраняют постоянство межатомных расстояний и угловых соотношений на больших расстояниях — ***дальний порядок.***



а *б* *в*

Рис. 1.12. Модель кристаллической (*а*) и жидкой (*б* и *в*) фаз металла

В жидком металле (рис. 1.12, б) сохраняется лишь так называемый ***ближний порядок,*** когда упорядоченное расположение атомов распространяется на очень небольшое расстояние. Вследствие интенсивного теплового движения атомов ближний порядок динамически неустойчив. Микрообъемы с правильным расположением атомов, возникнув, могут существовать некоторое время, затем рассасываться и возникать вновь в другом элементарном

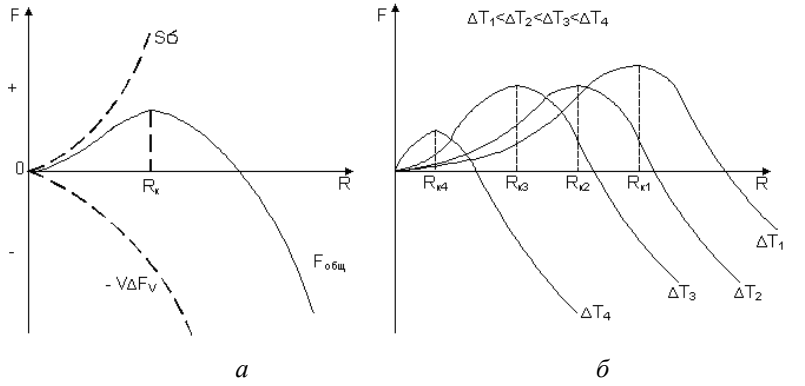
объеме жидкости и т. д. С понижением температуры степень ближнего порядка и размер таких микрообъемов возрастают.

При температурах, близких к температуре кристаллизации, в жидком металле возможно образование небольших группировок, в которых атомы упакованы так же, как в кристаллах. Такие группировки называются ***фазовыми*** (или гетерофазными) ***флуктуациями*** (рис. 1.12, в). В чистом от примесей жидком металле наиболее крупные гетерофазные флуктуации превращаются в зародыши (центры кристаллизации).

Рост зародышей возможен только при условии, если они достигли определенной величины, начиная с которой, их рост ведет к уменьшению свободной энергии. В процессе кристаллизации свободная энергия системы (рис. 1.13, а), с одной стороны, уменьшается на $V\Delta F_V$ вследствие перехода некоторого объема жидкого металла в твердый, а с другой – возрастает в результате образования поверхности раздела с избыточной поверхностной энергией, равной $S\sigma$. Общее изменение свободной энергии определяется из следующего выражения:

$$F_{общ} = -V\Delta F_V + S\sigma,$$

где V — объем зародыша, ΔF_V — разность свободной энергий жидкого и твердого металла (см. рис. 1.9); S — суммарная площадь поверхности кристаллов; σ — удельное поверхностное натяжение на границе жидкость—кристалл.



а *б*

Рис. 1.13. Изменение свободной энергии при образовании зародышей кристалла в зависимости от их размера R (*а*) и степени переохлаждения ΔT (*б*)

Чем меньше величина зародыша, тем выше отношение его поверхности к объему, а следовательно, тем большая часть общей энергии приходится на поверхностную энергию. Изменение свободной энергии металла $F_{общ}$ при образовании кристаллических зародышей в зависимости от их размера R и степени переохлаждения показано на рис. 1.13, а.

При образовании зародыша размером меньше R_K (рис. 1.13, б) – R_{K1}, R_{K2}, R_{K3}, R_{K4} свободная энергия системы возрастает, так как приращение свободной энергии вследствие образования новой поверхности перекрывает ее уменьшение в результате образования зародышей твердого металла, т. е. объемной энергии. Следовательно, зародыш размером меньше R_K расти не может и растворится в жидком металле. Если возникает зародыш размером более R_K, то он устойчив и способен к росту, так как при увеличении его размера свободная энергия системы уменьшается.

Минимальный размер зародыша R_K, способного к росту при данных температурных условиях, называется критическим размером зародыша, а сам зародыш ***критическим*** или ***равновесным***.

Величину критического зародыша можно определить из соотношения

$$R_K \approx 2\sigma/\Delta F_V.$$

При температуре, близкой к $T_П$, размер критического зародыша должен быть очень велик и вероятность его образования мала. С увеличением степени переохлаждения величина ΔF возрастает (см. рис. 1.9), а величина поверхностного натяжения на границе раздела фаз изменяется незначительно.

Следовательно, с увеличением степени переохлаждения (или с понижением температуры кристаллизации) размер критического зародыша и работа, необходимая для его образования, уменьшаются. В связи с этим с увеличением степени переохлаждения, когда становятся способными к росту зародыши все меньшего размера, сильно возрастают число зародышей (центров) кристаллизации и скорость образования этих зародышей (см. рис.1.13, б).

При прочих равных условиях скорость процесса кристаллизации, строение металла после перехода в твердое состояние и его свойства зависят от числа зародышей – центров кристаллизации, возникающих в единицу времени в единице объема ($с^{-1}\cdot см^{-3}$), и скорости их роста, т.е скорости увеличения линейных размеров растущего кристалла в единицу времени ($мм\cdot с^{-1}$).

На рис. 1.14 изображены кривые охлаждения металла и двухкомпонентного сплава. При охлаждении расплавленного чистого металла вначале (участок 1 – 2 рис. 1.14, а) понижение температуры идет плавно. При достижении температуры кристаллизации на кривой охлаждения (рис. 1.14, а) появляется горизонтальный участок 2 – 3, так как отвод тепла в окружающую среду, как отмечалось выше, компенсируется выделяющейся скрытой теплотой кристаллизации. После окончания кристаллизации температура вновь понижается равномерно (участок 3 – 4 рис. 1.14, а).

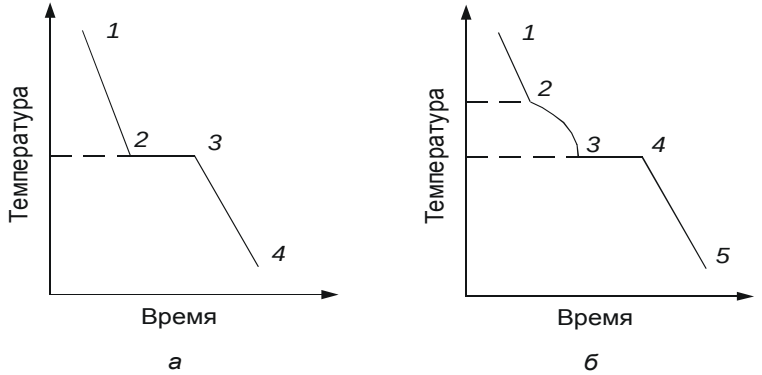


Рис. 1.14 . Кривые охлаждения металла *(а)* и двухкомпонентного сплава *(б)*

При охлаждении из жидкого состояния сплава двух металлов процесс кристаллизации протекает несколько иначе (рис. 1.14, б) – кривая охлаждения имеет точку перегиба при температуре, соответствующей началу кристаллизации более высокотемпературного компонента. Точка 2 соответствует началу выделения из жидкой фазы кристаллов одного из компонентов сплава. Выделяющаяся при кристаллизации теплота замедляет ход кривой охлаждения, и в точке 2 кривая изменяет наклон (участок 2 – 3). Выпадение кристаллов избыточного компонента и равномерное понижение температуры происходят, пока сплав не достигнет определенного состава. В дальнейшем происходит одновременная кристаллизация компонентов при постоянной температуре (участок 3 – 4, рис. 1.14, б). После полного затвердевания сплава в точке 4 его температура снова начинает снижаться по плавной кривой 4 – 5.

Температура, соответствующая каким-либо фазовым превращениям в металле или сплаве, называется ***критической***

точкой. При нагревании твердых металлов или сплавов процесс их расплавления сопровождается поглощением теплоты.

Практика производства металлов и сплавов показала, что чем больше степень переохлаждения, тем мельче зерна в литых деталях.

1.7. Основные типы сплавов

Чистые металлы в большинстве случаев не обеспечивают необходимого комплекса механических, технологических и функциональных свойств и поэтому применяются редко. Чаще всего в технике используют сплавы.

Металлическим ***сплавом*** называют материал, состоящий из двух или более компонентов и обладающий свойствами, характерными для металлов. Сплавы создаются в результате расплавления, спекания исходных компонентов и другими методами [1, 2, 7]. Необходимым процессом получения сплава является диффузия элементов в твердом, жидком или газообразном состоянии. Диффузия осуществляется путем взаимного проникновения атомов каждого из компонентов сплава с образованием новых однородных тел, называемых фазами.

Для описания свойств сплавов в металловедении используют понятия: система, фаза, компонент.

Системой называют совокупность фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях (температуре, давлении).

Фазой называют однородную по химическому составу, кристаллическому строению и свойствам часть системы, отделенную от других ее частей поверхностью раздела. Однофазной системой является, например, однородная жидкость, твердый металл; двухфазной – механическая смесь двух видов кристаллических веществ.

Компонентами называют вещества, образующие систему. Компонентами могут быть атомы (металлы и неметаллы), а также химические соединения. По числу компонентов различают двойные, тройные и многокомпонентные сплавы. Компонент сплавов может быть основным, легирующим или случайным.

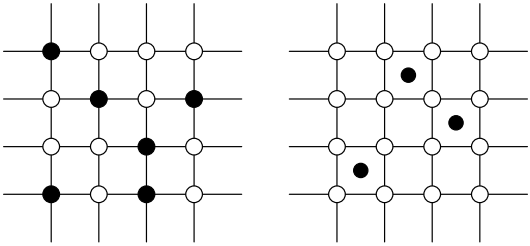
Сплавы, находящиеся в твердом состоянии, делят по составу на три группы: механическая смесь компонентов, твердый раствор, химическое соединение.

Механическая смесь. Сплавы такого типа формируются из отдельных, перемешанных произвольным образом,

поликристаллических зерен, принадлежащих разным компонентам. При образовании сплава - механической смеси кристаллические решетки отдельных фаз не меняются. Образование сплавов - механических смесей происходит, когда элементы не образуют совместной кристаллической структуры, обладают ограниченной растворимостью, а также при наличии компонентов, оставшихся после образования сплава - химического соединения. Механические смеси, как и другие сплавы, имеют поликристаллическое строение и могут состоять из кристаллов чистых компонентов, твердых растворов и химических соединений. Механические смеси обычно образуют металлы, отличающиеся друг от друга размерами атомов и температурой плавления. Примером сплава, образующего механическую смесь, является система Ag–Pb.

Твердый раствор. В жидком состоянии большинство металлических сплавов представляет собой однородные жидкости, т.е. жидкие растворы. При переходе в твердое состояние во многих таких сплавах однородность, а следовательно и растворимость, сохраняются. Твердый раствор, как и металл, имеет одну кристаллическую решетку, соответствующую типу кристаллической решетки основного компонента сплава (растворителя). Различие состоит в том, что в кристаллической решетке металла размещаются атомы одного элемента, а в твердом растворе – атомы различных элементов, образующих этот твердый раствор.

По характеру размещения атомов в кристаллической решетке различают твердые растворы замещения (рис. 1.15, а) и твердые растворы внедрения (рис. 1.15, б).



а *б*

Рис. 1.15. Расположение атомов в твердых растворах [8]: *а* – замещения; *б* – внедрения; ○ – атом компонента–растворителя; ● – атом растворимого компонента

В твердых растворах замещения, состоящих из компонентов *A* и *B*, атомы растворимого компонента В замещают отдельные атомы

основного компонента А растворителя в кристаллической решетке. В этом случае при несовпадении размеров атомов размер элементарной ячейки может изменяться. Растворимость в твердом состоянии может быть неограниченной или ограниченной. Неограниченная растворимость обеспечивает замещение в кристаллической решетке любого числа атомов компонента *A* атомами компонента *B*.

Неограниченная растворимость возможна при следующих условиях:

1) наличие у компонентов кристаллических решеток (элементарных ячеек) одного типа;

2) незначительное отличие размеров атомов компонентов (порядка 10 %);

3) достаточно близкое соответствие строения валентных оболочек атомов компонентов (тип химической связи).

Примерами сплавов с неограниченной растворимостью компонентов являются сплавы Cu–Ni, Fe–Ni, Fe–Cr и др.

Если компоненты сплава не полностью удовлетворяют указанным выше условиям, образуются твердые растворы замещения с ограниченной растворимостью компонентов.

При этом чем больше разница в размерах атомов компонентов, тем меньше растворимость в твердом состоянии. С изменением температуры ограниченная растворимость в твердом состоянии обычно меняется. Примерами систем с ограниченной растворимостью компонентов являются Al–Cu, Mg–Al и др.

В твердом растворе внедрения атомы растворимого компонента внедряются в междоузлия кристаллической решетки основного компонента (рис. 1.15, б). Такие твердые растворы обычно образуются, когда атомы растворимого компонента имеют сравнительно небольшие размеры по сравнению с атомами растворителя. Чаще всего это имеет место, когда в металле растворяются неметаллические элементы. Примером твердого раствора внедрения является сплав Fe–C.

Химическое соединение. Элементы, образующие химические соединения, обычно резко отличаются по размерам атомов, строению электронных оболочек и параметрам кристаллических решеток. К образованию сплавов - химических соединений склонны элементы, далеко расположенные друг от друга в периодической таблице Д.И. Менделеева.

В отличие от обычных химических соединений многие металлические соединения имеют переменный состав, который может изменяться в широких пределах. Получение химического соединения

A_mB_n с образованием однородного кристаллического вещества возможно только при строго определенных соотношениях концентраций компонентов. При этом образуется кристаллическая решетка, не похожая на решетки исходных компонентов. Примером может служить сплав Cu–Mg при содержании 17 % Mg. Свойства сплава – химического соединения резко отличаются от свойств элементов, образующих его.

Сплавы – химические соединения не всегда встречаются в чистом виде. Например, при избытке растворимого компонента возможно образование химического соединения в комбинации с твердым раствором.

Приведенные выше положения указывают в общем виде на особенности взаимодействия элементов при образовании сплавов и на их возможную структуру. Однако при образовании и термообработке сплавов на основе конкретных компонентов имеются особенности, которые в металловедении изучаются экспериментально. Например, для установления режимов термической обработки сплавов с целью придания им необходимых свойств важно знать температуры начала и окончания процессов плавления, перехода в твердое состояние, особенности структурных превращений в критических точках. Построение кривых охлаждения (нагревания) на основе экспериментальных данных называется ***термическим анализом***. Полученные экспериментальные данные систематизируют, обобщают и отображают в виде особых диаграмм состояния сплавов.

1.8. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение фазового состояния сплавов и критических точек в зависимости от концентрации компонентов и температуры в условиях термодинамического равновесия.

Для того чтобы обеспечить равновесное состояние системы, охлаждение сплава из жидкого состояния осуществляют очень медленно. *Равновесными* считаются такие условия, при которых процессы, протекающие в системе, являются обратимыми. В данном случае процессы, происходящие при охлаждении сплава, должны в точности совпадать с процессами, протекающими при его нагреве.

Диаграмму состояния строят в координатах температура – концентрация (рис. 1.16). Для сплавов, состоящих из двух компонентов *A* и *B*, состав характеризуется отрезком прямой, принятым за 100 %. Крайние точки *A* и *B* соответствуют 100 % чистых

компонентов. Любая точка на этом отрезке характеризует состав двойного сплава. Так, например, точка *C* соответствует сплаву, состоящему из 20 % *B* и 80 % *A*; точка *D* – 60 % *B* и 40 % *A*.

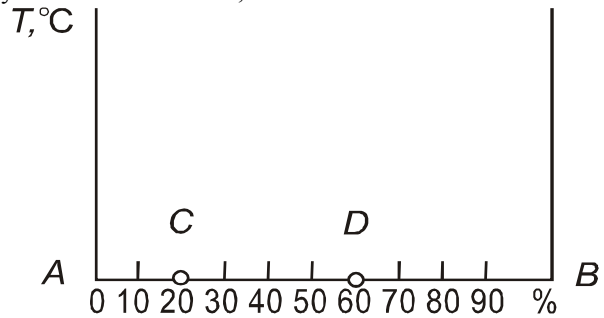


Рис. 1.16. Координаты для изображения диаграммы состояния двухкомпонентной системы

Для построения диаграммы состояния из компонентов изготовляют серию сплавов различного состава и для каждого из них строят кривую охлаждения по результатам термического анализа в координатах температура – время (так же, как для металлов). Особенности поликристаллического строения сплавов в твердом состоянии изучаются с помощью оптического микроскопа обычно при 100 – 1000-кратном увеличении. Атомная структура сплавов и параметры кристаллических решеток определяется методом рентгеноструктурного анализа.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный жидкий раствор) различают следующие основные типы диаграмм состояния [1, 2, 8]:

1) при образовании компонентами механической смеси;
2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать фрагменты диаграмм состояния разных типов.

Диаграмма состояния сплавов из компонентов, образующих в твердом состоянии механическую смесь

Экспериментально установлено, что при совместной кристаллизации сплавов, компоненты которых не растворяются друг в друге в твердом состоянии, температура начала кристаллизации всегда ниже, чем у исходных компонентов. Температура же окончания процесса перехода в твердое состояние одинакова для сплавов любого состава двухкомпонентной системы.

На рис. 1.17 приведены кривые охлаждения для разных концентраций компонентов *A* и *B*, а также диаграмма состояния сплава. Выше линии *KCN* (рис. 1.17, б) все сплавы двухкомпонентной системы представляют собой однофазный расплав (жидкий сплав – ж. с.). Эта линия называется ***линией ликвидуса*** (с греч. – жидкий), линия DCE – ***линией солидуса*** (с греч. – твердый). Ниже линии DCE все сплавы находятся в твердом состоянии. Сплав, соответствующий точке *C*, называется *эвтектическим* (эвтектикой; с греч. – легко плавящийся).

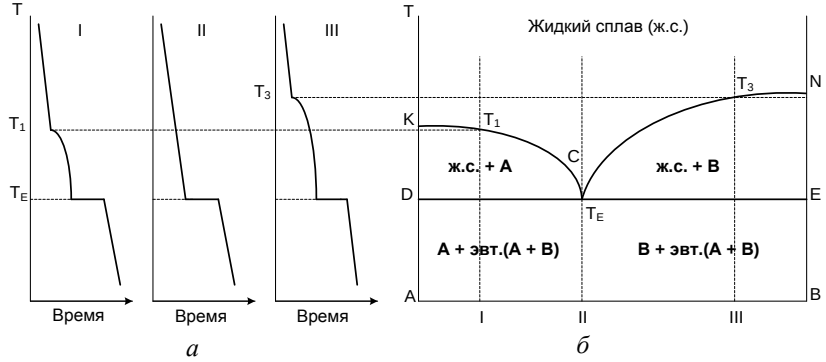


Рис. 1.17. Кривые охлаждения с концентрацией компонентов 1, П, Ш (*а*) и диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии сплав типа механической смеси компонентов *A* и *B* (*б*)

Эвтектикой, таким образом, называется механическая смесь кристаллов двух (или более) твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из жидкого расплава при температуре ниже температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей. Это определение относится к твердой эвтектике. Жидкой эвтектикой называется жидкий расплав (или раствор), из которого возможна такая кристаллизация.

В отличие от эвтектики ***эвтектоид*** (аналогичная ей составляющая металлических сплавов) образуется не кристаллизацией из жидкой, а перекристаллизацией из иной твердой фазы. Эвтектоид по сравнению с эвтектикой имеет более тонкое дисперсное строение из двух или более фаз. Эвтектический сплав данной системы имеет строго определенное процентное соотношение компонентов *A* и *B*. Сплавы, расположенные слева от эвтектики, называются **доэвтектическими**, а справа – **заэвтектическими.**

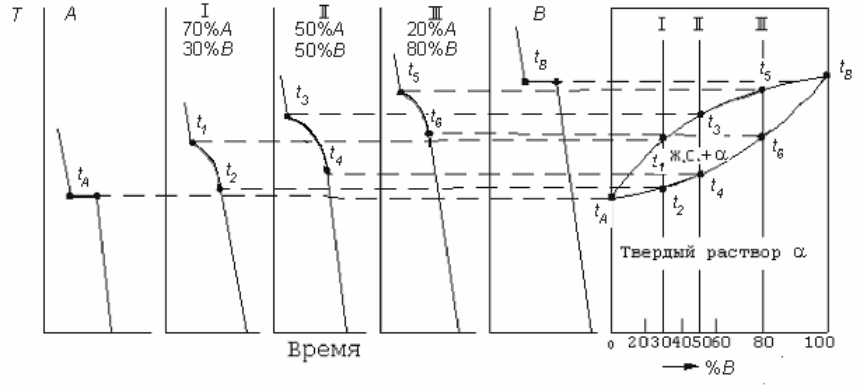
В доэвтектических сплавах сначала при охлаждении ниже линии ликвидуса КС выделяются кристаллы компонента А, а в заэвтектических – ниже линии CN – кристаллы компонента В. После затвердевания, т.е. ниже линии солидуса ДСЕ, доэвтектические сплавы состоят из кристаллов А и эвтектики, а заэвтектические – из кристаллов В и эвтектики.

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Рассмотрим построение диаграммы состояния для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии. Например, экспериментально получены кривые охлаждения компонентов *A* и *B* и сплавов I (70 % *A* и 30 % *B*), II (50 % *A* и 50 % *B*) и III (20 % *A* и 80 % *B*) (рис. 1.18, а). Кристаллизация компонента А начинается и заканчивается при постоянной температуре t_A. Аналогично происходит кристаллизация компонента В при температуре t_B. Кристаллизация сплавов I, II и III происходит в некотором интервале температур. Кристаллизация сплава I начинается при температуре t_1 и заканчивается при температуре t_2 с образованием твердого раствора α. Аналогично происходит кристаллизация и двух других сплавов – при температуре t_3 начинается и при температуре t_4 заканчивается затвердевание сплава II, а сплава III – при температурах t_5 и t_6 соответственно. Разница только в интервале температур начала и конца кристаллизации [2, 8].

Если на оси абсцисс сетки в координатах температура – концентрация (рис. 1.18, б) отметить точками исследованные сплавы и в каждой из этих точек восстановить перпендикуляры, т.е. провести линии сплавов, затем на эти линии, а также на левую и правую ординаты температур, соответствующие компонентам *A* (левая) и *B* (правая), перенести найденные критические точки от t_A до t_B и одноименные (имеющие одинаковый физический смысл) критические точки соединить плавными кривыми, то получится диаграмма

состояния сплавов *A* и *B* с неограниченной растворимостью в твердом состоянии (рис. 1.18, б).



а *б*

Рис. 1.18. Построение диаграммы состояния сплавов для случая неограниченной растворимости компонентов *A* и *B* в твердом состоянии: *а* – кривые охлаждения; *б* – диаграмма состояния

На этой диаграмме кривая $t_A t_1 t_3 t_5 t_B$ – кривая начала затвердевания сплавов – *линия ликвидуса*, а кривая $t_A t_2 t_4 t_6 t_B$ – кривая конца затвердевания– *линия солидуса.*

Рассмотрим процесс кристаллизации какого-либо сплава, например сплава II состава 50 % компонента *A* и 50 % компонента *B* по этой диаграмме при очень медленном охлаждении, т.е. полностью в равновесных условиях (рис. 1.19). При температуре $t_л$ начинается кристаллизация и образуются первые кристаллы. На любой диаграмме состояния состав твердой части сплава (состав кристаллов, которые могут находиться в равновесии с жидкостью) при данной температуре показывает линия солидуса. Следовательно, первые образовавшиеся кристаллы имеют состав точки *M*. При дальнейшем охлаждении, когда сплав достигает, например, температуры t_1, в равновесии с жидкостью уже находятся только кристаллы состава точки *Л*.

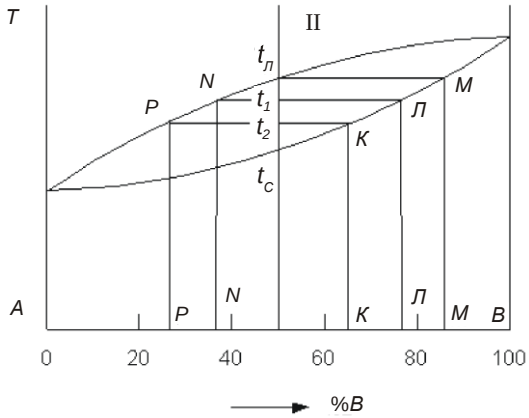


Рис. 1.19. Диаграмма состояния сплавов для случая неограниченной растворимости компонентов *A* и *B* в твердом состоянии

Рассмотрим, каким образом ранее образовавшиеся кристаллы состава точки *M* превращаются в кристаллы состава точки *Л*. В кристаллах состава М больше компонента *B*, чем в кристаллах состава *Л*; следовательно, кристаллы состава *M* обогащаются компонентом *A*. Этот процесс происходит за счет диффузии атомов компонента *A* в уже имеющиеся, т.е. возникшие до этой температуры, кристаллы. При достаточной выдержке или медленном охлаждении при t_1 устанавливается равновесие кристаллов точки *Л* и жидкого сплава. Но в кристаллах состава точки *Л* компонента *B* больше, чем в сплаве; следовательно, жидкая часть сплава беднее компонентом *B*. При этой температуре состав жидкой части сплава определяется линией ликвидуса, т.е. точкой *N*. При дальнейшем охлаждении, когда сплав достигает температуры t_2 и устанавливается равновесие, сплав состоит из кристаллов состава точки К и жидкой части сплава состава точки *P*. При достижении температуры t_c сплав полностью затвердевает и состоит из однородных кристаллов твердого раствора (состава 50 % *A* и 50 % *B*).

В реальных условиях ускоренного охлаждения состав кристаллов не получается однородным в связи с тем, что скорость кристаллизации больше скорости диффузии.

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Один из видов такой диаграммы состояния показан на рис. 1.20. Число фаз в данной системе три – жидкий раствор, твердый раствор компонента *B* в компоненте *A* (обозначим его α) и твердый раствор компонента *A* в компоненте B (обозначим его β).

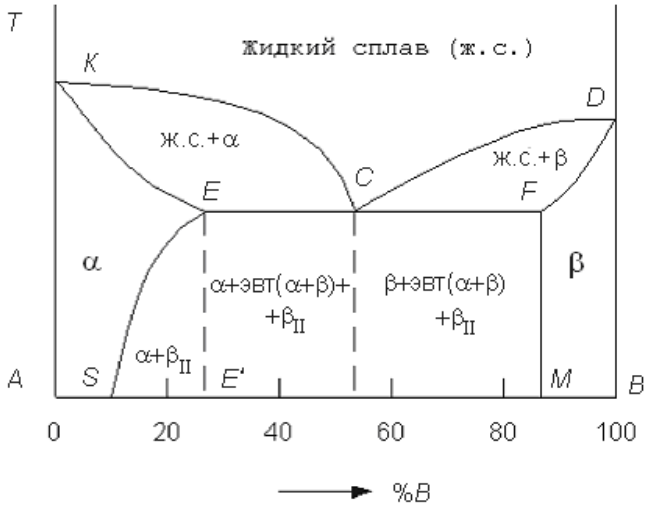


Рис. 1.20. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов *A* и *B* в твердом состоянии

На этой диаграмме линия *KCD* – линия ликвидуса, линия *KECFD* – линия солидуса. По линии ликвидуса *KC* из жидкого сплава выделяются кристаллы α, а по линии *CD* – кристаллы β. На линии солидуса *KE* сплавы затвердевают с образованием кристаллов α, на линии *DF* – кристаллов β. На линии солидуса *ECF* происходит одновременная кристаллизация α- и β-фаз с образованием эвтектики. Сплав состава, соответствующего точке *C,* после затвердевания состоит только из одной эвтектики α+β. Аналогично ранее рассмотренному случаю сплавы, по своему составу находящиеся левее эвтектической точки *C* (на линии *EC*), после затвердевания имеют структуру α+эвтектика (α+β) и являются доэвтектическими. Сплавы, по своему составу лежащие правее точки *C* (на линии *CF*), после затвердевания имеют структуру β+эвтектика (α+β) и являются заэвтектическими.

Линия *ES* показывает ограниченную растворимость в твердом состоянии компонента *B* в компоненте *A*, уменьшающуюся с понижением температуры, а линия *FM* – растворимость компонента *A* в *B*, не изменяющуюся с понижением температуры.

Точка *E* характеризует предельную растворимость компонента *B* в компоненте *A*, а точка *F* – то же для *A* в *B*. Если кристаллизуются сплавы, состав которых находится левее точки *S* (или правее точки *M*), то при любой температуре в твердом состоянии все количество компонентов *B* (или *A*) находится в твердом растворе, и структура таких сплавов состоит из зерен α (или β). В сплавах, состав которых находится между точками *S* и *E'*, т.е. за пределом растворимости *B* в *A*, образовавшиеся при затвердевании кристаллы α при понижении температуры ниже линии *ES* пересыщены компонентом *B*, и поэтому происходит выделение из них избыточных кристаллов, которыми являются кристаллы β концентрации, соответствующей точке *M*, называемые вторичными (β_{11}). После полного охлаждения эти сплавы имеют структуру, состоящую из кристаллов α состава точки *S* и кристаллов $\beta_{11} - \alpha + \beta_{11}$. В сплавах состава линии *EC*, имеющих после затвердевания структуру α + эвтектика ($\alpha+\beta$), из кристаллов α тоже выделяются кристаллы β, и после полного охлаждения будет структура α + эвтектика ($\alpha+\beta$)+β_{11}.

Процесс выделения вторичных кристаллов из твердого раствора называется *вторичной кристаллизацией* в отличие от образования кристаллов в жидком сплаве (*первичная кристаллизация*).

Диаграмма состояния сплавов с образованием компонентами химического соединения

Химическое соединение обозначают A_mB_n. Это означает, что в данном соединении на *m* атомов компонента *A* приходится *n* атомов компонента *B*. Диаграмма состояния для случая образования компонентами сплава - химического соединения, состав которого при нагреве и охлаждении не изменяется, приведена на рис. 1.21.

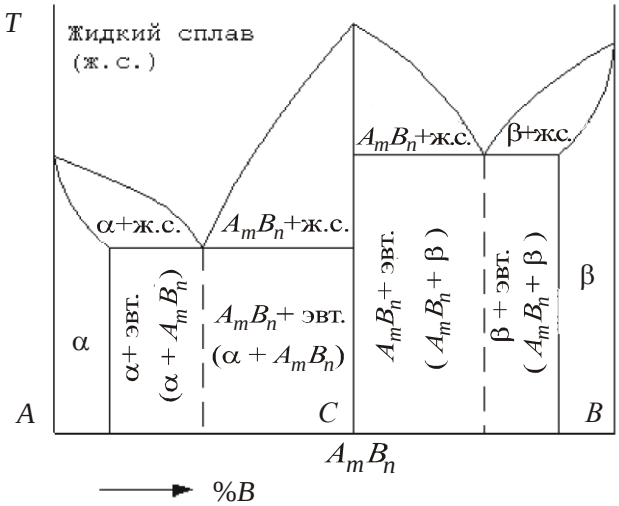


Рис. 1.21. Диаграмма состояния сплавов для случая образования компонентами *A* и *B* сплава - химического соединения

Данная диаграмма составлена как бы из двух диаграмм: компонент *A* – химическое соединение A_mB_n и компонент *B* – химическое соединение A_mB_n. В сплавах левее точки *C* (соответствующей по составу химическому соединению A_mB_n) компонента *A* имеется больше, чем входит в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах левее точки *C* образуется эвтектика α+ A_mB_n. В сплавах правее точки *C* компонента *B* больше, чем может входить в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах образуется эвтектика A_mB_n+β.

Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния

Основоположником учения о связи диаграмм состояния со свойствами сплавов является академик Н.С. Курнаков. На рис. 1.22 схематически показана зависимость свойств сплавов от типа диаграммы состояния, откуда можно вывести следующее:

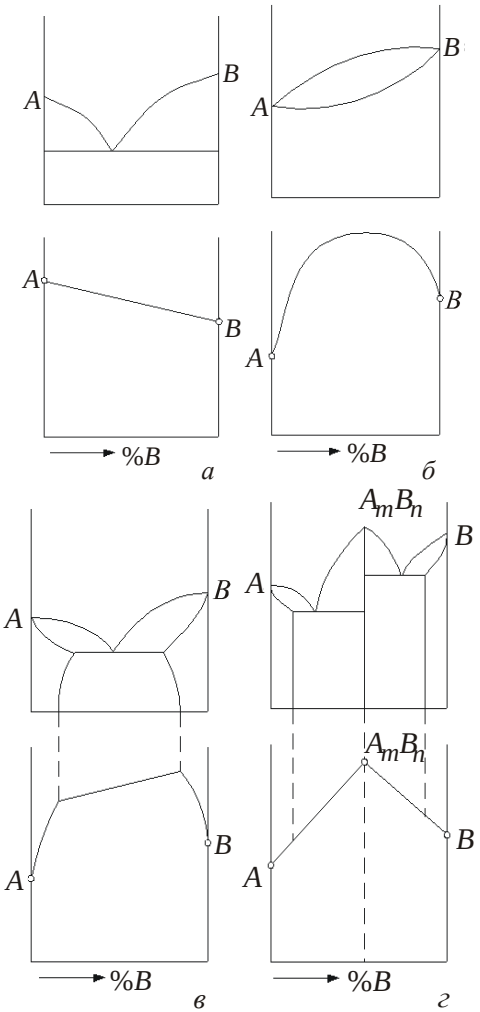


Рис. 1.22. Свойства сплавов и вид их диаграммы состояния (по Н.С. Курнакову)

при образовании твердых растворов с неограниченной растворимостью свойства изменяются по плавным кривым (рис. 1.22, б); при образовании твердых растворов с ограниченной растворимостью или типа механической смеси свойства изменяются прямолинейно (рис. 1.22, а, в); при образовании химического соединения свойства изменяются резко – скачком (рис. 1.22, г).

2. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И УГЛЕРОДА

2.1. Основные свойства железа

Чистое железо – металл серебристо-белого цвета, весьма пластичный. Железо образует несколько окислов: FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4. Температура плавления $T_{пл}$=1539 °С, кипения – $T_{кип}$=2450 °С. Свойства железа в значительной степени зависят от содержания неконтролируемых примесей (углерода, серы, фосфора, кремния, марганца и др.).

Для железа характерно явление **полиморфизма** (**аллотропии**), при котором твердые вещества могут изменять тип кристаллической решетки и свойства под воздействием внешних факторов (температура, давление и т.д.). Железо имеет четыре полиморфные модификации: α–, β–, γ– и δ–Fe. Кристаллическая решетка для α–, β– и δ–Fe имеет тип ОЦК с разными межатомными расстояниями, а для γ–Fe – тип ГЦК. Модификации α– и γ–Fe способны образовывать сплавы – твердые растворы внедрения с углеродом. Естественно, углерод обладает ограниченной растворимостью в α– и γ–Fe. Другими примерами веществ, обладающих аллотропными модификациями структуры и свойств, являются: углерод (алмаз и графит); серое и белое олово и др.

Полиморфные превращения являются обратимыми, в процессе выделяется скрытая теплота кристаллизации (если превращение идет при охлаждении). На кривой охлаждения появляются критические точки и горизонтальные участки, соответствующие процессам перекристаллизации.

На рис. 2.1 приведена кривая охлаждения железа из расплавленного состояния, на которой горизонтальными участками отделены температурные интервалы существования различных модификаций железа.

При переходе β–Fe в α–Fe тип кристаллической решетки сохраняется, но меняются физические свойства: железо из парамагнитного состояния переходит в ферромагнитное, т.е. при температуре ниже 768 °С становятся возможными спонтанная намагниченность материала и его доменная структура.

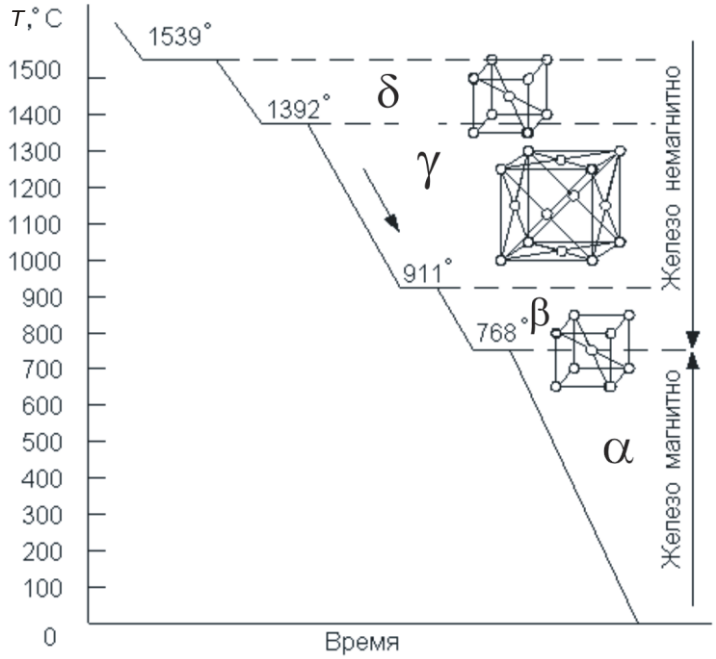


Рис. 2.1. Кривая охлаждения железа

К железоуглеродистым сплавам относят стали и чугуны. Основными элементами, от которых зависят структура и свойства сталей и чугунов, являются железо и углерод.

Железо с углеродом образует сплавы - твердые растворы внедрения и химическое соединение; α–железо растворяет очень мало углерода (до 0,02 % при 727 °С). Твердый раствор углерода и других элементов в α–железе называется ***ферритом***. Феррит имеет низкую твердость и прочность: 80 НВ; σ_B=250 МПа (25 кгс/мм^2) и высокую пластичность (Θ=50 %). γ–железо растворяет значительно большее количество углерода – до 2,14 % при 1147 °С. Твердый раствор углерода и других элементов в γ–железе называется ***аустенитом***. В железоуглеродистых сплавах он может существовать только при высоких температурах. Аустенит пластичен, твердость его 160 – 200 НВ, Θ=40÷50 %.

Железо с углеродом также образует химическое соединение Fe_3C, называемое ***цементитом*** или карбидом железа. В цементите

содержится 6,67 % С; он имеет высокую твердость (~ 800 НВ), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность.

2.2. Диаграмма состояния сплава железо – цементит (Fe–Fe_3C)

Диаграмма состояния Fe–Fe_3C (в упрощенном виде) приведена на рис. 2.2. Анализ диаграммы состояния показывает, что она содержит фрагменты диаграмм состояния сплавов при образовании компонентами механической смеси; твердых растворов внедрения с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии; при образовании компонентами химического соединения.

На этой диаграмме точка *A* (1539 °С) соответствует температуре плавления (затвердевания) железа, а точка *D* (~1600 °С) – температуре плавления (затвердевания) цементита. Линия *ACD* – линия ликвидуса, показывающая температуры начала перехода в твердое состояние (завершения плавления) сталей и чугунов. Линия *AECF* – линия солидуса, показывающая температуры завершения перехода в твердое состояние (начала плавления).

По линии ликвидуса *AC* (при температурах, соответствующих линии *A*С) из жидкого сплава кристаллизуется аустенит, а по линии ликвидуса *CD* – цементит, называемый первичным цементитом.

В точке *C* при 1147°С и содержании 4,3 % С из жидкого сплава одновременно кристаллизуются аустенит и цементит первичный, образуя эвтектику, называемую ***ледебуритом*.** По линии солидуса *AE* сплавы с содержанием до 2,14 % С окончательно затвердевают с образованием аустенита. По линии солидуса *EC* (1147°С) сплавы с содержанием 2,14 – 4,3 % С окончательно затвердевают с образованием эвтектики ледебурита. Так как при более высоких температурах из жидкого сплава выделяется аустенит, то такие сплавы после затвердевания имеют структуру аустенит+ледебурит.

По линии солидуса *CF* (1147 °С) сплавы с содержанием 4,3–6,67 % С окончательно затвердевают также с образованием эвтектики ледебурита.

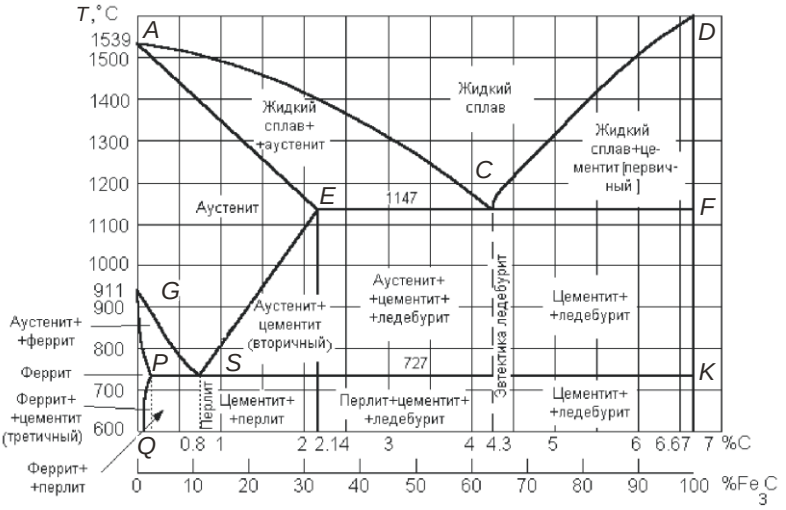


Рис. 2.2. Диаграмма состояния Fe–Fe_3C (в упрощенном виде)

Так как при более высоких температурах из жидкого сплава выделяется цементит (первичный), то такие сплавы после затвердевания имеют структуру первичный цементит+ледебурит.

В результате первичной кристаллизации во всех сплавах с содержанием до 2,14 % С образуется однофазная структура – аустенит. Сплавы железа с углеродом, в которых в результате первичной кристаллизации в равновесных условиях получается аустенитная структура, называют *сталями*. Следовательно, стали – это железоуглеродистые сплавы с содержанием до 2,14 % С. Сплавы с содержанием более 2,14 % С, в которых при кристаллизации образуется ледебурит, называют *чугунами*. Следовательно, чугуны – это железоуглеродистые сплавы с содержанием более 2,14 % С. Излом таких чугунов светлый, блестящий (белый излом), поэтому такие чугуны называют белыми.

В железоуглеродистых сплавах превращения в твердом состоянии характеризуют линии *GSE, PSK, PQ*. Линия *GS* показывает начало превращения аустенита в феррит (при охлаждении). Критические точки, лежащие на линии *GS*, обозначают A_3 (при нагреве Ac_3, а при охлаждении Ar_3). Линия *SE* показывает, что с понижением температуры растворимость углерода в аустените уменьшается. Так, при 1147 °С в аустените может раствориться 2,14 % С, а при 727 °С – 0,8 % С. С понижением температуры из аустенита выделяется

избыточный углерод в виде цементита, называемого вторичным. Критические точки, лежащие на линии *SE*, обозначают *Acm*. В чугунах с содержанием 2,14 – 4,3 % С при 1147 °С, кроме ледебурита, есть аустенит, из которого при понижении температуры тоже выделяется вторичный цементит.

Линия PSK (727 °С) – линия эвтектоидного превращения. На этой линии во всех железоуглеродистых сплавах аустенит распадается, образуя структуру, представляющую собой сплав - механическую смесь феррита и цементита, называемый ***перлитом*** (~200 НВ). Критические точки, лежащие на линии *PSK*, обозначают A_1 (при нагреве Ac_1, а при охлаждении Ar_1).

Линия *PQ* показывает, что с понижением температуры растворимость углерода в феррите уменьшается от 0,02 % при 727 °С до 0,006 % при комнатной температуре. При охлаждении ниже 727 °С из феррита выделяется избыточный углерод в виде цементита, называемого третичным.

Ниже 727 °С железоуглеродистые сплавы имеют следующие структуры.

Стали, содержащие менее 0,8 % С – феррит+перлит, называют ***доэвтектоидными сталями*** (рис. 2.3, а).

Стали с содержанием 0,8 % С – перлит называют ***эвтектоидными сталями*** (рис. 2.3, б).

Стали с содержанием 0,8–2,14 % С – перлит и цементит (вторичный) называют ***заэвтектоидными сталями*** (рис. 2.3, в).

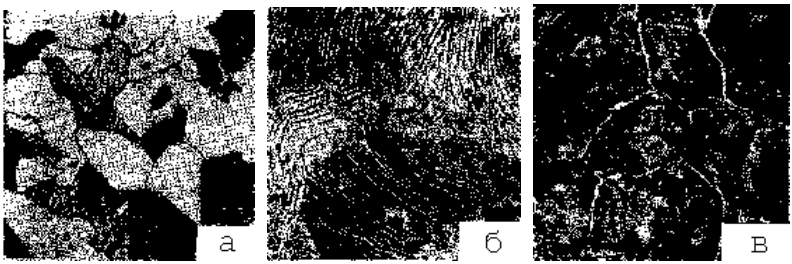


Рис. 2.3. Микроструктура стали: *а* – доэвтектоидная сталь–феррит (светлые участки) и перлит (темные участки), ×500; *б* – эвтектоидная сталь–перлит, × 1000; *в* – заэвтектоидная сталь–перлит и цементит (в виде сетки), × 200 [8]

В рассмотренных выше сплавах, таким образом, имеются три твердые фазы – феррит, цементит и аустенит и эти же фазы в

структурно связанном состоянии: эвтектоид – перлит и эвтектика – ледебурит.

В сплавах железо – углерод при распаде аустенита возможна кристаллизация углерода в свободном состоянии в виде ***графита***.

Графит является неметаллической фазой, он мягок и обладает низкой пластичностью, располагается в основной массе сплава, имеет развитую объемную форму в виде пластинок.

Диаграмма состояния системы железо – цементит используется на практике для определения видов и режимов термической обработки стали с целью придания сплаву необходимых свойств.

2.3. Термическая и химико–термическая обработка стали

Термической обработкой называют процессы, связанные с нагревом и охлаждением, вызывающие изменения внутреннего строения сплава и обусловленные этим изменения физических, механических и других свойств.

Главным в процессах термической обработки является полиморфизм железа и его твердых растворов на основе модификаций железа α– и γ–Fe. В результате полиморфизма происходит изменение кристаллической структуры сплавов в твердом состоянии. Следует отметить, что нагрев или охлаждение однокомпонентного металла (железа) не оказывает значительного влияния на его структуру и свойства. Между тем термическая обработка углеродистой стали при определенных условиях позволяет изменять структуру материала и его физико-механические свойства в широких пределах.

Термической обработке с целью требуемого изменения структуры и свойств (твердости, обрабатываемости и др.) подвергают как полуфабрикаты (заготовки), так и готовые изделия (детали, инструмент). В зависимости от структурного состояния стали, получаемого в результате применения термообработки, последняя подразделяется на отжиг (первого и второго рода), нормализацию, закалку и отпуск [1,2,7,8].

Технологический процесс термообработки включает три последовательно выполняемые операции:

1) нагрев до определенной температуры;
2) выдержку при этой температуре;
3) охлаждение с заданной скоростью.

Для понимания особенностей фазовых превращений, происходящих при термической обработке стали, необходимо

рассмотреть процесс перехода аустенита в перлит. Этот процесс включает четыре этапа.

1. При охлаждении аустенита до температуры 727 °С происходит практически мгновенный полиморфный переход γ–Fe в α–Fe с изменением типа кристаллической решетки с ГЦК на ОЦК. При этом выделяется избыточный углерод, который не успевает диффундировать и остается в решетке железа. В результате образуется сплав – пересыщенный твердый раствор углерода в α–Fe, который носит название ***мартенсит*** (твердость – 62 – 65 НВ). В результате быстрого неравновесного перехода и наличия концентрации углерода, значительно превышающей предел его растворимости в железе при комнатной температуре, ОЦК - элементарные ячейки в кристаллической решетке α–Fe оказываются деформированными, вытянутыми вдоль одного из направлений и уже не кубическими, а тетрагональными.

2. Углерод начинает диффундировать к центрам кристаллизации и образуется смесь кристаллов феррита (α–Fe+C) и цементита (Fe_3C). Линейный размер кристаллов цементита составляет ~10^{-5}мм. Такой сплав называется ***троостит*** (твердость – 40 НВ).

3. Зерна Fe_3C увеличиваются до ~10^{-4}мм, и образуется смесь кристаллов феррита и цементита (α–Fe+C и Fe_3C), которая называется ***сорбитом*** (твердость – 30 НВ).

4. Зерна Fe_3C вырастают до размера, превышающего 10^{-3} мм, и образуется ***перлит*** (твердость – 15 – 20 НВ).

Таким образом, наиболее твердым феррито-цементитным сплавом из указанных является троостит. Структуры аустенита и перлита являются стабильными (равновесными), а мартенсита, троостита и сорбита – неравновесными.

Известно, что если аустенит охлаждать со скоростью 50 град/с, образуется сорбит; при 100 град/с – троостит; при 150 – 200 град/с – мартенсит. При термообработке, вызывающей переход аустенита в мартенсит, плотность стали уменьшается [плотность аустенита – (8,0 – 8,1) г/см^3, мартенсита – 7,8 г/см^3], а линейные размеры и объем увеличиваются. Поэтому после термообработки в материале возникают внутренние механические напряжения.

Отжигом называется процесс термической обработки, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и последующее, как правило, медленное охлаждение (в печи) с целью получения более равновесной структуры стали. В результате отжига устраняются внутренние напряжения, измельчается зерно, повышается пластичность стали.

Отжиг первого рода – это термическая обработка, при которой, как правило, не происходит фазовых превращений (перекристаллизации), а если они имеют место, то не оказывают влияния на конечные результаты, предусмотренные целевым назначением. В зависимости от температурного режима отжиг первого рода устраняет неоднородности химического состава или физических свойств, созданные предшествующими обработками. Разновидностями отжига первого рода являются диффузионный и рекристаллизационный .

Целью ***диффузионного*** отжига (гомогенизации) является выравнивание химического состава и удаление дендритной структуры кристаллов в фасонных отливках и слитках легированной стали. Неоднородность химического состава заготовок повышает анизотропию их свойств и склонность стали, обрабатываемой давлением, к хрупкому разрушению. Диффузионный отжиг производится при температурах 1100 – 1200 °С в течение 30 – 50 ч. Только при таких условиях наиболее эффективно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания состава стали по всему объему. Общая продолжительность процесса, включающего нагрев, выдержку и медленное охлаждение со скоростью 30 – 100 град/ч (обычно вместе с печью), может превышать 100 ч.

Рекристаллизационный отжиг (разновидность ***низкого*** отжига) – термическая обработка холоднодеформированной стали, включающая нагрев выше температуры рекристаллизации, выдержку при этой температуре и последующее охлаждение. Целью рекристаллизационного отжига являются устранение наклепа и образование новых равноосных зерен из деформированных, т.е. получение зерна определенной величины и формы. Наклеп возникает в результате весьма высоких давлений, применяемых при обработке давлением, резанием и пр. Создаются относительные смещения (сдвиги) частей кристаллической решетки, в результате которых зерна поверхностных слоев сплава приобретают вытянутую форму. Рекристаллизационный отжиг применяют как до, так и после холодной обработки давлением для снятия созданных наклепом внутренних напряжений в материале.

Для достижения рекристаллизации по всему объему и сокращения времени процесса температура отжига должна превышать температуру порога рекристаллизации. Для углеродистых сталей (содержащих 0,08 – 0,2 % углерода), чаще подвергаемых холодной

деформации (прокатке, штамповке, волочению), температура отжига составляет 680 – 700 °С, продолжительность – от 0,5 до 1,5 ч.

После отжига зерна поверхностных слоев материала, деформированные и сплющенные после наклепа, восстанавливают нормальную форму. Сталь приобретает мелкозернистое строение, пониженную твердость, повышаются пластичность и обрабатываемость в холодном состоянии.

Целью ***отжига второго рода*** являются фазовые превращения – перекристаллизация стали с достижением практически равновесного структурного (фазового) состояния. Различают следующие разновидности отжига второго рода: полный, неполный, изотермический.

Полному отжигу подвергают доэвтектоидную сталь с целью создания мелкозернистости, понижения твердости и повышения пластичности, снятия внутренних напряжений. Сталь нагревают до температуры на 30 – 50 °С выше точки Ac_3. При нагреве исходная крупнозернистая ферритно–перлитная структура превращается в мелкозернистую структуру аустенита, обеспечивающую высокие вязкость и пластичность стали. Продолжительность выдержки должна быть достаточной для полного прогрева всего объема материала и завершения фазовых превращений. Чрезмерное повышение температуры выше точки Ac_3 вызывает рост зерна аустенита, что ухудшает свойства стали.

При последующем медленном охлаждении из мелкозернистого аустенита образуется мелкая ферритно–перлитная структура. Медленное охлаждение должно обеспечить распад аустенита при малых степенях переохлаждения, чтобы избежать образования излишне дисперсной ферритно–карбидной структуры и свойственной ей высокой твердости.

Скорость охлаждения, необходимая для полного отжига, зависит от устойчивости переохлажденного аустенита, следовательно, от состава стали. В связи с этим легированные стали, отличающиеся высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, охлаждаются значительно медленнее (10 – 100 °С/ч), чем углеродистые (200 – 250 °С/ч).

Заэвтектоидную сталь полному отжигу не подвергают.

Неполному отжигу подвергают заэвтектоидную и эвтектоидную сталь с целью превращения пластинчатого перлита в зернистый. Для получения зернистого перлита заэвтектоидную сталь нагревают до температуры немного выше точки Ac_1 (до 740 – 780 °С). При нагреве

происходит превращение перлита в аустенит, а цементит остается и образуется структура цементит+аустенит.

При последующем медленном охлаждении из аустенита образуется ферритно–цементитная структура с зернистой формой цементита – зернистый перлит. Заэвтектоидные (инструментальные) стали подвергают только неполному отжигу для снижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием, а также для подготовки структуры к закалке.

Изотермический отжиг обычно применяют для легированных сталей с целью полного распада аустенита и образования ферритно–перлитной структуры. Нагрев осуществляется при температуре, применяемой для полного отжига. Затем производят сравнительно быстрое охлаждение (переносом в другую печь) до температуры, лежащей ниже точки Ac_1 (~650 °С), и начинают изотермическую выдержку, необходимую для полного распада аустенита, после чего следует охлаждение на воздухе.

Преимущество изотермического отжига состоит в снижении продолжительности процесса по сравнению с полным отжигом. При выборе температуры выдержки изотермического отжига, близкой к температуре минимальной устойчивости переохлажденного аустенита в перлитной области, достигается минимальное время процесса. Другим преимуществом отжига является получение более однородной структуры материала.

Изотермический отжиг улучшает обрабатываемость стали резанием и чистоту поверхности, уменьшает склонность к деформации при последующих термической и (или) химико–термической обработках.

Нормализация – это термическая обработка, включающая нагрев до температуры на 30 – 50 градусов выше критических точек Ac_3 для доэвтектоидной стали и Acm для эвтектоидной стали, выдержку при этой температуре и охлаждение на воздухе.

Вследствие более быстрого охлаждения, чем при полном отжиге, структура перлита после нормализации является такой же, как после полного отжига, но более дисперсной (тоньше пластинки ферритоцементитной смеси).

Цель нормализации доэвтектоидных и эвтектоидных сталей та же, что и полного отжига. Однако после нормализации твердость и прочность стали выше, чем после полного отжига. Нормализация применяется обычно для исправления структуры перегретой и литой стали, измельчения зерна, смягчения стали перед обработкой и резанием, подготовки к закалке, устранения сетки вторичного

цементита в заэвтектоидной стали [30]. Нормализация по сравнению с отжигом – более экономичная операция, так как не требует длительного охлаждения вместе с печью.

Закалка стали применяется для значительного повышения прочности и твердости материала. Закалка доэвтектоидных сталей (***полная закалка***) производится нагреванием на 30 – 50 градусов выше температур, соответствующих линии аустенитного превращения (*GSK*) диаграммы состояния Fe–Fe_3C (рис. 2.2); затем осуществляется выдержка в течение необходимого времени. Охлаждение после закалки проводится с высокой скоростью 100 – 500 град/с. Основным и решающим фактором, определяющим структуру и физико–механические свойства закаленной стали, является именно скорость охлаждения. Для эвтектоидных и заэвтектоидных сталей аналогично неполному отжигу применяют ***неполную закалку***, т. е. нагрев производится до температуры немного выше точки Ac_1 (до 740 – 780 °С). Важное значение имеет ***прокаливаемость*** материала – способность закаляться на определенную глубину.

Особое значение для закалки имеет скорость охлаждения в интервале температур, где аустенит менее всего устойчив (650 – 550 °С). Обычно этот интервал температур при закалке необходимо пройти быстро. Важное значение имеет скорость охлаждения и в интервале температур 300 – 200 °С, когда во многих сталях происходит образование мартенсита. В этом интервале требуется более медленное охлаждение во избежание возникновения напряжений и закалочных трещин.

На практике применяют следующие охлаждающие среды: вода, 10 %-ные растворы NaCl, H_2SO_3, Na_2CO_3 в воде, машинное масло, трансформаторное масло, эмульсия масла в воде, мыльная вода, керосин, воздух.

Углеродистые стали, имеющие высокую критическую скорость закалки, охлаждают (закаливают) в воде, а легированные стали, имеющие более низкую критическую скорость закалки, охлаждают в масле, где охлаждение происходит медленнее. Недостатками масла как охлаждающей среды являются его легкая воспламеняемость и относительно высокая стоимость. С понижением температуры охлаждающей среды закалка стали становится более резкой.

Существуют следующие способы закалки: в одном охладителе; в двух средах; с подстуживанием (перед погружением в охладитель материал некоторое время выдерживают на воздухе); ступенчатая; изотермическая закалка и др.

Существует метод поверхностной закалки – нагревание за счет теплового действия электрического тока, индуцируемого в поверхностных слоях материала при помещении его в электромагнитное поле высокой частоты.

Кроме высоких прочности и твердости, закаленная сталь приобретает и повышенную хрупкость. В основном закалке подвергают низкоуглеродистые стали.

Отпуском называют нагрев закаленной стали до температуры ниже критической точки Ac_1 с выдержкой при этой температуре и с последующим сравнительно медленным охлаждением на воздухе. Целью отпуска являются частичное или полное устранение внутренних напряжений, снижение твердости и повышение вязкости.

Отпуск является заключительной операцией термической обработки стали. Основными факторами, влияющими на свойства стали после отпуска, являются температура нагрева и продолжительность выдержки. В зависимости от значения температуры отпуск разделяют на низко– и высокотемпературный.

Цель ***низкотемпературного*** отпуска, проводимого при 150 – 250 °С, – уменьшение внутренних напряжений в закаленной детали без снижения твердости. Отпуск проводят в масляных или солевых ваннах. Низкотемпературный (низкий) отпуск называют также отпуском на мартенсит.

Среднетемпературный (средний) отпуск – отпуск на троостит – происходит при нагреве до температур 350 – 450 °С. При этом снижается твердость стали.

Высокотемпературный (высокий) отпуск – отпуск на сорбит – производится при температуре 500 – 650 °С. Применяют в машиностроении для изделий из конструкционной стали с целью обеспечения достаточной прочности, вязкости и пластичности. Сочетание закалки с высоким отпуском на сорбит называется ***улучшением*** стали. Эту операцию применяют для среднеуглеродистых сталей (0,35 – 0,60 % С).

Химико–термическая обработка стали – это процесс, представляющий собой сочетание термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали.

При химико–термической обработке протекают следующие процессы [8]: распад молекул во внешней среде и образование атомов диффундирующего элемента (диссоциация); поглощение атомов поверхностью стали (адсорбция); проникновение атомов в глубь стали (диффузия).

Химико–термическая обработка позволяет получить стальную деталь с твердым поверхностным слоем и мягкой сердцевиной.

Диффузионное насыщение поверхности деталей проводят различными элементами: углеродом, азотом, хромом, кремнием, бором и др.

Цементация – процесс химико–термической обработки, представляющей собой диффузионное насыщение поверхностного слоя стали углеродом. В поверхностном слое содержание углерода составляет 0,8 – 1,0 %.

Цементацию проводят в твердых, жидких и газообразных средах, называемых карбюризаторами. В качестве твердого карбюризатора применяют древесный уголь с добавлением углекислых солей ($BaCO_3$, Na_2CO_3 и др.). Жидкие карбюризаторы (смесь цианистого калия с бурой, содой и другими веществами) применяют в случаях, когда нужно получить тонкий цементированный слой с высоким содержанием углерода. Газовую цементацию проводят при нагреве деталей до 900 – 950 °С в специальных герметически закрытых печах, в которые непрерывным потоком подают цементирующий углеродсодержащий газ (метан, бензол и др.).

Цементированные детали (зубчатые колеса, ролики подшипников и др.) подвергают термической обработке, наиболее часто – закалке при 820 – 850 °С и отпуску.

Азотирование – процесс химико–термической обработки, представляющий собой диффузионное насыщение поверхностного слоя стали азотом. Цель азотирования – получение поверхности деталей высокой твердости и износостойкости или устойчивости против коррозии (антикоррозионное азотирование).

Для азотирования детали нагревают (до 500 – 700 °С) в специальной герметически закрытой печи, через которую пропускают аммиак NH_3. Образовавшийся свободный азот, находящийся в атомарном состоянии, воздействует на сталь и образует с элементами, входящими в ее состав (Fe, Cr, Al), нитриды, придающие поверхностному слою очень высокую твердость. Недостаток азотирования – длительность процесса (до 90 ч). Азотированию подвергают цилиндры моторов и насосов, зубчатые колеса, штампы, пуансоны и др. Антикоррозионному азотированию подвергают в основном углеродистые стали при 600 – 700 °С с выдержкой в течение 0,5 – 1 ч.

Поверхностное насыщение стали одновременно углеродом и азотом в расплавленной цианистой соли называют *цианированием*, а в газовой среде – ***нитроцементацией***. Цель этих процессов –

получение высокой твердости и износостойкости поверхности деталей. Процессы проводятся при температуре 820 – 960 °С, их продолжительность 1,5 – 6,0 ч. Затем детали (широкой номенклатуры) охлаждают на воздухе, подвергают закалке и отпуску.

Борированием называется химико–термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагревании в соответствующей среде. Обычно борирование выполняют при электролизе расплавленной буры ($Na_2B_4O_7$), при этом стальное изделие является катодом. Процесс проводят при температуре 930 – 950 °С в течение 2 – 6 ч. В результате борирования износостойкость деталей возрастает в 2 – 6 раз.

Диффузионное насыщение металлами (алюминием, хромом и др.) и металлоидами (кремнием, бором и др.), называемое ***диффузионной металлизацией***, проводят с целью повышения жаростойкости, коррозионной стойкости, твердости и износостойкости стальных деталей. Насыщение при 1000 – 1200 °С проводят в твердых, жидких и газовых средах.

2.4. Влияние примесей на свойства сталей

Как указывалось выше, сталью называют сплав железа с углеродом и другими элементами с содержанием углерода до 2,14 % (точка *E* на рис. 2.2).

На свойства стали значительное влияние оказывают постоянные (нежелательные) примеси (сера, фосфор, газы), а также технологические добавки (кремний, марганец и др.). Примеси могут попадать в сплав из исходных компонентов (коксующегося угля и руд), а также при переработке металлолома. Основным элементом сплава, по отношению к которому все остальные элементы – примеси, является тот, чья атомная решетка определяет кристаллографическое строение всего сплава. Пока содержание элементов в стали таково, что кристаллографическое строение сплава определяется решеткой железа, сплав называется легированной ***сталью***. Когда содержание элементов достигает таких значений, что строение сплава определяется решеткой добавочных элементов, а не железа, то говорят уже о ***сплаве,*** в состав которого входит железо (титановом, никелевом и др.).

Если сталь имеет в своем составе железо, углерод и некоторое количество постоянных примесей (S, P, Si, Mn, газы), то такую сталь называют ***углеродистой.*** Если в процессе выплавки углеродистой стали к ней добавляют легирующие элементы (Cr, Ni, W, Mo и др.), а

также Mn и Si в повышенном количестве (более 0,8 – 1,0 %), то такую сталь называют ***легированной***.

Углерод оказывает основное влияние на свойства углеродистой стали, он находится в ее составе главным образом в связанном состоянии в виде цементита. В свободном состоянии в виде графита он содержится в чугунах. С увеличением содержания углерода в стали повышаются ее твердость и прочность, уменьшаются пластичность и вязкость.

Сера является нежелательной примесью, образует с железом сульфид железа FeS, который находится в стали в виде эвтектики Fe–FeS с температурой плавления 985 °С. При нагреве стали до температуры 1000 – 1200 °С для горячей обработки давлением эвтектика плавится, сера кристаллизуется на границах зерен. Это приводит к нарушению связи между зернами, повышению хрупкости, разрушению при деформации вследствие образования внутренних трещин и надрывов. Это явление называют *красноломкостью***.** Содержание серы в стали не должно превышать 0,06 %.

Фосфор растворяется в модификациях железа α– и γ–Fe, искажает кристаллическую решетку и ухудшает пластичность стали. Фосфор вызывает явление *хладноломкости*, является нежелательной примесью, содержание которой в сталях должно быть менее 0,08 %.

Азот, кислород присутствуют в сплавах в составе оксидов, нитридов – хрупких неметаллических соединений (включений), которые создают дефекты кристаллической структуры. Они являются концентраторами напряжений и могут понизить механические свойства (прочность, пластичность).

Водород поглощается сталью в атомарном состоянии. При охлаждении сплава растворимость водорода снижается, он накапливается в микропорах под высоким давлением. Это может привести к образованию в материале внутренних надрывов (флокенов).

Марганец и кремний – технологические добавки, которые вводят в сталь при выплавке. Марганец существенно снижает красноломкость стали, образует пластичный MnS с температурой плавления 1620 °С. Марганец увеличивает твердость, прочность и износостойкость стали, при его содержании более 1,5 % снижается пластичность стали.

Кремний связывает закись железа (FeO) с образованием силикатов ($FeO \cdot SiO_2$), которые удаляются вместе со шлаками. Кроме того, кремний понижает склонность стали к хладноломкости, способствует получению более однородной структуры, положительно

сказывается на упругих характеристиках. Кремний способствует изменению магнитных свойств стали, а при содержании его в количестве 15 – 20 % придает материалу кислотоупорность. Обычное содержание кремния в углеродистой стали – не более 0,4 %, марганца – 0,8 %.

2.5. Классификация и маркировка сталей

Стали классифицируют по назначению, химическому составу и качеству (рис. 2.4). По ***назначению*** стали подразделяются на конструкционные, инструментальные и стали с особыми физико–химическими свойствами. По ***химическому составу*** различают стали углеродистые и легированные.

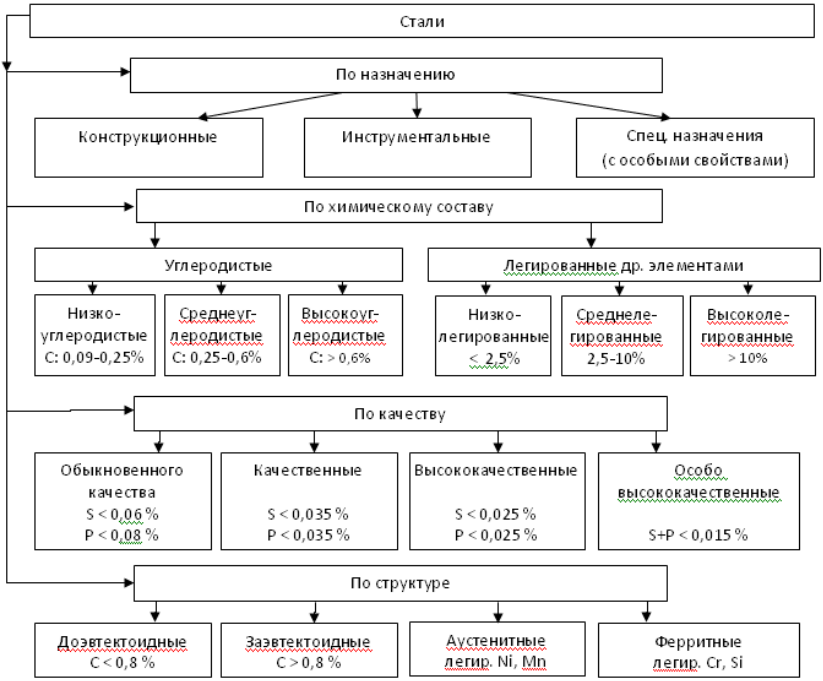


Рис. 2.4. Классификация сталей

Конструкционные стали применяют для изготовления деталей машин и конструкций; ***инструментальные*** – для режущих, измерительных инструментов, штампов и т.д. К сталям и сплавам ***с особыми свойствами*** относят жаропрочные, коррозионно–стойкие,

магнитные и др. Они нашли широкое применение в приборостроении, в том числе в медицинской технике.

По ***качеству*** различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. При этом учитываются способ выплавки и содержание серы и фосфора [1,2,8]. Следует помнить, что лишь углеродистые конструкционные стали выпускаются промышленностью обыкновенного качества. Стали инструментальные и специального назначения, а также все марки легированных сталей выпускаются качественными, высококачественными и особо высококачественными.

Стали ***обыкновенного*** качества имеют повышенное содержание нежелательных примесей – до 0,06 % серы и до 0,08 % фосфора, их механические свойства ниже, чем у сталей других групп. ***Качественные*** стали содержат серу и фосфор в концентрации менее 0,035 % каждого элемента. ***Высококачественные*** стали, выплавляемые в электропечах, содержат менее 0,025 % и серы, и фосфора. ***Особо высококачественные*** стали, подвергнутые электрошлаковому переплаву с вакуумированием, содержат серу и фосфор в суммарной концентрации, не превышающей 0,015 %.

Углеродистые стали

В зависимости от содержания углерода стали делятся на низкоуглеродистые с содержанием углерода 0,09 – 0,25 %, среднеуглеродистые с содержанием 0,25 – 0,60 % углерода и высокоуглеродистые с содержанием более 0,60 % углерода.

Углеродистые ***конструкционные*** стали ***обыкновенного качества*** являются наиболее дешевыми и широко применяются в тех случаях, когда к материалу не предъявляются повышенные требования. По сравнению с качественными сталями они содержат больше серы, фосфора, неметаллических включений вследствие менее тщательной очистки в процессе выплавки. Из углеродистых конструкционных сталей обыкновенного качества изготавливают балки, прутки, листы, трубы; сварные, клепаные и болтовые конструкции (балки, фермы, детали подъемных кранов и др.); малонапряженные детали машин (оси, валы, шестерни, втулки, валики, болты и др.). Детали машин часто упрочняются с помощью термической обработки.

Марки ***углеродистой конструкционной*** стали ***обыкновенного качества*** обозначаются буквами и цифрами, например Ст0, …, Ст6, БСт0,…, БСт6, ВСт0, …, ВСт6. Буквы Ст обозначают сталь, цифры от 0 до 6 – условный номер марки в зависимости от химического состава

и механических свойств. Чем больше число, тем больше содержание углерода в стали, выше прочность и ниже пластичность.

В зависимости от гарантируемых химического состава и свойств углеродистые стали обыкновенного качества делят на три группы: А, Б, В (группа А в **начале** написания **марки** стали не указывается). Сталь группы А имеет гарантированные механические свойства и не подвергается горячей обработке. Для стали группы Б гарантируется химический состав, сталь подвергается обработке давлением; для стали группы В гарантируются химический состав и механические свойства (используется для сварных конструкций).

К ***углеродистым качественным конструкционным*** сталям предъявляются повышенные требования по химическому составу и механическим свойствам. Эти стали выплавляются кислородно–конвертерным способом в мартеновских или электропечах.

Качественные углеродистые стали маркируют цифрами: 05, 08, 10, 15, 20, …, 85, которые указывают среднее содержание углерода в ***сотых долях процента***. Такие стали делят на несколько групп.

Низкоуглеродистые качественные стали 05, …, 10 (без термической обработки) хорошо обрабатываются давлением в холодном состоянии вследствие их высокой пластичности, а также хорошо свариваются вследствие малого содержания углерода. Они используются для производства малонагруженных деталей машин и сварных конструкций.

Стали 15, 20, 25, составляющие вторую группу низкоуглеродистых качественных сталей, хорошо свариваются и обрабатываются резанием. Их применяют без термической обработки или в нормализованном состоянии для изготовления неответственных деталей машин, после цементации – для изготовления деталей с повышенной износостойкостью (кулачковые валики, кронштейны и др.).

Самой значительной является группа среднеуглеродистых сталей 30, 35, 40, 45, 50, подвергающихся термической обработке. Они хорошо обрабатываются на металлорежущих станках в отожженном состоянии. Сочетание высоких прочностных и пластических свойств позволяет применять эти стали для изготовления ответственных деталей машин (шпиндели, распределительные валы и др.).

Высокоуглеродистые стали 60, 65, 70, 75, 80 и 85 подвергаются различным видам термической обработки, в результате чего они приобретают высокую прочность, износостойкость и упругие свойства. Применяются для изготовления пружин, рессор, замковых шайб и др.

Углеродистые инструментальные стали маркируют следующим образом: впереди ставят букву У, затем цифру – среднее содержание углерода, выраженное в ***десятых*** долях процента. Например, сталь марки У9 содержит в среднем 0,9 % С, сталь У11 содержит 1,1 % С.

Для обозначения высококачественных сталей ***в конце марки*** ставится буква А, а особо высококачественных сталей – буква Ш (выплавленных, например, методом электрошлакового переплава с вакуумированием). В марках некоторых сталей специального назначения буква впереди указывает на назначение: А – автоматная сталь (А30), Р – быстрорежущая сталь (Р12), Ш – шарикоподшипниковая (ШХ15, ШХ20СГ и др. - конструкционные легированные стали специального назначения, маркировка которых рассмотрена далее).

Легированные стали

Легированными называют стали, в которых, кроме железа, углерода, случайных примесей и технологических добавок, содержатся легирующие элементы для придания сталям специальных свойств. Основными легирующими элементами являются марганец, кремний, хром, никель, вольфрам, молибден и др.

Легированные стали делят на *низколегированные* с общим содержанием легирующих элементов до 2,5 %, *среднелегированные* – до 2,5 – 10,0 % и *высоколегированные* – более 10 %.

Основной целью легирования является изменение строения стали и ее физико–механических свойств. Легированием можно повысить твердость стали, сопротивление износу и коррозии и т.д. В зависимости от входящих в состав сталей легирующих элементов их называют хромистыми, хромоникелевыми, ванадиевыми и т.п.

Влияние легирующих элементов на свойства стали определяется их концентрацией и особенностями взаимодействия с железом и углеродом. При взаимодействии с железом легирующие компоненты обычно образуют твердые растворы или химические соединения, а при взаимодействии с углеродом они находятся в связанном или свободном состоянии.

При образовании сплавов - твердых растворов замещения железа с легирующими компонентами возможна как полная (Ni, Co), так и ограниченная растворимость (Cr, W, Mo). Если введенное в сталь количество примесей превышает предел растворимости, то избыток образует с железом сплавы - химические соединения: FeCr, Fe_3W_2, Fe_3Mo_2 и т.д. При образовании сплавов - твердых растворов

изменяются все свойства исходного материала, особенно физические и механические. При образовании сплавов - химических соединений изменяются главным образом механические свойства стали.

Легирующие компоненты Mn, Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, Zr и др. образуют с углеродом устойчивые карбиды Mn_3C, Cr_4C_3, WC_2, Mo_2C, VC, TiC, NbC, TaC, ZrC, повышающие предел прочности и твердость стали. Все легирующие компоненты, за исключением Mn, при нагревании стали задерживают рост зерна аустенита, что позволяет подвергать легированные стали обработке давлением, не опасаясь перегрева.

Легирующие элементы оказывают влияние и на другие свойства стали: Ni, V, Co повышают вязкость; Mn, Ni, Cr увеличивают стойкость к истиранию; Ni, Cr, Cu, Si, Mo и др. повышают коррозионную стойкость.

По структуре легированные стали в отожженном состоянии разделяют на следующие группы: доэвтектоидные (содержащие избыточный феррит), эвтектоидные (имеющие перлитную структуру), заэвтектоидные (в структуру входят избыточные вторичные карбиды) и ледебуритные (составной частью структуры являются первичные карбиды).

По структуре в нормализованном состоянии легированные стали делят на три класса:

1) перлитные (содержание легирующих компонентов до 5 %);
2) мартенситные (содержание легирующих компонентов от 5 до 13 %);
3) аустенитные (содержание легирующих компонентов до 20 – 30 %).

Наиболее распространенными являются легированные стали доэвтектоидные, эвтектоидные и перлитные, к которым относятся низко– и среднелегированные конструкционные и инструментальные стали. Стали мартенситные, ферритные, ледебуритные и заэвтектоидные являются высоколегированными.

Качественные, высококачественные и особо высококачественные стали маркируют следующим образом. Содержание углерода указывают в начале марки цифрой, соответствующей его содержанию в сотых долях процента для конструкционных сталей и в десятых долях процента для инструментальных сталей. Содержание углерода в марке стали не указывается, если оно составляет около 1 %.

Легирующие элементы указывают русскими буквами: марганец – Г, кремний – С, хром – Х, никель – Н, вольфрам – В, ванадий – Ф,

титан – Т, молибден – М, кобальт – К, алюминий – Ю, медь – Д, бор – Р, ниобий – Б, цирконий – Ц, азот – А.

Цифры, следующие после букв, указывают среднее содержание легирующего элемента в целых процентах; отсутствие цифры указывает на то, что сталь содержит менее 1,5 % указанного элемента. Исключением являются вольфрам и молибден – для них процентное содержание всегда указывается.

Для высококачественных конструкционных сталей в конце марки ставят букву А. Например, сталь 12Х2Н4 – качественная конструкционная с содержанием 0,12 % углерода, 2 % хрома и 4 % никеля; сталь 12Х2Н4А – высококачественная такого же состава. В конце марки стали особо высокого качества (электрошлакового переплава) стоит буква Ш.

Все стали инструментальные легированные и с особыми свойствами всегда высококачественные, поэтому в конце марки этих сталей буква А не ставится.

Всего существует более 90 марок ***легированных конструкционных*** сталей, большинство из которых являются среднеуглеродистыми (содержат 0,25 – 0,45 % углерода); их делят на цементируемые, улучшаемые и высокопрочные.

Для тяжело нагруженных деталей небольших размеров (зубчатые колеса, оси и др.) применяют низкоуглеродистые *цементируемые* легированные стали марок 20Х, 12Х2Н4А и др. После цементации, закалки в воде и низкого отпуска поверхность деталей приобретает высокую твердость, а сердцевина не упрочняется.

Улучшаемые среднеуглеродистые легированные стали – это стали, подвергаемые улучшению путем термической обработки, состоящей в закалке от температуры 820 – 880 °С в масле с последующим высоким отпуском (550 – 650 °С). Для тяжело нагруженных деталей больших размеров применяют легированные стали марок 40ХН, 30ХГСА и др.

Для деталей с высоким пределом прочности ($\sigma_В$=1500–2500 МПа) используют *высокопрочные* стали на основе железа, легированного никелем, кобальтом, титаном, молибденом, хромом и другими элементами – это марки Н12К15М10, Н18К9М5Т и др. Такие стали называются мартенситностареющими, их закаливают от температуры 800 – 860 °С на воздухе с последующим старением при 450 – 500 °С. Применяют их для особо ответственных тяжело нагруженных деталей.

К конструкционным легированным сталям относятся также износостойкие, рессорно–пружинные, шарикоподшипниковые и др.

Основными свойствами ***инструментальных легированных*** сталей являются твердость, вязкость, износостойкость, теплостойкость (красностойкость), прокаливаемость. Инструментальные стали делят на углеродистые (рассмотренные ранее), легированные и быстрорежущие.

Инструменты из легированных сталей после закалки, как правило, в масле и низкого отпуска имеют высокую твердость, отличаются повышенной вязкостью, меньшей склонностью к деформациям и трещинообразованию при закалке. Из легированных инструментальных сталей марок 9ХС, ХВГ, В1, ХВ5 и других изготавливают различные режущие инструменты, имеющие сложную конфигурацию.

При изготовлении штампов для горячей обработки металлов применяют легированные инструментальные стали сложного состава 4Х2В5ФМ, 4Х3ВФ2М2, 3Х2В8Ф и др.

Быстрорежущие стали широко используют для изготовления режущего инструмента, обладающего большой твердостью и работающего при высоких скоростях резания. Быстрорежущая сталь относится к ледебуритному (карбидному) классу сталей. В ее состав входят карбидообразующие элементы – хром, вольфрам, ванадий, кобальт, молибден.

Высокие режущие свойства инструментов, изготовленных из быстрорежущих сталей марок Р6, Р9, Р12, Р18 (цифра после буквы показывает среднее содержание вольфрама в процентах), получают после закалки от температуры 1210 – 1290 °С в зависимости от марки стали с последующим отпуском. Режущие свойства инструментов повышают также с помощью цианирования.

2.6. Классификация, свойства и маркировка чугунов

Сплавы железа с углеродом, содержащие > 2,14 % С, называют чугунами. Присутствие эвтектики в структуре чугуна (см. рис. 2.2) обусловливает его использование исключительно в качестве литейного сплава для деталей, применяемых при относительно невысоких напряжениях и малых динамических нагрузках. Преимущества чугуна – высокие литейные свойства и небольшая стоимость (по сравнению со сталью). Температуры плавления чугунов ниже, чем у сталей, что облегчает процесс литья. Например, температура плавления серого чугуна составляет 1100 – 1250 ^{o}С в зависимости от содержания углерода, что в среднем на 300 ^{o}С ниже, чем температура плавления железа, и на 250 – 300 ^{o}С ниже, чем

температура плавления сталей. С повышением содержания углерода температура плавления уменьшается, а жидкотекучесть увеличивается. Ликвация в чугунах также меньше, чем у стали. Кроме того, чугуны, в структуре которых при затвердевании образуется графит (фаза с большим удельным объемом, чем у металлической основы), имеют низкий коэффициент усадки, приближающийся к аналогичной характеристике оловянных бронз.

Чугуны с графитом как мягкой и хрупкой составляющей хорошо обрабатываются резанием (с образованием ломкой стружки) и образуют более чистую поверхность, чем стали (кроме автоматных). Чугуны имеют повышенное содержание углерода (2,2 – 4 %) и кремния (0,8 – 2 %) – элементов, способствующих графитизации. Однако в марках чугуна химический состав не указывается, так как (в отличие от большинства других металлических сплавов) этот признак не характеризует в достаточной степени их свойства, а следовательно, и область применения. Структура и свойства чугунов зависят главным образом от условий получения отливки (температуры жидкого металла, введения модификаторов) и особенно значительно – от условий охлаждения при литье. Поэтому при одинаковом химическом составе чугун может иметь сильно отличающиеся структуру и свойства (например, белый и серый чугуны).

Механические свойства чугуна, определяющие область его применения, в значительно большей степени характеризуются его структурой: формой и размерами выделения графита; строением металлической основы.

Углерод в чугуне может находиться в виде цементита или графита или одновременно в виде цементита и графита. Цементит придает излому чугуна специфический светлый блеск. Поэтому чугун, в котором весь углерод находится в виде цементита, называют белым. Графит придает излому чугуна серый цвет, поэтому такой чугун называют серым чугуном. В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкий.

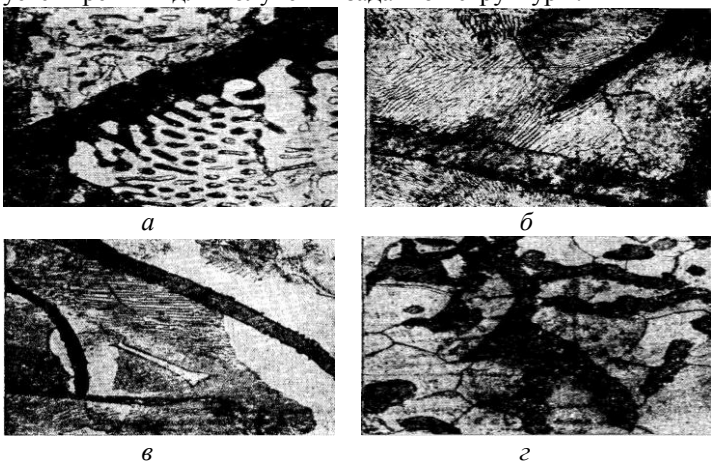
Серый и белый чугуны

Серый чугун – технический. Серый чугун представляет собой сплав Fe–Si–C, содержащий в качестве примесей Mn, P и S. В структуре серого чугуна большая часть или весь углерод находится в виде графита. Характерная особенность структуры серых чугунов, определяющая многие их свойства, заключается в том, что графит

имеет в поле зрения микрошлифа форму пластинок (рис. 2.5). Наиболее широкое применение получили доэвтектические чугуны (рис. 2.2) , содержащие 2,4 – 3,8 % С. Чем выше содержание в чугуне углерода, тем больше образуется в нем графита и тем ниже его механические свойства. Поэтому количество углерода в чугуне обычно не превышает 3,8 %. В то же время для обеспечения высоких литейных свойств (хорошей жидкотекучести) углерода в чугуне должно быть не меньше 2,4 %.

Кремний, содержание которого в сером чугуне чаще всего находится в пределах 1,2 – 3,5 %, оказывает большое влияние на строение, а следовательно, и на свойства чугунов.

Кремний способствует процессу графитизации, действует в том же направлении, что и замедление скорости охлаждения. Изменяя, с одной стороны, содержание в чугуне углерода и кремния, с другой – скорость охлаждения, можно получить различную структуру металлической основы чугуна. При конкретном содержании углерода – чем больше в чугуне кремния, тем полнее протекает процесс графитизации. Чем больше в чугуне углерода, тем меньше требуется кремния для получения заданной структуры.



а *б* *в* *г*

Рис. 2.5. Микроструктура серого чугуна: *а* – чугун со структурой ледебурит – перлит – графит; *б* – перлитный чугун; *в* – феррито-перлитный чугун; *г* – ферритный чугун

В соответствии с ГОСТами 1985 г. чугуны маркируют двумя буквами и двумя цифрами, соответствующими минимальному значению предела прочности при растяжении:

- серый чугун обозначают буквами "СЧ" (ГОСТ 1412-85);
- высокопрочный - "ВЧ" (ГОСТ 7293-85);
- ковкий - "КЧ" (ГОСТ 1215-85).

Примеры:

СЧ10 - серый чугун с пределом прочности при растяжении 100 МПа;
ВЧ70 - высокопрочный чугун с пределом прочности при растяжении 700 МПа;
КЧ35 - ковкий чугун с пределом прочности при растяжении примерно 350 МПа.

В технической литературе, а также в чертежах и технологических картах на литье чугунов, до сих пор широко используются ГОСТы 1979 г. [2], в соответствии с которыми первые цифры марки чугуна указывают среднюю величину предела прочности при растяжении, а вторые – предела прочности при испытании на изгиб. Например, *ферритные и феррито-перлитные чугуны* (СЧ12 – 28, СЧ15 – 32, СЧ18 – 36) имеют предел прочности при растяжении 120 – 180 и при изгибе 280 – 360 МПа. Их примерный состав: 3,1 – 3,6 % C; 1,8 – 2,7 % Si; 0,5 – 0,8 % Mn; 0,3 – 0,65 % P; 0,12 – 0,15 % S (химический состав устанавливают в зависимости от толщины стенок отливки). Структура чугунов – перлит, феррит и графит грубый (СЧ12 – 28). Эти чугуны применяют для малоответственных деталей, испытывающих небольшие нагрузки в работе. Например, чугун СЧ12 – 28 используют для строительных колонн, фундаментных плит, а чугуны СЧ15 – 32 и СЧ18 – 36 – для литых малонагруженных деталей сельскохозяйственных машин, станков, автомобилей и тракторов, арматуры и т. д.

Отливки из серого чугуна получают в земляных и металлических (чугунных) формах – кокилях. С увеличением толщины отливки и, следовательно, с замедлением охлаждения и при повышенном содержании кремния образуется больше графита и его пластинки крупнее, а в металлической основе возрастает количество феррита. У отливок меньших размеров и при несколько пониженном содержании кремния (или соответственно при более высоком содержании марганца) количество графита уменьшается, а металлическая основа становится феррито-перлитной и перлитной, что повышает прочность. Из-за сравнительной простоты отливки серые чугуны ранее были самым распространенным видом. Однако их механические свойства

(особенно пластичность) ниже, чем у других чугунов с графитом (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1.

Маркировка и свойства чугунов) [1]

Марка сплава	Предел прочности, МПа, (кгс/мм^2) при		Относительное удлинение Θ, % не менее	Назначение
	растяжении	изгибе		
	не мене			
1. Серые чугуны (графит пластинчатой формы)				
Ферритные				
СЧ 10 СЧ 15	98 (10) 147 (15)	274 (28) 314 (32)	1 1	Детали неответственного назначения (крышки, шкивы и т.п.)
Феррито-перлитные				
СЧ 18 СЧ 20	176 (18) 196 (20)	358 (36) 392 (40)	1 1	Станины станков и механизмов, поршни, цилиндры
Перлитные				
СЧ 25 СЧ 30 СЧ 35	245 (25) 294 (30) 343 (35)	451 (45) 490 (50) 539 (55)	1 1 1	Детали, работающие на износ: тормозные барабаны, цилиндры шестерни
2. Ковкие чугуны (графит хлопьевидной формы)				
Ферритные				
КЧ 35-10 КЧ 37-12	333 (35) 362 (37)	— —	10 12	Фланцы, муфты
Феррито-перлитные				
КЧ 45-6	441 (45)	—	7	Задний мост, картер автомобиля, ступицы
3. Высокопрочные (магниевые) чугуны (графит шаровидной формы)				
Ферритные				
ВЧ 45-5 [3]	441 (45)	—	5	Траверсы прессов, фланцы, цилиндры, шестерни
Перлитные				
ВЧ 50-2	490 (50)	—	2	Цилиндры, поршни

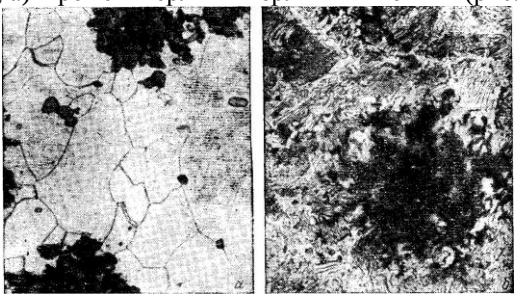
Окончание таблицы 2.1

4. Отбеленный чугун (цементит и перлит в поверхностном слое) 300—450 НВ				
—	—	—	—	Прокатные валки, рабочие части размольного оборудования, колеса неответственного назначения

В структуре доэвтектического белого чугуна, наряду с перлитом и вторичным цементитом, присутствует хрупкая эвтектика (ледебурит), количество которой достигает 100 % в эвтектическом чугуне. Структура заэвтектического чугуна состоит из эвтектики (ледебурит) и первичного цементита, выделяющегося при кристаллизации из жидкой фазы в виде крупных пластин. При высокой износостойкости и твердости белый чугун отличается плохой обрабатываемостью резанием; имеет сильно сниженные механические свойства и почти не применяется.

Ковкий чугун

Ковкий чугун получают длительным нагревом при высоких температурах (отжигом) отливок из белого чугуна. В результате отжига образуется графит хлопьевидной формы (см. рис. 2.6). Такой графит по сравнению с пластинчатым обусловливает более высокие механические свойства чугуна, прежде всего – пластичность. Металлическая основа ковкого чугуна: феррит – ферритный ковкий чугун (рис. 2.6, а) и реже – перлит – перлитный ковкий (рис. 2.6, б).



а *б*

Рис. 2.6. Микроструктура ковкого чугуна: *а* – ферритный чугун; *б* – перлитный чугун, х 500 [8]

Наибольшей пластичностью обладает ферритный ковкий чугун, который применяют в машиностроении.

Химический состав белого чугуна, отжигаемого на ковкий чугун, выбирают в пределах: 2,5 – 3,0 % C; 0,7 – 1,5 % Si; 0,3 – 1,0 % Mn; ≤0,12 % S и ≤ 0,18 % P (в зависимости от требуемой структуры металлической основы). Ковкий чугун имеет пониженное содержание углерода и кремния. Более низкое содержание углерода способствует повышению пластичности, так как при этом уменьшается количество графита, выделяющегося при отжиге, а пониженное содержание кремния исключает выделение пластинчатого графита в структуре отливок при охлаждении.

Толщина сечения отливки не должна превышать 40 – 50 мм. При большем размере отливок в сердцевине образуется пластинчатый графит и чугун становится непригодным для отжига.

Процесс получения ковкого чугуна сложнее, чем серого. Чугуны с более высокими свойствами выплавляют в электрических печах, что позволяет уменьшить в них содержание углерода и полнее удалить нежелательные примеси серы и фосфора. Все ковкие чугуны в отливке должны получать структуру белого доэвтектического чугуна. Отливки должны быть сравнительно небольшими, чтобы задержать графитизацию при сравнительно ускоренном охлаждении.

Последующая графитизация отливок для получения окончательной структуры с хлопьевидным графитом и повышенных механических свойств происходит при нагреве до 950 – 980 °С, т.е. в твердом состоянии и в процессе медленного охлаждения. Это требует очень длительного времени: до 100 ч.

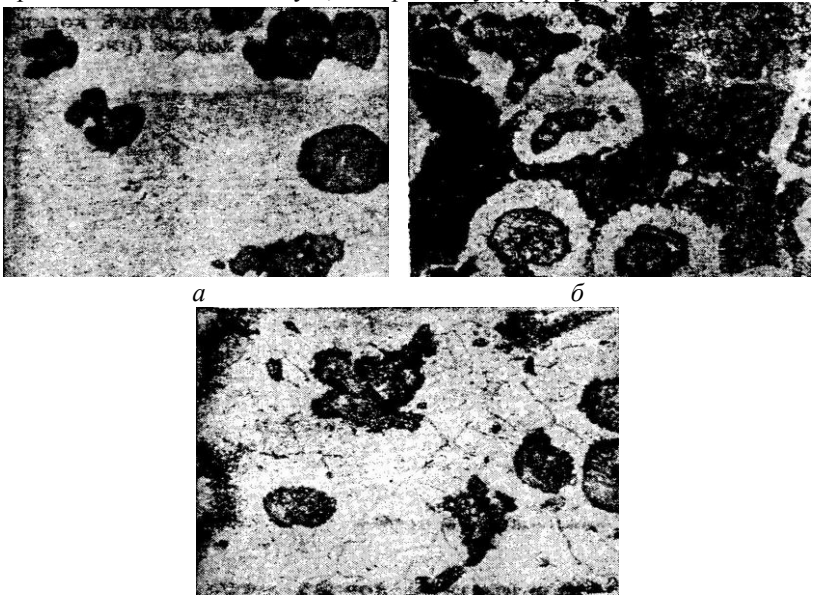
Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и цифрами. Первые две цифры указывают предел прочности при растяжении, а вторые – относительное удлинение. Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. Например, ферритный ковкий чугун марок КЧ37 – 12 и КЧ35 – 10 используют для изделий, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеры редукторов, задний мост, ступицы, крюки, скобы и т. д.), для менее ответственных изделий (головки, хомутики, гайки, глушители, фланцы, муфты и т. д.) применяют ферритный чугун марок КЧ30 – 6 и КЧ33 – 8. Твердость ферритного чугуна составляет НВ 163. Перлитный ковкий чугун КЧ50 – 5, КЧ56 – 4, КЧ60 – 3 и КЧ63 – 2 обладает высокой прочностью, умеренной пластичностью и хорошими антифрикционными свойствами. Твердость перлитного чугуна составляет НВ 269. Из перлитного ковкого чугуна изготавливают

вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, втулки, муфты, тормозные колодки и т. д. Ковкий чугун применяют для тонкостенных деталей в отличие от высокопрочного магниевого чугуна, который используют для деталей большого сечения.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом

Высокопрочный чугун получают присадкой в жидкий чугун небольших добавок некоторых щелочных или щелочноземельных металлов. Чаще для этой цели применяют магний в количестве 0,03 – 0,07 %. По содержанию остальных элементов высокопрочный чугун не отличается от серого.

Под действием магния графит в процессе кристаллизации принимает не пластинчатую, а шаровидную форму (рис. 2.7).



а *б* *в*

Рис. 2.7. Микроструктура высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, х 250: *а* – нетравленый шлиф; *б* – феррито-перлитный чугун; *в* – ферритный чугун

Шаровидный графит, имеющий минимальную поверхность при данном объеме, значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна, чем пластинчатый графит. В отличие от пластинчатого шаровидный графит не является активным концентратором

напряжений. Эти чугуны имеют более высокие механические свойства, не уступающие литой углеродистой стали, сохраняя при этом положительные свойства чугуна: хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость и т. д. Обычный состав чугуна: ≤3,3 % C; 2,2 – 2,5% Si; 0,5 – 0,8 % Mn; < 0,14 % S и 0,2 % P.

Маркируют высокопрочный чугун буквами ВЧ, затем следуют цифры. Первые цифры марки показывают среднее значение предела прочности при растяжении, вторые – относительное удлинение. Чугуны ВЧ50-1,5 и ВЧ60-2 имеют перлитную металлическую основу (рис. 2.7, б), чугуны ВЧ45-5 – перлито-ферритную и ВЧ40-10 – ферритную (рис. 2.7, в). Для снятия литейных напряжений, повышения механических свойств чугун нередко подвергают термической обработке.

Отливки из высокопрочного чугуна широко используют в различных отраслях. Так, в автостроении и дизелестроении высокопрочный чугун применяется для изготовления коленчатых валов, крышек цилиндров и других деталей; в тяжелом машиностроении – для многих деталей прокатных станов и в кузнечно-прессовом оборудовании (например, для шабот-молотов, траверспрессов, прокатных валков); в химической и нефтяной промышленности – для корпусов насосов, вентилей и т. д.

Высокопрочные чугуны применяют и для деталей станочного, кузнечно-прессового оборудования, работающих в подшипниковых и других узлах трения при повышенных и высоких давлениях (до 120 кгс/мм^2). Антифрикционные чугуны с глобулярным графитом изготовляют двух марок: АВЧ-1, (2,8 – 3,5 % C; 1,8 – 2,5 % Si; 0,5 – 1,2 Mn) с перлитной структурой и АВЧ-2 с повышенным содержанием кремния (2,2 – 2,7 %) и феррито-перлитной структурой (> 50 % перлита) для работы с термически не обработанными валами.

Отбеленный чугун

Отбеленными называют чугунные отливки, в которых поверхностные слои имеют структуру доэвтектического белого чугуна – ледебурит, перлит и цементит, а сердцевина – серого или высокопрочного чугуна. Между этими зонами может быть переходный слой. Отбел на некоторую глубину (12 – 30 мм) является следствием быстрого охлаждения поверхности, возникающего в результате отливки чугуна в металлические формы (кокиль) или сырую земляную форму.

Это создает высокую износостойкость, но резко ухудшает обрабатываемость резанием. Отбеленный чугун используют в ограниченных пределах для деталей простой формы, образующих чистую поверхность при литье.

Высокая твердость поверхности (НВ 400 – 500) обусловливает хорошую сопротивляемость износу, особенно абразивному. Поэтому из отбеленного чугуна изготавливают прокатные валки листовых станов, колеса, шары для мельниц и т. д. В этом случае применяют чугун с пониженным содержанием кремния, который склонен к отбеливанию. Его примерный состав: 2,8 – 3,6 % C; 0,5 – 0,8 % Si; 0,4 – 0,6 % Mn.

Вследствие различной скорости охлаждения по сечению и получения разных структур отливка имеет большие внутренние напряжения, которые могут привести к образованию трещин. Для снятия напряжений отливки подвергают термической обработке нагревом и выдержкой при 500 – 550 ^{0}C.

Для деталей, работающих в условиях износа при высоких температурах, используют высокохромистые и хромоникелевые чугуны. Жаростойкость достигается легированием чугунов кремнием (5 – 6 %) и алюминием (1 – 2 %). Коррозионная стойкость увеличивается легированием хромом, никелем, кремнием.

3. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

3.1. Медь и ее сплавы

Медь – металл красноватого цвета, имеет кристаллическую решетку типа гранецентрированного куба и обладает рядом технически ценных свойств. Температура плавления меди $T_{пл}$ = 1083 °C, плотность – 8,9 г·см$^{-3}$. По электропроводности медь уступает только серебру: у Cu ρ = 1,72·10^{-8} Ом·м, а у Ag ρ = 1,58·10^{-8} Ом·м; обладает достаточно высокой механической прочностью и стойкостью к коррозии. Медь легко протягивается в проволоку малого диаметра (до 0,01 мм) и легко прокатывается в листы, ленты и фольгу (до 0,005 мм), хорошо паяется.

В сухом и влажном воздухе, а также в пресной воде при 20 °C медь достаточно устойчива к коррозии; незначительно корродирует только в морской воде. В сухом воздухе ниже 185 °C с кислородом не взаимодействует. При нагревании до 375 °C медь окисляется с образованием одноокиси CuO, имеющей черный цвет, а выше 375 °C

образуется полуокись Cu_20, имеющая красный цвет. На воздухе в присутствии влаги и углекислого газа на ее поверхности постепенно образуется зеленый налет основного карбоната меди (карбонат-гидроксид меди) $Cu_2(OH)_2C0_3$.

Медь – сравнительно дорогой и дефицитный металл, поэтому требует экономного расходования. Содержание меди в земной коре составляет $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ %. В природе медь встречается в самородном состоянии и главным образом в виде сульфидных руд. Из медной руды в результате ряда последовательных процессов обогащения, обжига и восстановления получают так называемую сырую, или черную, медь, содержащую обычно до 3 % примесей. Эти примеси значительно снижают электропроводность меди, поэтому медь, предназначенную для электротехнических целей, обязательно подвергают электролитической очистке – рафинированию. Рафинированную медь переплавляют в болванки массой 80 – 90 кг, которые прокатывают или протягивают через волочильные доски (волочение) в изделия требуемого профиля и геометрических размеров.

При холодной прокатке и волочении получают ***твердую {твердотянутую) медь*** **(МТ)**, которая благодаря наклепу (нагартовке) приобретает повышенную твердость, упругость, предел прочности на разрыв, но при этом возрастает удельное сопротивление и снижаются относительное удлинение и относительное сужение перед разрывом (табл. 3.1).

Медь марки МТ применяют там, где требуется обеспечить высокую механическую прочность σ_p, твердость и сопротивляемость истиранию, например для изготовления контактных проводов электрифицированного транспорта, коллекторных пластин электрических машин, шин для распредустройств и т.п.

Таблица 3.1

Основные физические свойства медной и алюминиевой проволоки [1]

Свойства	Медь		Алюминий	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Удельное сопротивление ρ, мкОм·м, не более	0,0177-0,0180	0,01724	0,0290	0,0280

Окончание таблицы 3.1

Предел прочности на разрыв $\sigma_р$, МПа	250-500	200-280	100-180	70-100
Относительное удлинение перед разрывом Θ, %	0,5-5,0	18-50	0,5-2,0	10-25
Твердость НВ	65-120	35-38	33	25
Модуль упругости, ГПа: статический динамический	122-132 112	117 74	72 66	66 54
Удельная ударная вязкость, кДж/м^2	—	1560	1200	900

Рекристаллизация меди начинается при температуре примерно 200 °С, а температура рекристаллизационного отжига составляет ~600 °С. При отжиге меди ее механические свойства изменяются гораздо сильнее, чем удельное сопротивление.

После отжига получают ***мягкую (отожженную) медь*** **(ММ)**, которая пластична, характеризуется большим удлинением перед разрывом и имеет электропроводность на 3 – 5 % выше, чем у МТ (см. табл. 3.1). Однако при отжиге предел прочности на разрыв и твердость снижаются. Отожженная медь служит ***электротехническим стандартом***, по отношению к которому выражают в процентах при 20 °С удельную проводимость металлов и сплавов. Удельная электропроводность ***стандартной меди*** при 20 °С равна 58 МСм/м, соответственно ρ= 0,017241 мкОм·м, а ТКρ = $4{,}3\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

Мягкую медь в виде проволоки различного диаметра и профиля используют в качестве токопроводящих жил (одно- и многожильных) кабелей, монтажных и обмоточных проводов и т.д., где важны гибкость и пластичность, а прочность не имеет решающего значения. Круглую проволоку из меди марок МТ и ММ изготавливают диаметром от 0,02 до 10 мм. Ленточную медь широко используют для экранирования кабелей связи и радиочастотных кабелей.

Особо чистой медью является ***вакуумная медь,*** удельное сопротивление которой практически такое же, как и у серебра. Вакуумную медь получают путем ее переплавления в вакуумных индукционных печах в графитовых тиглях при остаточном давлении воздуха ~10^{-3} Па.

Сплавы меди

В случаях, когда необходимы повышенные механические свойства и нет жестких требований по электропроводности, вместо меди в качестве проводникового материала используют ее сплавы — бронзы и латуни. Эти сплавы состоят из одной или нескольких фаз, представляющих собой твердые растворы или сплавы типа химических соединений меди с другими элементами: Zn, Sn, Al, Be, Si, Mn, Ni.

По технологическим свойствам медные сплавы подразделяют на деформируемые (обрабатываемые давлением) и литейные.

Сплавы меди подразделяют на 3 группы.

1. Латуни – сплавы меди с цинком.
2. Бронзы – сплавы меди со всеми элементами, кроме цинка.
3. Баббиты – антифрикционные сплавы меди с оловом или свинцом.

Свойства некоторых медных сплавов приведены в табл.3.2.

Таблица 3.2

Механические свойства некоторых медных сплавов

Материал	$\sigma_р$, МПа	Θ, %	НВ , МПа
Медь литая	160	25	400
Медь деформированная	450	3	1250
Латунь Л68	320	55	550
Латунь ЛА77-2	400	55	600
Бронза БрОФ6,5-0,4	400	60	1000
Бронза БрАЖН10-4-4	650	35	1500

Латуни – это сплавы системы Cu–Zn с максимальным содержанием Zn 45 %. При повышении концентрации Zn до 45 % увеличивается механическая прочность $\sigma_р$. Максимальная пластичность наблюдается при содержании Zn около 37 %. В некоторые марки латуней для улучшения того или иного свойства вводят в небольшом количестве один или несколько химических элементов (Sn, Pb, Fe, Mn, Ni или Al). Маркируют латуни буквой Л и цифрой, указывающей процентное содержание меди, например латунь марки Л68 содержит меди 68 %, остальное – цинк.

В маркировке латуней и бронз сложного состава указываются легирующие примеси – ставятся начальные русские буквы названий элементов (О – олово, С – свинец, Ж – железо, Ф – фосфор, Мц –

марганец, А – алюминий, Н – никель, Б – бериллий, К – кремний, Ц – цинк). Количество этих элементов обозначается соответствующими цифрами после числа, показывающего содержание меди, например сплав ЛАЖ60-1-1 содержит 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и 38 % цинка; латунь марки ЛА77-2 – это алюминиевая латунь, содержащая 77 % Cu, 2 % алюминия, остальное – цинк; латунь марки ЛС59-1 – это свинцовая латунь, содержащая 59 % Cu, 1 % свинца, остальное – цинк.

Главная отличительная особенность латуни от чистой меди – повышенная механическая прочность $\sigma_р$ при достаточно высоком удлинении перед разрывом **Θ**. Латуни лучше, чем бронзы, обрабатываются штамповкой, глубокой вытяжкой и т.п. Они широко используются для изготовления токопроводящих винтов, гаек, шайб, шпилек, штырей, гнезд, упругих элементов и для коммутирующих узлов и штепсельных разъемов. Состав и свойства некоторых латуней приведены в табл. 3.2.

Бронзы – это сплавы меди с небольшим содержанием одного или нескольких химических элементов (Sn, Si, P, Be, Cr, Mg, Cd и др.), которые дают название бронзам. Маркируют бронзы буквами Бр, после которых идут буквы, указывающие легирующие элементы, и цифры, показывающие количество этих элементов в целых процентах. Например, бронза марки БрБ2 – бериллиевая бронза (содержит 2 % Be, остальное Cu), марки БрОЦС6-6-3 – оловянно-цинково-свинцовая бронза (содержит 6 % Sn, 6 % Zn, 3 % Pb, остальное – медь).

Атомы примеси (в том числе легирующей), внедряясь в кристаллическую решетку, увеличивают ее деформацию и концентрацию дефектов. Кроме того, атомы примеси взаимодействуют с дислокациями и затрудняют их подвижность, упрочняя медь. Поэтому удельное сопротивление бронз больше [ρ= (1,8 – 2,8)·10^{-8} Ом·м], чем у чистой меди, зато выше предел прочности на разрыв ($\sigma_р$ = 250 – 1100 МПа) и твердость (НВ 20 – 260), меньше относительное удлинение перед разрывом (Θ = 2 – 65 %).

Бронзы лучше обрабатываются на металлорежущих станках и обладают более высокими литейными свойствами, чем медь. У кадмиевой бронзы при сравнительно небольшом снижении удельной электропроводности существенно повышены механическая прочность, твердость и стойкость к истиранию. Кадмиевую бронзу применяют в качестве контактного провода для электрифицированного транспорта и коллекторных пластин в электрических машинах. Еще большей механической прочностью обладает бериллиевая бронза. Бронзы широко применяют для

изготовления токопроводящих пружинящих контактов и других деталей коммутирующих узлов, выключателей, электрических машин. Некоторые виды бронз упрочняют термообработкой.

Баббитами называются антифрикционные сплавы меди с оловом или свинцом. Например, сплав Б16, содержащий 16 % свинца, имеет весьма низкий коэффициент трения со сталью $К_{тр}$ = 0.01 (0.005 со смазкой). Поэтому баббиты используются для изготовления подшипников скольжения для поддержки тяжелых турбин электростанций, достигающих массы сотни тонн. Первый подшипниковый сплав разработан американцем Исааком Бэббитом в 1839 году. Баббиты на основе олова или свинца используются в виде слоя, залитого или напыленного по корпусу вкладыша подшипника. В качестве присадок могут быть использованы: сурьма, медь, никель, мышьяк, кадмий, теллур, кальций, натрий, магний.

Температура плавления сплавов – 300 – 440 °С. В марке сплава указывается содержание олова или свинца. Например, баббит Б83 – сплав на основе олова, содержащий 83 % Sn , 11 % Sb и 6 % Cu, применяется для подшипников, работающих при средних нагрузках. Допустимое рабочее давление 10 – 15 МПа.

Баббиты, основу которых составляет олово (Б88, Б83 и др.), используют, когда от антифрикционного материала требуются повышенная вязкость и минимальный коэффициент трения. Оловянный баббит по сравнению со свинцовым обладает более высокой коррозионной стойкостью, износостойкостью и теплопроводностью.

Баббиты на основе свинца (Б16 и др.) обладают более высокой рабочей температурой, чем на основе олова. Применяется для подшипников дизельных двигателей, прокатных станов.

Все баббиты имеют существенный недостаток – низкое сопротивление усталости, что ухудшает работоспособность подшипника. Из-за небольшой прочности баббиты могут успешно эксплуатироваться только в подшипниках, имеющих прочный стальной (чугунный) или бронзовый корпус. Обычно тонкостенные подшипниковые вкладыши автомобильных двигателей изготовляют штамповкой из биметаллической ленты, полученной на линии непрерывной заливки. Продолжительность работы подшипников зависит от толщины баббитового слоя, залитого на стальной или чугунный вкладыш. Уменьшение толщины слоя увеличивает срок службы подшипника.

3.2. Алюминий и его сплавы

Алюминий – это серебристо-белый металл, легкий и легкоплавкий, с высокой электро- и теплопроводностью и пластичностью (см. табл. 3.1). Алюминий имеет кристаллическую решетку типа гранецентрированного куба. По электропроводности он занимает третье место после серебра и меди. Его $\rho = 2{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $T_{пл}$ = 657 – 660 °С, плотность 2,7 Мг/м^3. Алюминий – активный металл. Благодаря высокому сродству к кислороду, на воздухе он быстро покрывается тонкой (толщина порядка нм) и плотной пленкой оксида алюминия $A1_20_3$, которая защищает внутренние слои от дальнейшей коррозии. Пленка $A1_20_3$ обладает высоким удельным сопротивлением ($\rho > 10^{14}$ Ом-м) и при напряжениях менее 1 В может служить естественной межвитковой изоляцией. Путем анодирования (электрохимического анодного окисления) можно увеличить толщину оксидной пленки, при этом повысится пробивное напряжение.

Преимущество алюминия как проводникового материала заключается в том, что он дешевле и более доступен, чем медь. Удельное сопротивление алюминия больше ρ меди в 1,63 раза, плотность – в 3,5 раза меньше. Поэтому два одинаковых по длине отрезка проволоки из алюминия и меди с одним и тем же сопротивлением окажутся разными по диаметру и массе. Несмотря на то, что диаметр алюминиевой проволоки примерно в 1,35 раза больше диаметра проволоки из меди, алюминиевая проволока будет легче медной примерно в 2 раза. Это положение имеет немаловажное значение для облегчения веса электротехнических конструкций.

Алюминий – самый распространенный в природе металл. Его массовая доля в земной коре составляет 8,8 %.

Выплавка (электролиз) алюминия – очень энергоемкая операция: каждая тонна металла требует затраты электроэнергии около 16 тыс. кВт·ч. Первичная очистка алюминия заключается в продувке через его расплав хлора. Полученный металл обычно содержит алюминия 99,7 %. Путем электролитического рафинирования его чистоту можно довести до 99,99 % и более. Для полупроводниковой техники алюминий дополнительно очищают методом зонной плавки до чистоты 99,9999 %.

Присутствие в алюминии примеси существенно снижает его удельную электропроводность и изменяет механические свойства. При этом на электропроводность алюминия влияет не только концентрация примеси, но и ее природа. Присутствие в алюминии Ni, Si, Zn или Fe в количестве 0,5 % снижает удельную

электропроводность на 2 – 3 %, присутствие в том же количестве Си, Ag или Mg снижает ρ на 5 – 10 %. Особенно сильно снижают ρ алюминия такие примеси, как Ti, Мп и V.

Благодаря высокой пластичности, алюминий хорошо поддается прокатке и волочению, которые производят аналогично соответствующим операциям для меди. При холодном волочении и прокатке в результате наклепа получают ***твердый алюминий*** **(АТ)**, который имеет повышенные механическую прочность, твердость и удельное сопротивление. Механические параметры и удельное сопротивление наклепанного алюминия можно понизить путем рекристаллизационного отжига, проводимого при температуре 350 – 400 °С. После отжига получают ***мягкий (отожженный) алюминий*** **(АМ)**. Методом волочения или прокатки из алюминия так же, как из меди, получают проволоку (круглую диаметром от 0,08 до 10 мм, прямоугольную, сегментную или секторную) или пластины, ленту и фольгу (толщиной до 5 – 7 мкм).

Промышленность выпускает алюминиевую проволоку марок: АТП, АТ, АПТ и АМ – соответственно твердая повышенной прочности, твердая, полутвердая и мягкая. Основные свойства твердой и мягкой алюминиевой проволоки приведены в табл. 3.1. Удельная электропроводность ρ при 20 °С особо чистого алюминия (99,997 %), отожженного при 320 °С в течение 3 ч, равна 38 МСм/м, соответственно $\rho = 2{,}63 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Удельное сопротивление алюминия марки А5 при 20 °С равно $2{,}8 – 10^{-8}$ Ом·м.

Маркировка алюминия начинается с буквы А, затем идет цифра, указывающая содержание алюминия в сотых долях процента. Например, алюминий марки А97 содержит алюминия 99,97 %, остальное – контролируемая примесь. Алюминий различают трех классов: 1) особо чистый – марка А999 (А1 не менее 99,999 %); 2) химически чистый – марки А995, А99, А97, А95, содержащие А1 не менее 99,995, 99,99, 99,97, 99,95 %, соответственно; 3) технически чистый – марки А85, А8, А7, А6, А5, АО, А, АЕ, содержащие А1 не менее 99,85, 99,80, 99,70, 99,60, 99,50, 99,00, 99,00, 99,5 %, соответственно. Чем выше требуется чистота алюминия, тем сложнее технология его очистки и контроля и тем он дороже.

В электротехнике применяют алюминий марок А7Е, А6Е, А5Е, АЕ, где буква Е указывает на его электротехническое назначение, а примеси должны находиться в определенном соотношении и не превышать 0,5 %, при этом Си должно быть не более 0,015 %, Мп – не более 0,01 % и Mg – не более 0,02 %. Алюминий марки А97

применяют для изготовления фольги, электродов и корпусов электролитических конденсаторов и других изделий.

Алюминий – активный металл. Благодаря высокому сродству к кислороду, на воздухе он быстро покрывается тонкой (толщина порядка нм) и плотной пленкой оксида алюминия $A1_20_3$, которая защищает внутренние слои от дальнейшей коррозии. Пленка $A1_20_3$ обладает высоким удельным сопротивлением ($\rho > 10^{14}$ Ом-м) и при напряжениях менее 1 В может служить естественной межвитковой изоляцией.

Недостатками такой изоляции являются ограниченная гибкость проволоки и заметная ее гигроскопичность. Оксидная изоляция получила наибольшее применение в производстве электролитических конденсаторов и микросхем. Оксидная пленка алюминия, имея высокое удельное сопротивление в месте контакта проводников, создает достаточно высокое переходное сопротивление. Это ее отрицательное качество. Кроме того, она затрудняет пайку алюминия обычными методами. Поэтому при пайке алюминия применяют специальные припои или разрушают оксидную пленку ультразвуком с помощью ультразвукового паяльника либо в месте контакта используют пластическое обжатие.

Алюминий достаточно эрозионностоек к действию электрических разрядов, а значит, его можно использовать в качестве электродов в приборах, где должно отсутствовать катодное распыление металла.

Алюминий по отношению к большинству металлов обладает отрицательным электродным (электрохимическим) потенциалом, который равен – 1,67 В (у меди +0,34 В). Поэтому алюминий, находясь в контакте со многими металлами, образует с ними гальваническую пару, в которой является анодом. Гальваническая пара в присутствии влаги способствует электрохимической коррозии алюминия. Следовательно, места соединения алюминия с медью, железом и рядом других металлов необходимо защищать от увлажнения – покрывать лаками и т.п.

Сплавы алюминия

Сплавы алюминия обладают более высокими значениями механической прочности σ_p, твердости НВ, износостойкости, нагревостойкости и удельного электросопротивления ρ, но меньшим значением относительного удлинения перед разрывом Θ, чем чистый алюминий (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Состав и свойства некоторых алюминиевых сплавов (для сравнения приведены свойства чистого отожженного алюминия)[1]

Марка сплава и его химический состав	Предел прочности на разрыв, $\sigma_р$, МПа	Относительное удлинение перед разрывом Θ, %	Твердость, НВ	Удельное электросопротивление ρ, мкОм·м
Алюминий чистый отожженный	80-90	30-33	25	0,028
Литейные сплавы				
АЛ2 (Si 10 – 13 %, остальное A1)	150	2-4		–
АЛ4 (Si 8,0 – 10,5, Mg 0,17 – 0,3, Мп 0,2 – 0,5 %, остальное A1)	200-240	1,5-3	65	–
АЛ9 (Si 6,0 – 8,0, Mg 0,2 – 0,4 %, остальное A1)	140-170	1-2		
АЛ13 (Mg 4,5 – 5,5, Si 0,8 – 1,3, Мп0,1 – 0,4 %, остальное A1)	150-180	0,5-1	–	0,071
АЛ21 (Cu 4,6-6,0, Mg 0,8 – 1,3, Мп 0,15-0,25%, остальное A1)	210-220	1,2-1,5		
Деформируемые сплавы, не упрочняемые термообработкой				
АМц (Mn 1,0 – 1,6 %, остальное A1):				
отожженный	130	23	–	–
нагартованный	170	10	–	–
АМг5 (Mg 4,8 – 5,8, Mn 0,5 – 0,8 %, остальное A1)	270	18	–	–
АД31 (Mg 0,4 – 0,9, *Si* 0,3 – 0,7 %, остальное *A1)* закаленный и искусственно состаренный	200	8	–	0,0325

Окончание таблицы 3.3

Деформируемые сплавы, упрочняемые термообработкой				
Д16 (Cu 4,5, Mg 1,5, Mn 0,6 %, остальное A1): отожженный	230	20	50	–
закаленный после старения наклепанный	500 600	20 1-2	110 130	– –
В95 (Cu 1,4 – 2,0, MgS 1,8 – 2,8, Mn 0,2 – 0,6, *Zn* 5,0 – 7,0, Cr 0,1 – 0,25 %, *остальное* A1) закаленный и отпущенный	600	12	150	–
АК4-1 (Si 0,35, Mn 0,2, Zn 0,3, прочей примеси 0,15 %, остальное A1*)* закаленный и состаренный	440	10	120	–
Электротехнический сплав				
Альдрей (Mg 0,3 – 0,5, Si 0,4 – 0,7, Fe 0,2 – 0,3 %, остальное Al)	320-370	6-9		0,0322

Примечания. ***1.*** Буква ***Д*** – сплав деформируемый, ***В*** в начале марки – высокопрочный деформируемый сплав; ***АЛ*** – алюминиевый литейный сплав; ***АК*** – алюминиевый ковочный сплав. ***2.*** Сплавы ***АЛ21*** и ***АК4-1*** – жаропрочные.

Алюминиевые сплавы можно условно разделить на конструкционные и электротехнические. **Конструкционные сплавы** – на литейные сплавы и сплавы, деформируемые обработкой (деформируемые сплавы).

Литейные сплавы алюминия маркируют двумя буквами АЛ и цифрой, обозначающей порядковый номер сплава. Наиболее известные сплавы алюминия с кремнием (и с небольшими добавками Mg и Mn) называются ***силуминами*** (например, АЛ2, АЛ4, АЛ9). Для получения мелкозернистой структуры и улучшения механических свойств в силумины добавляют 0,05 – 0,08 % натрия. Такие сплавы называют *модифицированными.* К литейным алюминиевым сплавам относят сплавы следующих систем: A1–Si–Cu (например, АЛ3, АЛ5,

АЛ6), Al–Cu (например, АЛ7, АЛ 19, АЛ21), Al–Mg (например, АЛ8, АЛ27, АЛ 13). Эти сплавы обладают хорошими литейными свойствами, свариваемостью и удовлетворительными механическими свойствами (табл. 3.3) [1].

Деформируемые сплавы алюминия подразделяют на сплавы, не упрочняемые термической обработкой, и сплавы, упрочняемые термической обработкой. Сплавы, не упрочняемые термической обработкой, имеют высокую пластичность, поэтому изделия из них получают холодной штамповкой. Однако у них невысокая механическая прочность. К ним относятся сплавы алюминия с Mg и Mn в суммарном количестве до 6 %, например сплавы АМц, АМг2, АМг5, а также сплавы с небольшими добавками Mg и Si – сплавы АД31. Алюминиевые сплавы АД31 (Mg 0,6 % и Si 0,5 %), подвергнутые закалке и естественному старению, – сплавы АД31Т1, наряду с алюминием марки А5Е используют для изготовления электропроводящих шин. Механические свойства деформируемых сплавов алюминия приведены в табл. 3.3.

К алюминиевым деформируемым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы, известные как дюралюмины и авиаль.

Дюралюмины, часто называемые дуралюминами, это – сплавы системы Al–Cu–Mn. Марганец вводят для повышения коррозионной стойкости сплавов. Немецкий физик Альфред Вильм, живший в городе Дюрен, изучал свойства алюминиевого сплава, легированного медью, магнием и марганцем. Для повышения прочности сплав подвергали закалке, но опыты не давали желаемого результата. Помог случай. Однажды нерадивый лаборант не сделал вовремя измерений свойств образцов, просто забыв о них, и вернулся к измерениям только через неделю. Каково же было удивление ученых, когда они обнаружили значительное увеличение механической прочности забытых образцов! Теперь этот процесс называют старением. А найденный сплав получил название «дюралюмин» в честь родного города Вильма.

Наиболее важной примесью в дюралюмине является медь. При комнатной температуре медь обладает сравнительно малой растворимостью в алюминии, несмотря на сходство в кристаллическом строении этих металлов (одинаковый тип элементарной ячейки – ГЦК). Диаграмма состояния сплавов Al–Cu (рис. 3.1) относится к диаграммам состояния III типа, когда компоненты образуют твердый раствор с ограниченной растворимостью, уменьшающейся с понижением температуры. В

сплавах, имеющих диаграмму состояния такого типа, протекает вторичная кристаллизация, связанная с частичным распадом твердого раствора.

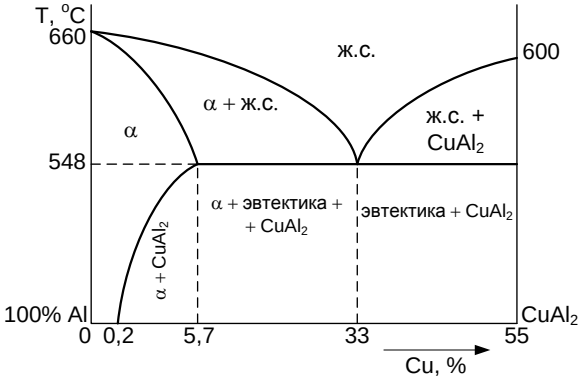


Рис. 3.1. Диаграмма состояния сплава A1–Cu

Из диаграммы состояния A1–Cu следует, что наибольшая растворимость меди в алюминии наблюдается при 548 °С, когда она составляет 5,7 %; при понижении температуры растворимость меди в алюминии уменьшается и при комнатной температуре составляет 0,5 %. Если сплавы с содержанием меди от 0,5 и до 5,7 % подвергнуть закалке с нагревом выше температур фазовых превращений, то сплав перейдет в однородный твердый раствор α. После закалки в сплаве будет протекать распад твердого раствора, сопровождающийся выделением избыточной фазы высокой степени дисперсности. Такой фазой в сплавах A1–Cu является твердое и хрупкое химическое соединение $CuA1_2$.

Распад пересыщенного твердого раствора может протекать в течение длительного времени при вылеживании сплава при комнатной температуре (естественное старение) и более быстро при повышенной температуре (искусственное старение). В результате старения твердость и прочность сплава повышаются, а пластичность и вязкость снижаются [9].

Согласно теории старения, наиболее полно разработанной с помощью представлений Н.С. Курнакова, процесс старения в сплавах протекает в несколько стадий. Упрочнение сплавов, наблюдающееся в результате старения, соответствует периоду выделения избыточных фаз в высокодисперсном состоянии. Происходящие в структуре изменения можно наблюдать только с помощью электронного микроскопа. Обычно эта стадия процесса протекает у закаленных

сплавов при естественном старении. При этом твердость и прочность сплава повышаются.

При нагреве закаленных сплавов до сравнительно низких температур, разных для различных сплавов (искусственное старение), протекает вторая стадия, состоящая в укрупнении частиц выделившихся фаз. Этот процесс можно наблюдать с помощью оптического микроскопа. Появление в микроструктуре укрупненных выделений фаз-упрочнителей совпадает с новым изменением свойств – снижением прочности и твердости сплава и повышением его пластичности и вязкости. Старение наблюдается только у сплавов, которые имеют диаграмму состояния с ограниченной растворимостью, уменьшающейся с понижением температуры. Так как большое количество сплавов имеет диаграмму этого типа, то явление старения весьма распространено. На явлении старения основана термическая обработка многих цветных сплавов – алюминиевых, медных и др.

В сплавах Al–Cu этот процесс протекает следующим образом. При естественном старении в закаленном сплаве происходит образование зон (дисков) с повышенным содержанием меди. Толщина этих зон, называемых зонами Гинье – Престона, равна двум-трем атомным слоям. При температуре выше 250 °С образуется фаза $CuAl_2$. Дальше происходит укрупнение выделений фазы $CuAl_2$. Наибольшую твердость и прочность имеет сплав в первой стадии старения.

Технология термической обработки деталей из дюралюмина состоит из закалки, проводимой с целью получения пересыщенного твердого раствора, и естественного или искусственного старения. Для закалки детали обычно нагревают до 495 °С и охлаждают в холодной воде.

Закаленные детали подвергают естественному старению путем выдерживания их при комнатной температуре. После 4 – 7 суток вылеживания детали приобретают наиболее высокую прочность и твердость. Время, необходимое для распада твердого раствора, может быть сокращено до нескольких часов путем нагрева закаленного дюралюмина до 100 – 150 °С (искусственное старение), однако значения твердости и прочности при искусственном старении несколько ниже, чем при естественном. Несколько снижается и коррозионная устойчивость.

При маркировке дюралюминов буква Д обозначает «дюралюмин», а цифра – условный номер сплава. Дюралюмины получили широкое применение в различных отраслях

промышленности, особенно в авиастроении. Наиболее известны сплавы Д1, Д18. Они хорошо деформируются в горячем и холодном состоянии. Вследствие малой удельной плотности и высоких механических свойств после термической обработки сплавы используют в строительных конструкциях средней и повышенной прочности, для обшивки и изготовления некоторых элементов самолетов, для кузовов грузовых автомобилей и т.д. Наиболее высокую твердость и прочность после закалки и старения имеют дюралюмины марок Д16 и Д6. Дюралюмины марок ДЗП и Д18 являются сплавами с повышенной пластичностью.

Сплавы ***авиаль*** **(АВ)** менее прочны, чем дюралюмины, зато обладают большей пластичностью как в горячем, так и в холодном состоянии, хорошо свариваются и сопротивляются коррозии. Сплавы авиаль используют в легких конструкциях, где требуется их деформация при монтаже. Наиболее прочным алюминиевым деформируемым сплавом является сплав В95, содержащий добавку Zn (см. табл. 3.3). Однако он менее коррозионно стоек, чем дюралюмин, и непригоден для работы при температуре выше 150 °С, так как ухудшается его механическая прочность.

Жаропрочные алюминиевые сплавы могут быть как литейными (например, АЛ21), так и деформируемыми (например, АК4). Эти сплавы используют для изготовления деталей, работающих при температурах 250 – 350 °С. Повышенная жаропрочность достигается высоким содержанием Cu, а также Mn, Mg и Ti (см. табл. 3.3).

Электротехнические сплавы алюминия. Для изготовления холоднотянутой электротехнической проволоки используют алюминий марки АД1 и алюминиевые деформируемые сплавы марок АМц, АМг2, АМг5П, Д1П, Д16П, Д18 и В65, где А обозначает алюминий, Д – деформируемый сплав, Мц – марганец, Мг – магний, П – сплав холодной высадки (разновидность пластической деформации), В – высокопрочный деформируемый сплав, цифра – концентрацию легирующего химического элемента. Эти сплавы содержат алюминия не менее 99,30 %, а Fe, Si, Mn и Mg в количестве 0,2 – 0,7, 0,25 – 0,6, 0,2 – 1,0 и 0,2 – 4,8 % соответственно.

Химические элементы, образующие с алюминием твердые растворы, увеличивают механическую прочность, но снижают удельную электропроводность. Наиболее сильно снижают удельную электропроводность Cr, Li, Mg, Nb, Ti, V, Mn, поэтому их количество в электротехнических алюминиевых сплавах должно быть ограниченным. Железо также повышает механическую прочность сплавов, но при этом мало влияет на их удельную

электропроводность, так как не входит в твердый раствор, а присутствует в алюминии в виде дисперсных частиц.

3.3. Титан и его сплавы

Титан – легкий, тугоплавкий металл серого цвета с температурой плавления $T_{пл} = 1665\ ^oC$. Из-за своих уникальных свойств элемент назван так в честь титанов – в греческой мифологии могучих детей Урана (Неба) и Геи (Земли). Это один из наиболее распространенных в природе элементов, он обладает высокими прочностью $\sigma_p = 250 – 600$ МПа и пластичностью $\Theta = 20$ %. При этом плотность его небольшая $\rho = 4{,}5$ г/см^3, поэтому удельная прочность (отношение прочности к плотности) лучших титановых сплавов достигает 30 – 35 и более, что почти вдвое превышает удельную прочность легированных сталей. Это позволяет при изготовлении деталей из титана и его сплавов при равной прочности получать выигрыш по массе до 40 % по сравнению со сталью.

Титан имеет две аллотропические модификации α и ß. Модификация α низкотемпературная, существует при нагреве до 882,5 °С, имеет гексагональную элементарную ячейку кристаллической решетки. При температуре 882,5 °С α переходит в ß - модификацию, имеющую объемно-центрированную кубическую решетку. При переходе α-титана в ß-титан объем металла несколько уменьшается, а электропроводность скачкообразно возрастает.

На механические свойства технически чистого титана сильное влияние оказывают примеси и структурное состояние. Примеси водорода, кремния, железа существенно уменьшают пластичность и ударную вязкость без заметного увеличения прочностных характеристик. Примеси кислорода, азота, углерода способствуют повышению твердости, прочности при одновременном уменьшении пластичности. Повышенное содержание этих элементов приводит к уменьшению коррозионной стойкости титана, ухудшению обрабатываемости.

Основной примесью технически чистого титана является кислород (до 0,5 %) при общем содержании примеси не более 1 %. Среди других примесей: железо (до 0,2 %), углерод (до 0,1 %), азот (до 0,05 %), водород (до 0,01 %) [2]. Титан обладает высокой коррозионной и химической стойкостью, которые обусловлены образованием прочной и плотной пленки оксида TiO_2 на поверхности в атмосферных условиях, эта пленка обеспечивает высокое сопротивление коррозии более чем в 130 агрессивных средах. Титан

устойчив к действию растворов щелочей и кислот, взаимодействует лишь с концентрированными кислотами – соляной, фосфорной, плавиковой и серной (при нагревании). Сильно действует на титан пероксид водорода. Химический состав и механические свойства титана представлены в табл. 3.4 [10].

Таблица 3.4

Состав, механические свойства и нормативы титана высокой чистоты [10]

Марка	Состав, % по массе, max					Свойства			Страна, стандарт
	Fe	C				σ_p, МПа	σ_c, МПа	Θ, %	
Grade1	0,20	0,10	0,05	0,25	0,015	270-380	280	22	США, ASTM
Grade2	0,20	0,10	0,05	0,25	0,015	280-450	350	20	США, ASTM
Grade3	0,30	0,10	0,07	0,35	0,015	350-520	420	18	США, ASTM
Grade4	0,50	0,15	0,07	0,45	0,015	500-600	560	15	США, ASTM
ВТ1-00	0,12	0,05	0,04	0,10	0,018	270	300	30	Россия, ГОСТ
ВТ1-0	0,18	0,07	0,04	0,12	0,010	290	400	30	Россия, ГОСТ

К положительным качествам титана относятся хорошая обрабатываемость давлением, хладостойкость вплоть до абсолютного нуля температур. Высокая пластичность позволяет осуществлять листовую штамповку в холодном состоянии. Титан хорошо сваривается, удовлетворительно обрабатывается сверлением, фрезерованием.

К отрицательным качествам титана относятся низкая жаропрочность, интенсивное окисление при температурах выше 600 ^{o}C, высокая стоимость производства: титан значительно дороже железа, алюминия, меди. Кроме того, для титана характерны активное взаимодействие при высоких температурах, особенно в жидком состоянии, со всеми газами, составляющими атмосферу, в результате чего титан и его сплавы можно плавить лишь в вакууме или в среде инертных газов; плохие антифрикционные свойства, обусловленные налипанием титана на многие материалы; плохая обрабатываемость резанием, аналогичная обрабатываемости нержавеющих сталей аустенитного класса.

По использованию в качестве конструкционного материала титан находится на 4-м месте, уступая лишь Fe, Al и Mg. Промышленность выпускает лист, трубы, профиль, проволоку. Основная часть титана расходуется на нужды авиационной, ракетной техники и морского судостроения. Из титана изготавливают оборудование для хлорной промышленности, гребные винты и т.п. Титан (ферротитан) используют в качестве лигирующей добавки к качественным сталям. Технический титан идет на изготовление емкостей, химических реакторов, трубопроводов, арматуры, насосов, клапанов и других изделий, работающих в агрессивных средах. Титановые теплообменники, работающие в азотной кислоте, имеют скорость коррозии, в 60 раз меньшую, чем аналогичные теплообменники из нержавеющей стали. Из компактного титана изготавливают сетки и другие детали электровакуумных приборов, работающих при высоких температурах. Биологическая безвредность титана делает его превосходным материалом для пищевой промышленности и восстановительной хирургии.

Сплавы титана

При введении легирующих элементов можно получать **сплавы титана**, обладающие высокой механической прочностью и жаропрочностью. Основными легирующими элементами являются Al, Sn, Mn, Cr, Mo, V. Легирующие элементы влияют на устойчивость аллотропических модификаций титана. В соответствии с влиянием легирующих элементов на аллотропические превращения титановые сплавы классифицируются по структуре следующим образом [2]:

1) α - титановые сплавы, структура которых состоит из α-фазы (например, сплавы ВТ5, ВТ5-1);

2) α+ß - сплавы, в структуре которых присутствуют обе фазы (ВТ6, ВТ8, ВТ14, ВТ3-1, ВТ6);

3) ß - сплавы, структура которых состоит из механически стабильной ß-фазы (ВТ15).

К ***деформируемым*** сплавам титана относятся указанные выше сплавы групп α и α+ß. ***Литейные*** сплавы: ВТ5Л, ВТ6Л, ВТ14Л, ВТ3-1Л.

Сплавы титана обладают не только более высокой механической прочностью, но и большей коррозионной стойкостью, чем чистый титан. Из отечественных сплавов широко применяются двухфазные высокопрочные сплавы: ВТ6 (система Ni–Al–V); ВТ16 (система

Ti–Al–Mo–V). За рубежом используется сплав Ti–6Al–4V (см. табл. 3.5).

Таблица 3.5

Химический состав и свойства титановых сплавов [10]

Марка	Состав, %			Свойства			
	Al	V	Mo	Класс прочности	Пластичность	Обработка резанием	Коррозионная стойкость
ВТ6	6,8	5,3	–	высокопрочные	хорошая	хорошая	хорошая
ВТ16	3,8	5,5	6,5				
Ti-6Al-4V	6,0	4,0	–				

Титановые сплавы можно подвергать, отжигу, закалке, старению и химико-термической обработке. Отжиг α – сплавов проводят при 800–850 ^{0}C, а α + β – сплавов – при 750 – 800 ^{0}C. Вакуумный отжиг позволяет уменьшить содержание водорода, что приводит к повышению ударной вязкости, уменьшению разрушений и растрескивания. Порошковые сплавы титана получают из порошков прессованием, они прочны, пластичны.

Сплавы титана широко применяют в авиационной и ракетной технике, в химической промышленности, цветной металлургии и других отраслях, где их использование определяется ценными антикоррозионными свойствами. Алюминиды титана являются очень стойкими к окислению и жаропрочными, что, в свою очередь, определило их использование в авиации и автомобилестроении в качестве конструкционных материалов. Из титановых сплавов изготавливают обшивку самолетов, морских судов, подводных лодок, корпусов ракет, двигателей, деталей турбин, компрессоров, гребные винты, баллоны для сжиженных газов, емкости для химических средств и много других изделий.

Нитинол представляет собой сплав с эффектом памяти формы (ЭПФ). Такие сплавы после пластической деформации восстанавливают свою первоначальную геометрическую форму в результате нагрева (эффект “памяти формы”) или непосредственно после снятия нагрузки (сверхупругость). Эффект памяти формы был первоначально обнаружен в 1930 году, но сам нитинол был создан лишь в 1962 году.

Сплавы с памятью формы имеют два различных типа кристаллической решетки в зависимости от того, выше или ниже их температура некоторой критической температуры трансформации. До критической температуры сплав является гибким и легко может

принимать любую форму. Это состояние называется мартенситной структурой, в которой атомы находятся в гибких решетках, что позволяет легко гнуть материал.

Механизмом, определяющим свойства “памяти формы”, является кристаллографическое обратимое термоупругое мартенситное превращение (эффект Курдюмова, сопровождаемый изменением объема), которое носит обратимый характер, обеспечивая память.

В сплавах с эффектом “памяти формы” при охлаждении происходит рост термоупругих кристаллов мартенсита, а при нагреве – их уменьшение или исчезновение. Эффект “памяти формы” наиболее ярко проявляется при низких температурах и в узком интервале температур, иногда порядка нескольких градусов.

Требуемая форма нитинола программируется путем отжига. Материал приводится в желаемую форму и нагревается до критической температуры, при этом атомы в его структуре оказываются закрепленными на своих предыдущих местах в виде жесткой композиции. После того как он остынет, ему можно придать любую форму, но при нагревании выше критической температуры он сразу же примет форму, запрограммированную при высокой температуре.

Когда металлическая пружина "вспоминает" свою форму, то она делает это с силой, которая может быть использована для выполнения практической работы. С помощью нитинола были созданы приводы небольшой мощности, использующие перепад температур. Солнечные батареи на некоторых спутниках приводятся в рабочее положение с помощью сплавов с памятью формы, активируемых теплом солнца.

Другие виды использования никель-титановых сплавов включают изготовление разного рода оправ. При случайной деформации оправ вы можете вернуть им первоначальную форму с использованием горячей воды.

Нитинол применяют как магнитный высокодемпфирующий материал во многих ответственных конструкциях. Из нитинола изготовляют антенны спутников Земли. Антенна скручивается в маленький бунт, а после запуска в космос восстанавливает свою первоначальную форму при нагреве до температуры выше 100 °С.

Нитинол широко используют в автоматических прерывателях тока, запоминающих устройствах, в деталях ЭВМ, в температурно–чувствительных датчиках.

Особое значение имеет использование нитинола в медицине для создания внутрикостных шпилек, штифтов, устройств коррекции

дефектов позвоночника и грудной клетки, для исправления положения зубов и др.

В настоящее время эти сплавы довольно дороги. Но так как их стоимость постоянно снижается, возможна масса потенциальных применений, например изготовление кузовов автомобилей, которые восстанавливаются после аварии путем нагревания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для вузов. – М.: Высшая шк., 2004. – 519 с.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела: пер. с англ. М.: - Мир, 1969. - С. 437-503.
4. Электрорадиоматериалы / под ред. Б.М.Тареева. - М.: Высшая школа, 1978. - 336 с.
5. Материалы микроэлектронной техники /под ред. В.М. Андреева. – М.: Радио и связь, 1989. - 350 с.
6. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 304 с.
7. Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение: учеб. пособие для вузов. - М.: Горячая линия – Телеком, 2006. - 384 с.
8. Технология металлов и конструкционных материалов / Б.А. Кузьмин, Ю.Е. Абраменко, В.К. Ефремов и др.; под ред. Б.А. Кузьмина. - М.: Машиностроение, 1981. - 351 с.
9. Мозберг Р.К. Материаловедение. - М.: Высшая школа, 1991. - 448 с.
10. Медицинские и биоматериалы /П.А. Арсеньев, Н.В. Комиссаренко, Е.Ю. Макарычева и др. /под ред. М.С.Старостиной. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. - 72 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ……3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВОЙСТВАХ И СТРОЕНИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ……..... 4
1.1. Классификация металлов и сплавов…… 4
1.2. Механические свойства…….5
1.3. Химические свойства……...…. 9
1.4. Электро– и теплопроводность металлов и сплавов……..10
1.5. Магнитные свойства……14
1.6. Строение и кристаллизация металлов и сплавов……..24
1.7. Основные типы сплавов……..31
1.8. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов…….34
2. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И УГЛЕРОДА…….. 44
2.1. Основные свойства железа…… 44
2.2. Диаграмма состояния сплава железо – цементит ($Fe–Fe_3C$)….. 46
2.3. Термическая и химико–термическая обработка стали…… 49
2.4. Влияние примесей на свойства сталей……...57
2.5. Классификация и маркировка сталей…… 59
2.6. Классификация, свойства и маркировка чугунов…… 65
3. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ……. 74
3.1. Медь и ее сплавы……. 74
3.2. Алюминий и его сплавы……..….. 80
3.3. Титан и его сплавы…….. 89
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК……... 94

В и х р о в Сергей Павлович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

Металлы и сплавы: свойства и применение

Редакторы Н.А. Орлова, Н.Е. Цветкова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать 20.05.13. Формат бумаги 60Х84 1/16.
Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 6,0.
Тираж 120 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

5066

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПОДГОТОВКА СТУДЕНТОВ К ТЕКУЩЕМУ И ПРОМЕЖУТОЧНОМУ КОНТРОЛЮ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Методические указания



Рязань 2016

УДК 621.3

Подготовка студентов к текущему и промежуточному контролю освоения компетенций: методические указания; / Рязан. гос. радиотехн. ун-т сост.: Т.А.Холомина, Е.Н.Евдокимова. Рязань, 2016. 16 с.

Приведены рекомендации, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций студентов, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 11.03.04 и 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника», ООП «Нанотехнологии в электронике».

Отмечены особенности текущего и промежуточного контроля освоения компетенций обучающимися по самостоятельной работе и лабораторным практикумам при изучении специальных дисциплин, а также при прохождении производственной практики.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы.

Табл.2. Библиогр.: 4 назв.

Компетенции, текущий контроль, промежуточный контроль, методические рекомендации, критерии оценки

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: Региональный центр зондовой микроскопии (коллективного пользования) при кафедре микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (директор центра Н.В.Вишняков)

Подготовка студентов к текущему и промежуточному контролю освоения компетенций

Составители: Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
Е в д о к и м о в а Елена Николаевна

Редактор Р.К. Мангутова. Корректор Н.А.Орлова

Подписано в печать 01.08.16. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л.1,0.
Тираж 30 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Формы текущего контроля успеваемости

Текущий контроль успеваемости студентов проводится с целью определения степени усвоения учебного материала, своевременного выявления и устранения недостатков в подготовке обучающихся и принятия необходимых мер по совершенствованию методики преподавания учебной дисциплины, организации работы обучающихся в ходе учебных занятий и оказания им индивидуальной помощи.

К контролю текущей успеваемости относятся проверка знаний, умений и навыков обучающихся: на занятиях, по результатам выполнения обучающимися индивидуальных заданий, проверки качества конспектов лекций и иных материалов.

Текущий контроль по учебным дисциплинам проводится в виде контрольных расчетных заданий, тестовых опросов по отдельным темам, проверки заданий, выполняемых самостоятельно и на лабораторных занятиях, а также экспресс – опросов и заданий по лекционным материалам и лабораторным работам. Результаты решения задач и ответы на вопросы тестовых заданий контролируются преподавателем.

Ниже в качестве примеров приведены методические рекомендации по формированию отчетов по самостоятельной и лабораторной работам.

Методические требования к структуре аналитического отчета

по самостоятельной работе:

1) титульный лист;

2) часть I – «Аналитическая часть» - анализ раздела индивидуального задания по дисциплине, формулировка актуальности темы, цели и задач разработки или исследования объекта и предмета разработки или исследования, оценка современного состояния изучаемой проблемы;

3) часть II - « Основная часть» - результаты выполнения основной части раздела индивидуального задания по дисциплине (обзор научно-методических информационных источников - современных научных статей и монографий по теме, выявление вопросов, требующих углубленного изучения; формирование и обоснование собственной точки зрения на рассматриваемые проблемы и возможные пути их разрешения; необходимые расчеты, моделирование и другие задания, предусмотренные темой самостоятельной работы. Материал не должен иметь только компилятивный характер, но обладать новизной, практической

значимостью, отражать точку зрения автора на изучаемые проблемы и результаты проделанной работы.

4) часть III –«Заключение» – заключение и выводы по результатам выполненной работы;

5) список использованных научных и научно-методических источников;

6) приложения (при необходимости).

Методические требования к оформлению отчетов по лабораторным работам

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие элементы:

− номер, название и цель работы;

− чертеж функциональной схемы установки, выполненный карандашом по линейке либо при помощи соответствующей компьютерной программы, с соблюдением требований ЕСКД;

− основные расчетные соотношения;

− таблицы результатов экспериментов, выполненные карандашом по линейке;

− графики экспериментальных зависимостей, полученных при выполнении лабораторной работы;

− выводы, содержащие анализ экспериментальных зависимостей, сравнение результатов, полученных в работе, с данными справочной литературы.

При выполнении лабораторной работы каждому студенту необходимо иметь полностью оформленный отчет по ранее выполненной работе и отчет по выполняемой работе, содержащий все перечисленные элементы (за исключением экспериментальных данных в таблице, графиков, выводов). При несоблюдении указанных требований студент к лабораторной работе не допускается.

Формирование у обучающихся во время обучения в семестре предусмотренных стандартом компетенций на этапах лабораторных занятий (после каждой лабораторной работы) и самостоятельной работы (на консультациях) оценивается по критериям шкалы оценок - «зачтено» – «не зачтено».

Оценки "зачтено" заслуживает обучающийся, обнаруживший знания основного учебного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, знакомый с основной литературой, рекомендованной программой, справляющийся с выполнением графика и содержания заданий, предусмотренных учебным планом.

Оценка "не зачтено" выставляется обучающемуся, обнаружившему пробелы в знаниях основного учебного материала,

допустившему принципиальные ошибки в выполнении заданий, предусмотренных учебным планом.

Формы промежуточного контроля

Формой промежуточного контроля по дисциплине является зачет или экзамен. К этапу промежуточного контроля допускаются обучающиеся, полностью выполнившие все виды учебной работы, предусмотренные учебным планом и программой дисциплины. Формами проведения зачета или экзамена могут быть тесты, письменный или устный ответ по утвержденным экзаменационным билетам, сформулированным с учетом содержания учебной дисциплины.

Критерии оценки компетенций обучающихся и шкалы оценивания

Оценка степени формирования компетенций, сформулированных в федеральных государственных образовательных стандартах высшего образования по направлению подготовки бакалавров (11.03.04) и магистров (11.04.04) «Электроника и наноэлектроника», контролируемых на различных этапах их формирования у обучающихся, проводится преподавателем во время лекций, консультаций и лабораторных занятий по шкале оценок «зачтено» – «не зачтено». Освоение материала дисциплины и достаточно высокая степень формирования контролируемых компетенций обучающегося (эффективное и своевременное выполнение всех видов учебной работы, предусмотренных учебным планом и учебной программой) служат основанием для допуска обучающегося к этапу промежуточной аттестации – зачету или экзамену.

Целью проведения промежуточной аттестации (зачета или экзамена) является проверка общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, приобретенных студентом при изучении конкретной дисциплины. Уровень теоретической подготовки студента определяется составом и степенью формирования приобретенных компетенций, усвоенных теоретических знаний и методов, а также умением осознанно и эффективно применять их при решении практических задач

Экзамен организуется и осуществляется, как правило, в форме собеседования. Средством, определяющим содержание собеседования студента с экзаменатором, является утвержденный экзаменационный билет, содержание которого определяется основной образовательной программой (ООП) «Нанотехнологии в электронике» и рабочей

программой дисциплины. Экзаменационный билет включает в себя, как правило, три вопроса, из которых два относятся к теоретическим разделам дисциплины и один – практическому применению теоретических знаний к решению задач.

Оценке на заключительной стадии экзамена подвергаются устные ответы экзаменующегося на вопросы экзаменационного билета, а также дополнительные вопросы экзаменатора.

Применяются следующие критерии оценивания компетенций (результатов):

-уровень усвоения материала, предусмотренного программой;

-умение анализировать материал, устанавливать причинно-следственные связи;

- полнота, аргументированность, убежденность ответов на вопросы;

-качество ответа (общая композиция, логичность, убежденность, общая эрудиция);

-использование дополнительной литературы при подготовке к этапу промежуточной аттестации.

Применяется четырехбальная шкала оценок: "отлично", "хорошо", "удовлетворительно", "неудовлетворительно", что соответствует шкале "компетенции студента полностью соответствуют требованиям ФГОС ВО", "компетенции студента соответствуют требованиям ФГОС ВО", " компетенции студента в основном соответствуют требованиям ФГОС ВО ", " компетенции студента не соответствуют требованиям ФГОС ВО".

К оценке уровня знаний и практических умений и навыков предъявляются следующие общие требования.

«Отлично»:

глубокие и твердые знания программного материала программы дисциплины, понимание сущности и взаимосвязи рассматриваемых явлений (процессов);

полные, четкие, логически последовательные, правильные ответы на поставленные вопросы; умение выделять главное и делать выводы.

«Хорошо»:

достаточно полные и твёрдые знания программного материала дисциплины, правильное понимание сущности и взаимосвязи рассматриваемых явлений (процессов);

последовательные, правильные, конкретные, без существенных неточностей ответы на поставленные вопросы, свободное устранение замечаний о недостаточно полном освещении отдельных положений при постановке дополнительных вопросов.

«Удовлетворительно»:

знание основного программного материала дисциплины, понимание сущности и взаимосвязи основных рассматриваемых явлений (процессов):

понимание сущности обсуждаемых вопросов, правильные, без грубых ошибок ответы на поставленные вопросы, несущественные ошибки в ответах на дополнительные вопросы.

«Неудовлетворительно»:

отсутствие знаний значительной части программного материала дисциплины; неправильный ответ хотя бы на один из вопросов, существенные и грубые ошибки в ответах на дополнительные вопросы, недопонимание сущности излагаемых вопросов, неумение применять теоретические знания при решении практических задач, отсутствие навыков в обосновании выдвигаемых предложений и принимаемых решений.

При трех вопросах в билете общая оценка выставляется следующим образом: «отлично», если все оценки «отлично» или одна из них «хорошо»; «хорошо», если не более одной оценки «удовлетворительно»; «удовлетворительно», если две и более оценок «удовлетворительно»; «неудовлетворительно», если одна оценка «неудовлетворительно», а остальные не выше чем «удовлетворительно» или две оценки «неудовлетворительно».

Практики

Основной целью учебной, производственной , преддипломной практик является формирование у студентов общекультурных, личностных и профессиональных компетенций, направленных на закрепление и углубление теоретической подготовки, овладение умениями и навыками самостоятельной постановки задач, структурирования и анализа полученных результатов, формулировки выводов, приобретение и развитие навыков проведения инженерной и научно-исследовательской работы, подготовку к выполнению выпускной квалификационной работы. Формы проведения указанных видов практики - лабораторная и/или заводская.

В задачи, например производственной практики студентов входят следующие:

-изучение современной элементной базы электронной техники и типовых технологических процессов;

- изучение и анализ возможностей решения задач, возникающих в ходе производственной деятельности, и требующих углубленных знаний;

- анализ научной и практической значимости проводимых работ;

- формирование навыков обобщения и обработки полученных результатов, анализа и осмысления их с учетом литературных данных;

- измерения и экспериментальные исследования объектов электроники;

- участие в проведении модельных и натурных экспериментов по оптимизации структуры и конструкции исследуемых приборов и устройств, оценка их качества и надежности на стадиях проектирования и эксплуатации;

- подготовка результатов исследований для опубликования в научной печати, а также составление обзоров, рефератов, отчетов и докладов;

- применение методов и средств компьютерного моделирования физических процессов и явлений в материалах, приборах и устройствах электроники и наноэлектроники;

- отработка навыков сбора, обработки, анализа и систематизации научно- технической информации по теме индивидуального задания;

– отработка навыков формулирования и решения задач, возникающих в процессе выполнения индивидуального задания;

- выполнение индивидуального задания по производственной практике;

- проведение анализа достоверности полученных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ

Производственная практика проводится в рамках общей концепции подготовки, предполагающей формирование профессиональных и коммуникативных умений, связанных с научно-исследовательской работой, проектно-технологической производственной деятельностью.

Тематика мероприятий, проводимых в рамках производственной практики, связана с изучением основных методов проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения, подготовки технических заданий на

выполнение проектных работ и технологических процессов на производстве; постановкой и проведением исследований характеристик и параметров электронных устройств, объектов микро- и нанотехнологий; диагностикой параметров приборов и устройств в производственных условиях; теоретическим и экспериментальным изучением микро- и квантоворазмерных объектов.

Во время производственной практики студент должен

изучить:

- формы организации научной деятельности в вузе или производственной – на предприятии;
- научно-методическую литературу по правилам оформления результатов научной деятельности,
- литературные и патентные источники по разрабатываемой теме с целью их использования при выполнении выпускной квалификационной работы;
- методы исследования по теме индивидуального задания;
- методы анализа и обработки экспериментальных данных;
- требования к оформлению научно-технической документации;

освоить:

- правила эксплуатации исследовательского или производственного оборудования;
- методы анализа, систематизации и обобщения научно-технической информации по теме индивидуального задания;
- методы анализа достоверности, научной и практической значимости результатов проводимых исследований, а также технико-экономической эффективности разработки.

Содержание программы производственной практики включает в себя:

- изучение возможностей использования новых физических явлений для создания новых материалов, технологий, компонентов, приборов и устройств электроники, микро - и наноэлектроники;
- освоение организационных форм и методов организации научных исследований в высшем учебном заведении или основных производственных программ на промышленном предприятии;
- формирование практических навыков научно-

исследовательской работы в высшей школе, подготовки, систематизации и оформления научного материала по требуемой тематике в соответствии с требованиями ГОСТов;

- оценку достоверности, научной новизны и практической значимости результатов научно-исследовательской работы или проектно-технологического решения;

- сравнение результатов исследований (разработок) с аналогичными отечественными и зарубежными результатами.

Содержание программы производственной практики включает в себя:

- возможное участие магистранта в производственной деятельности;

-встречи со специалистами, знающими постановления, распоряжения, приказы, методические и нормативные материалы;

-встречи со специалистами, знающими технические характеристики и экономические показатели отечественных и зарубежных разработок в области электронного материаловедения, элементной базы электронной техники, электронного приборостроения, применения нанотехнологий в электронике;

-встречи со специалистами, знающими действующие стандарты и технические условия, положения и инструкции по эксплуатации производственного и технологического оборудования, программам испытаний, оформлению технической документации;

-изучение возможностей использования новых физических явлений для создания новых материалов, технологий, компонентов, приборов и устройств электроники, микро - и наноэлектроники;

- изучение современной элементной базы электронной техники;

- изучение современной научно-исследовательской аппаратуры;

-сравнение результатов исследований (разработок) с аналогичными отечественными и зарубежными результатами/

Проведение производственной практики включает ряд взаимосвязанных этапов: организационный; аналитический; основной (расчетно-конструкторский, технологический и (или) экспериментальный) и заключительный, включающий анализ полученных результатов, оформление и защиту отчета.

№ п/п	Разделы (этапы) практики	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов	Формы текущего контроля (отчетная документаця)
1	Организационный этап	Организационное собрание магистрантов с руководителями практики и руководителем ООП, уточнение задач практики, ее содержания в зависимости от места проведения практики. -Заключение договора на прохождение производственной практики (если студент направляется на иное место практики, чем выпускающая кафедра). -Составление и согласование с предприятием программы прохождения производственной практики, в т.ч. индивидуального задания в соответствии с темой НИР.	Договор на прохождение производственной практики (при необходимости) Программа производственной практики
2	Аналитический этап (общая часть)	Анализ индивидуального задания по производственной практике. Формирование плана и графика работы над индивидуальным заданием. Сбор, актуализация информационных ресурсов и обновление теоретико-методологических основ исследования в рамках тематики ВКР	Часть I отчета.
3	Аналитический этап (функциональная часть)	Составление аналитического обзора научно-технической литературы по теме производственной практики Анализ информационных ресурсов и теоретико-методологических основ исследования, предложения и рекомендации по теме индивидуального задания	Часть II отчета
4	Расчетно-конструкторский, технологический и (или) экспериментальный этапы производственной практики	Выполнение основной части индивидуального задания по теме производственной практики. Анализ результатов разработки (экспериментального исследования), моделирование процессов, параметров, характеристик объекта исследования Выводы и заключение по выполнению темы индивидуального задания по производственной практике	Часть III отчета
5	Оформление и защита отчета	Подготовка и презентация отчета по производственной практике	Оформленный отчет, доклад и презентация по результатам производствен-ной практики

График работы студента во время производственной практики включает в себя:

- оформление и получение пропусков на предприятие;

-изучение правил внутреннего распорядка техники безопасности;

-проведение учебных занятий и экскурсий;

-выполнение самостоятельных заданий на конкретном рабочем месте;

-оформление отчета;

-сдачу зачета по практике.

В период практики следует ориентировать студента на разработку темы выпускной квалификационной работы и обоснование целесообразности ее разработки.

ФОРМЫ ОТЧЕТНОСТИ ПО ПРАКТИКЕ

Согласно Положению о порядке проведения практик студентов образовательных организаций высшего образования (Приказ Министерства образования РФ №1154 от 25.03.2003) форма и вид отчетности (дневник, отчет и т.п.) студентов о прохождении практик определяются образовательной организацией.

Общее руководство и контроль за прохождением практики студентов конкретного направления подготовки возлагается приказом ректора на руководителя практики по направлению подготовки магистров.

Перед началом практики руководитель проводит организационное собрание студентов-магистрантов, направляемых на практику, и информирует о ее целях и задачах. Руководитель выдает магистранту:

-индивидуальное задание и план прохождения производственной практики;

- график проведения производственной практики.

Непосредственное руководство и контроль за выполнением индивидуального задания и плана практики студента осуществляется его научным руководителем.

Научный руководитель магистранта:

- осуществляет постановку задач по самостоятельной работе студентов в период практики с выдачей индивидуальных заданий,

оказывает соответствующую консультационную помощь;

- согласовывает график проведения практики и осуществляет систематический контроль за ее ходом и работой студентов;

- оказывает помощь студентам по всем вопросам, связанным с прохождением практики и оформлением дневника и отчета о практике.

При прохождении практики магистрант получает от руководителя указания, рекомендации и разъяснения по всем вопросам, связанным с организацией и прохождением практики, отчитывается о выполняемой работе в соответствии с графиком проведения практики.

По окончании срока производственной практики магистрант предоставляет на кафедру следующие материалы:

- дневник производственной практики;

- отчет о выполнении программы производственной практики;

- отзыв научного руководителя или руководителя от предприятия, на базе которого магистрант проходил практику;

- доклад и презентацию по результатам практики.

В дневнике должны быть отражены результаты текущей работы и выполненные задания. Дневник производственной практики заполняется лично магистрантом. Записи о выполненных работах производятся по мере необходимости, но не реже одного раза в неделю. Достоверность записей проверяется руководителем и заверяется его подписью.

Отчет о практике - основной документ, характеризующий работу студента-магистранта во время практики.

Текст отчета должен быть отредактирован и напечатан с соблюдением правил оформления научных работ, предусмотренных ГОСТом. Структура отчета определяется его формой. В отчет о производственной практике должны быть включены следующие сведения:

- место прохождения (предприятие, структурное подразделение), сроки практики;

- характеристики и параметры изученных компонентов, комплексов и технологических процессов электроники и наноэлектроники;

- характеристики и параметры измерительного оборудования, применяемого на предприятии, в структурном подразделении; программ испытаний продукции;

- особенности применяемых на предприятии, в структурном подразделении информационных технологий и программных продуктов;

- основные методические приемы и правила оформления технической документации;

- перечисление изученных положений и инструкций по эксплуатации производственного и технологического оборудования;

-перечисление изученных постановлений, распоряжений, приказов, методических и нормативных материалов;

- предложения по организации и проведению практики;

- список использованной литературы.

На основании представленных материалов проводится промежуточная аттестация магистранта по итогам производственной практики в форме дифференцированного зачета. Производственная практика считается завершенной при условии выполнения магистрантом всех требований программы практики. Оценка, полученная на дифференцированном зачете, вместе с оценками (зачётами) по теоретическому обучению учитывается при подведении итогов общей успеваемости студентов и назначении стипендии в соответствующем семестре.

Магистранты, не выполнившие программу производственной практики по уважительной причине, направляются на практику вторично в свободное от учебы время или проходят практику в индивидуальном порядке.

Магистранты, не выполнившие без уважительной причины требования программы практики или получившие неудовлетворительную оценку, отчисляются из университета как имеющие академическую задолженность в порядке, предусмотренном Уставом университета и Положением о зачетной и экзаменационной сессиях и порядке ликвидации академической задолженности.

Формы текущего контроля

Для текущего контроля качества усвоения знаний студентами и оценки степени формирования указанных выше компетенций, знаний, умений и практических навыков используется следующий диагностический инструментарий:

- контроль руководителем содержания дневника производственной практики;
- защита студентом отчета о производственной практике.

Методические материалы по производственной практике содержат тестовые задания с возможными вариантами ответов по каждому из разделов, предусмотренных индивидуальным заданием на прохождение практики. Результаты ответов на вопросы тестовых заданий контролируются преподавателем.

7.3 Формы промежуточного контроля

Формой промежуточного контроля по производственной практике является дифференцированный зачет.

7.4 Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, шкал оценивания

Оценка степени формирования указанных выше (п. 7.1) контролируемых компетенций у обучающихся на различных этапах их формирования проводится руководителем в форме текущего контроля содержания дневника производственной практики, тестовых опросов по отдельным разделам индивидуального задания, результатам защиты отчета по производственной практике. Освоение программного материала и достаточно высокая степень формирования контролируемых компетенций обучающегося служат основанием для допуска обучающегося к этапу промежуточной аттестации – дифференцированному зачету по практике.

Уровень подготовки студента определяется составом и степенью формирования приобретенных компетенций, усвоенных теоретических знаний и методов, умением осознанно, эффективно применять их при целенаправленном поиске решения актуальных проблем электроники и наноэлектроники и считается соответствующим требованиям стандартов, если студент

демонстрирует способности решать задачи научно-исследовательской работы и профессиональной деятельности в типовых ситуациях без погрешностей принципиального характера.

Показатели оценивания компетенций представлены в разделе 2 настоящей программы производственной практики с декомпозицией «знать», «уметь», «владеть». Основными этапами формирования вышеуказанных компетенций при прохождении практики являются последовательное прохождение содержательно связанных между собой этапов практики. Итоговая оценка, полученная с учетом оценивания компетенций на различных этапах их формирования, показывает успешность освоения компетенций обучающимися в период производственной практики.

Прохождение практики осуществляется в соответствии с программой, разработанной обучающимся совместно с руководителем практики от вуза (научным руководителем студента), согласованной с руководителем от предприятия (при наличии) и утвержденной руководителем ООП. Результаты практики должны быть оформлены в виде отчета. Отчет является основанием для аттестации студента.

По итогам производственной практики предусмотрена защита, которая проходит на заседании выпускающей кафедры или перед комиссией в составе руководителя ООП «Нанотехнологии в электронике», руководителя практики группы студентов или научных руководителей магистрантов в форме доклада с презентацией в установленные учебном планом сроки.

По результатам аттестации студенту выставляется дифференцированный зачет (зачет с оценкой).

При выставлении итоговой оценки учитываются следующие факторы:

1) отзыв руководителя от университета, отражающий следующие характеристики студента:

– соблюдение графика производственной практики;

– качество подготовки отчетной документации (проверка отчета на соблюдение требований по формальным признакам);

– выполнение программы производственной практики и отражение результатов в отчете;

– самостоятельность при выполнении заданий, предусмотренных программой производственной практики;

– научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснованность предложений и рекомендаций;

2) процедура защиты отчета:

– полнота отражения в докладе и презентации результатов производственной практики, отраженных в отчете;

– знание предметной области;

– научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснованность предложений и рекомендаций;

– грамотность, развернутость, структурированность и логичность ответов на вопросы;

3) отзыв, подготовленный руководителем от предприятия (организации), характеризующий выполнение обязанностей практиканта.

Аттестация студента осуществляется на основании следующих критериев:

Шкала оценивания	**Критерий**
Зачтено с оценкой «отлично»	*Отзыв руководителя от вуза:* – студент строго соблюдал график практики; – отчет полностью соответствует требованиям, предъявляемым к отчетной документации; – программа производственной практики выполнена полностью; – задания выполнялись полностью самостоятельно, студент проявил творческий подход к решению задач практики; – результаты, полученные студентом, обладают научной новизной и (или) практической значимостью, студент внес обоснованные предложения и рекомендации. *Процедура защиты отчета:* –доклад и презентация полностью отражают результаты,

	полученные студентом в период практики и представленные в отчете; – студент показал глубокие знания вопросов темы, свободно оперировал данными исследования; – результаты, полученные студентом, обладают научной новизной и(или) практической значимостью, студент внес обоснованные предложения и рекомендации; – студент правильно и грамотно ответил на все поставленные вопросы. *Отзыв руководителя от предприятия:* студент получил положительный отзыв от руководителя практики от предприятия.
Зачтено с оценкой «хорошо»	*Отзыв руководителя от вуза:* – студент в основном соблюдал график практики; – отчет соответствует требованиям, предъявляемым к отчетной документации, студентом допущены несущественные ошибки, отчет выполнен с незначительными замечаниями по оформлению; – программа производственной практики выполнена полностью; – задания выполнялись самостоятельно при определенной консультационной поддержке со стороны руководителя от вуза; – результаты, полученные студентом, обладают научной новизной и (или) практической значимостью, студент внес обоснованные предложения и рекомендации. *Процедура защиты отчета:* – доклад и презентация отражают основные результаты, полученные студентом в период практики и представленные отчете; – студент показал базовые знания вопросов темы, оперировал данными исследования; – результаты, полученные студентом, обладают научной новизной и(или) практической значимостью, студент внес обоснованные предложения и рекомендации; – при ответах на вопросы были допущены ошибки, которые носят несущественный характер. *Отзыв руководителя от предприятия:* студент получил положительный отзыв от руководителя практики от предприятия с незначительными замечаниями и рекомендациями.
Зачтено	*Отзыв руководителя от вуза:*

с оценкой «удовлетвори-тельно»	– студент не соблюдал график практики без уважительной причины; – отчет имеет поверхностный анализ собранного материала, большинство материалов скомпилировано из существующих источников без необходимого осмысления, имеет нечеткую последовательность изложения материала, студентом допущены существенные ошибки, отчет выполнен с многочисленными замечаниями по его оформлению; – программа производственной практики выполнена полностью; – задания выполнялись самостоятельно лишь частично, консультационная поддержка со стороны руководителя от вуза не была должным образом воспринята студентом; – результаты, полученные студентом, не обладают научной новизной и(или) практической значимостью, предложения и рекомендации не имеют достаточного обоснования. *Процедура защиты отчета:* – доклад и презентация поверхностны, не отражают основные результаты, полученные студентом в период практики и представленные отчете; – студент показал слабые знания вопросов темы, не оперировал данными исследования; – результаты, полученные студентом, не обладают научной новизной и(или) практической значимостью, предложения и рекомендации не имеют достаточного обоснования; – студент не дал полных и аргументированных ответов на заданные вопросы. *Отзыв руководителя от предприятия:* в отзыве руководителя практики от предприятия имеются существенные замечания.
Не зачтено ***с оценкой «неудовлетво ри-тельно»***	*Отзыв руководителя от вуза:* – студент не соблюдал график практики без уважительной причины; – отчет не имеет детализированного анализа собранного материала, представленные в отчет материалы скомпилированы из существующих источников без необходимого осмысления, студентом допущены принципиальные ошибки в его изложении, отчет не соответствует требованиям к оформлению; – программа производственной практики выполнена не полностью; – задания выполнялись не самостоятельно, консультационная поддержка со стороны руководителя от вуза не оказывалась по причине неявки студента; – результаты, полученные студентом, не обладают научной новизной и (или) практической значимостью, отсутствуют предложения и рекомендации.

	Процедура защиты отчета: – доклад и презентация выполнены без должной связи с программой практики; – студент показал слабые знания вопросов темы, не оперировал данными исследования; – результаты, полученные студентом, не обладают научной новизной и (или) практической значимостью, отсутствуют предложения и рекомендации; – студент затруднился ответить на поставленные вопросы или допустил в ответах принципиальные ошибки. *Отзыв руководителя от предприятия:* отзыв руководителя практики от предприятия отсутствует или в нем имеются существенные критические замечания.

Итоговая дифференцированная оценка определяется как средняя арифметическая всех выставленных оценок.

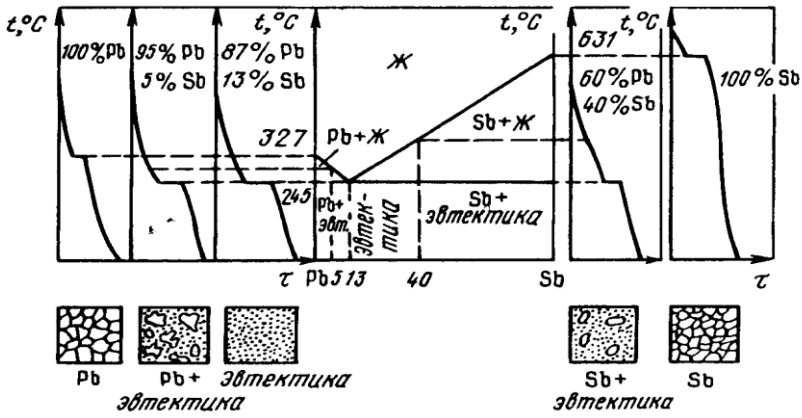
Результаты аттестации производственной практики фиксируются в экзаменационной ведомости и зачетных книжках студентов. Получение обучающимся неудовлетворительной оценки является академической задолженностью. Ликвидация академической задолженности по практике осуществляется путем ее повторной отработки по индивидуальному графику.

5021

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПО КРИВЫМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Методические указания к лабораторной работе № 21



Рязань 2016

УДК 621.382

Построение диаграмм состояния металлических сплавов по кривым охлаждения: методические указания к лабораторной работе № 21; сост.: С.И. Мальченко, Т.А.Холомина, А.Ю.Холомин / Рязан. гос. радиотехн. ун-т.- Рязань, 2016. 20 с.

Приведены краткие сведения по теории образования, физико-химическим свойствам и особенностям построения диаграмм состояния металлических сплавов на основе данных метода термического анализа, а также методика выполнения лабораторной работы при помощи виртуальной исследовательской установки, разработанной в среде инженерного графического программирования LabVIEW.

Предназначены для аудиторной и самостоятельной работы студентов, изучающих материаловедческие дисциплины.

Ил. 12. Библиогр.: 7 назв.

Металлические сплавы, термический анализ, диаграммы состояния

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: Региональный центр зондовой микроскопии (коллективного пользования) при кафедре микро- и наноэлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета (директор центра Н.В.Вишняков)

Построение диаграмм состояния металлических сплавов по кривым охлаждения

Составители: М а л ь ч е н к о Сергей Иосифович
Х о л о м и н а Татьяна Андреевна
Х о л о м и н Александр Юрьевич

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В.Макушина
Подписано в печать 16. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 0,75.
Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение метода термического анализа сплавов - зависимости их фазового состояния от температуры и концентрации компонентов при помощи моделирования в среде инженерного графического программирования LabVIEW кривых охлаждения металлических сплавов разного состава и построения диаграмм состояния.

1.Основные теоретические сведения

Диаграммы состояния сплавов показывают фазовый состав сплава данных компонентов при любой концентрации и при любой температуре. Диаграммы строят при медленном охлаждении, поэтому структуры на диаграмме соответствуют равновесному состоянию. Критические точки сплавов - это температуры фазовых превращений.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный жидкий раствор) различают следующие основные типы диаграмм состояния:

1) при образовании компонентами механической смеси;

2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать элементы диаграмм состояния разных типов. [1-5].

Образование сплавов из компонентов, кристаллизующихся в твердом состоянии в **механическую смесь,** происходит, когда элементы обладают ограниченной растворимостью, а также из компонентов, не участвующих в образовании сплава - химического соединения. Механические смеси, таким образом, могут состоять из кристаллов чистых компонентов, твердых растворов и химических соединений. При образовании механической смеси кристаллические решетки отдельных фаз не меняются.

При изучении диаграмм состояния сплавов, компоненты которых в твердом состоянии не растворяются друг в друге (например, свинец—сурьма, олово—цинк), необходимо четко представлять, что такое **эвтектика.** Эвтектический сплав образуется в результате того, что компоненты друг в друге не растворяются, и представляет собой очень тонкую механическую смесь двух фаз. Так как обе фазы кристаллизуются одновременно при одной и той же температуре, то отдельные кристаллы

обеих фаз не успевают вырасти до значительных размеров и образуют настолько мелкую механическую смесь, что практически их нельзя разделить. Поэтому эвтектика обладает специфическими, только ей присущими свойствами. Эти свойства резко отличаются от свойств входящих в нее компонентов. Необходимо обратить внимание на то, что температура окончательного затвердевания сплавов, образующих эвтектику, от состава сплава не зависит. На диаграмме образование эвтектики характеризуется горизонтальной линией, при этом состав жидкого сплава при температуре окончательного затвердевания всегда одинаковый. Это означает, что состав эвтектики во всех сплавах один и тот же, количество же эвтектики в разных сплавах разное. Сплавы, состав которых соответствует минимальной температуре кристаллизации (плавления) называются эвтектическими. Сплавы, состав которых соответствует концентрациям компонентов до эвтектического и после эвтектического состояния называются соответственно до- и заэвтектическими. [1-3].

Сплавы – **твердые растворы** могут обладать как ограниченной, так и неограниченной растворимостью компонентов. Существуют сплавы – твердые растворы, создаваемые замещением компонентов или внедрением одного из компонентов в кристаллическую решетку другого [1-3]. Особенности диаграмм состояния сплавов с неограниченной и ограниченной растворимостью компонентов более подробно рассмотрены в [1-2].

Твердые растворы — это сложные, но однородные вещества, поэтому под микроскопом твердые растворы, подобно чистому металлу, представляют собой однородные кристаллические зерна. В сплавах, образующих твердые растворы, в отличие от сплавов с эвтектикой, температуры и начала, и конца затвердевания зависят от состава и все сплавы затвердевают в определенном интервале температур. Если вещества обладают неограниченной растворимостью, то ни в одном сплаве не будет кристаллов свободных компонентов, т.е. все сплавы данной системы однофазны и представляют собой однородный твердый раствор

Подавляющее большинство сплавов обладают ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии, причем предел растворимости уменьшается с уменьшением температуры (например, сплавы свинец—олово, медь—серебро, алюминий—$CuAl_2$).В этих случаях эвтектика появляется только в тех сплавах, в которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости.

В сплавах, у которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости, структура после окончательного затвердевания представляет собой однородный твердый раствор. Уже в твердом состоянии, в связи с уменьшением предела растворимости при

понижении температуры, из твердого раствора начинает выделяться вторая фаза. Например, в сплавах свинец—олово, содержащих менее 19,5% олова, в сплавах медь—серебро, содержащих менее 7% серебра, и в сплавах алюминий—Си$A1_2$, содержащих менее 5,67% меди, при охлаждении ниже кривой растворимости начинает образовываться вторая фаза и при комнатной температуре сплавы получаются двухфазными.

Отметим, что процессы кристаллизации из одного твердого состояния в другое происходят по тем же законам, что и из жидкого, т.е. путем зарождения центров кристаллизации и последующего их роста, поэтому для образования второй фазы охлаждение должно быть медленным. Следует иметь в виду, что продукты вторичной кристаллизации всегда мельче, чем первичной. Важно помнить, что у сплавов, у которых есть превращения в твердом состоянии, можно менять структуру, а значит, и свойства путем нагрева и охлаждения с различной скоростью, т.е. путем термической обработки.

Диаграммы состояния сплавов, образующих устойчивое **химическое соединение** (магний—кальций, цинк—магний), можно рассматривать как состоящие из двух самостоятельных диаграмм, у которых вторым компонентом является химическое соединение [1-4].

Элементы сплавов, образующие химические соединения, обычно резко отличаются по размерам атомов, строению электронных оболочек и параметрам кристаллических решеток. К образованию химических соединений склонны элементы, далеко расположенные друг от друга в периодической таблице Д.И. Менделеева.

В отличие от обычных химических соединений многие металлические соединения имеют переменный состав, который может изменяться в широких пределах. Получение химического соединения A_mB_n с образованием однородного кристаллического вещества возможно только при строго определенных соотношениях концентраций компонентов. При этом образуется кристаллическая решетка, не похожая на решетки сплавляемых компонентов. Примером может служить сплав Cu–Mg при содержании 17 % Mg. Свойства сплава – химического соединения резко отличаются от свойств элементов, образующих его.

Сплавы – химические соединения не всегда встречаются в чистом виде. Например, при избытке растворимого компонента возможно образование химического соединения в комбинации с твердым раствором.

Физические, механические и технологические свойства сплава зависят от его структуры. Зависимость между типом диаграммы состояния сплава и его свойствами, установленную Н.С.Курнаковым и А.А.Бочваром Диаграммы состав—свойства для сплавов разных типов приведены в [1-3].

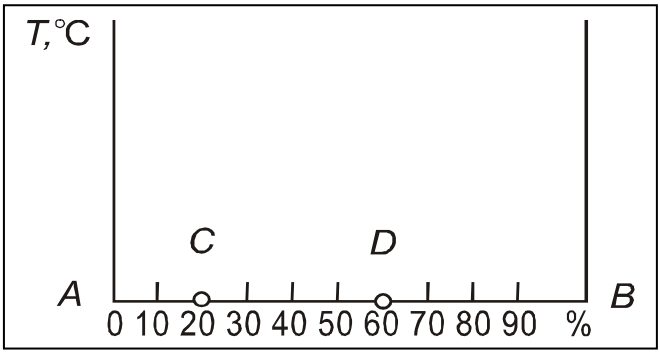


Рис. 1.1. Координаты для изображения диаграммы состояния двухкомпонентной системы

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение фазового состояния сплавов и критических точек в зависимости от концентрации компонентов и температуры в условиях термодинамического равновесия.

Для того чтобы обеспечить равновесное состояние системы охлаждение сплава из жидкого состояния осуществляют очень медленно. *Равновесными* считаются такие условия, при которых процессы, протекающие в системе, являются обратимыми. В данном случае процессы, происходящие при охлаждении сплава, должны в точности совпадать с процессами, протекающими при его нагреве.

Диаграмму состояния строят в координатах температура–концентрация (рис. 1.1). Для сплавов, состоящих из двух компонентов *A* и *B*, состав характеризуется отрезком прямой, принятым за 100%. Крайние точки *A* и *B* соответствуют 100% чистых компонентов. Любая точка на этом отрезке характеризует состав двойного сплава. Так, например, точка *C* соответствует сплаву, состоящему из 20% *B* и 80% *A*; точка *D* – 60% *B* и 40% *A*.

Для построения диаграммы состояния из компонентов изготовляют серию сплавов различного состава и для каждого из них строят кривую охлаждения по результатам термического анализа в координатах температура–время (так же, как для металлов). Особенности поликристаллического строения сплавов в твердом состоянии изучаются с помощью оптического микроскопа обычно при 100 – 1000-кратном увеличении. Атомная структура сплавов и параметры кристаллических решеток определяются методом рентгеноструктурного анализа.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг

в друге, образуя однородный жидкий раствор), различают следующие основные типы диаграмм состояния:

1) при образовании компонентами механической смеси;

2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать фрагменты диаграмм состояния разных типов.

1.1. Диаграмма состояния сплавов из компонентов, образующих в твердом состоянии механическую смесь

Экспериментально установлено, что при совместной кристаллизации сплавов, компоненты которых не растворяются друг в друге в твердом состоянии, температура начала кристаллизации всегда ниже, чем у исходных компонентов. Температура же окончания процесса перехода в твердое состояние одинакова для сплавов любого состава двухкомпонентной системы.

На рис. 1.2 приведены кривые охлаждения для разных концентраций компонентов *A* и *B*, а также диаграмма состояния сплава. Выше линии *KCN* рис. 1.2,б все сплавы двухкомпонентной систе мы).

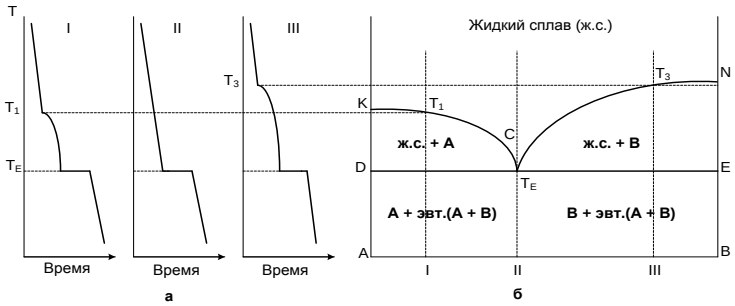


Рис. 1.2. Кривые охлаждения с концентрацией компонентов I, II, III (а) и диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии сплав типа механической смеси компонентов *A* и *B* (б)

представляют собой однофазный расплав (жидкий сплав - ж. с.). Эта линия называется ***линией ликвидуса*** (с греч. – жидкий), линия DCE – ***линией солидуса*** (с греч. – твердый). Ниже линии DCE все сплавы находятся в твердом состоянии. Сплав, соответствующий точке *C*, называ-

ется *эвтектическим* (эвтектикой; с греч. – легко плавящийся

В доэвтектических сплавах сначала при охлаждении ниже линии ликвидуса КС выделяются кристаллы компонента А, а в заэвтектических – ниже линии CN – кристаллы компонента В. После затвердевания, т.е. ниже линии солидуса ДСЕ, доэвтектические сплавы состоят из кристаллов А и эвтектики, а заэвтектические – из кристаллов В и эвтектики.

1.2. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Рассмотрим построение диаграммы состояния для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии. Например, экспериментально получены кривые охлаждения компонентов *A* и *B* и сплавов I (70% *A* и 30% *B*), II (50% *A* и 50% *B*) и III (20% *A* и 80% *B*) (рис. 1.3,а). Кристаллизация компонента А начинается и заканчивается при постоянной температуре t_A. Аналогично происходит кристаллизация компонента В при температуре t_B. Кристаллизация сплавов I, II и III происходит в некотором интервале температур. Кристаллизация сплава I начинается при температуре t_1 и заканчивается при температуре t_2 с образованием твердого раствора α. Аналогично происходит кристаллизация и двух других сплавов – при температуре t_3 начинается и при температуре t_4 заканчивается затвердевание сплава II, а сплава III – при температурах t_5 и t_6 соответственно. Разница только в интервале температур начала и конца кристаллизации.

Если на оси абсцисс сетки в координатах температура – концентра-

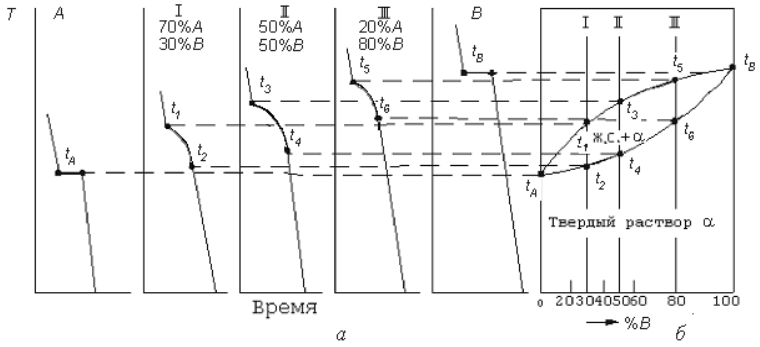


Рис. 1.3. Построение диаграммы состояния сплавов для случая неограниченной растворимости компонентов *A* и *B* в твердом состоянии:

а – кривые охлаждения; б – диаграмма состояния

ция (рис. 1.3, б) отметить точками исследованные сплавы и в каждой из этих точек восстановить перпендикуляры, т.е. провести линии сплавов, затем на эти линии, а также на левую и правую ординаты температур, соответствующие компонентам *A* (левая) и *B* (правая), перенести найденные критические точки от t_A до t_B, и одноименные (имеющие одинаковый физический смысл) критические точки соединить плавными кривыми, то получится диаграмма состояния сплавов *A* и *B* с неограниченной растворимостью указанных компонентов *A* и *B* в твердом состоянии (рис. 1.3, б).

На этой диаграмме кривая $t_A t_1 t_3 t_5 t_B$ – кривая начала затвердевания сплавов – *линия ликвидуса*, а кривая $t_A t_2 t_4 t_6 t_B$ – кривая конца затвердевания – *линия солидуса.*

1.3. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Один из видов такой диаграммы состояния показан на рис. 1.4. Число фаз в данной системе три – жидкий раствор, твердый раствор компонента *B* в компоненте *A* (обозначим его α) и твердый раствор компонента *A* в компоненте B (обозначим его β).

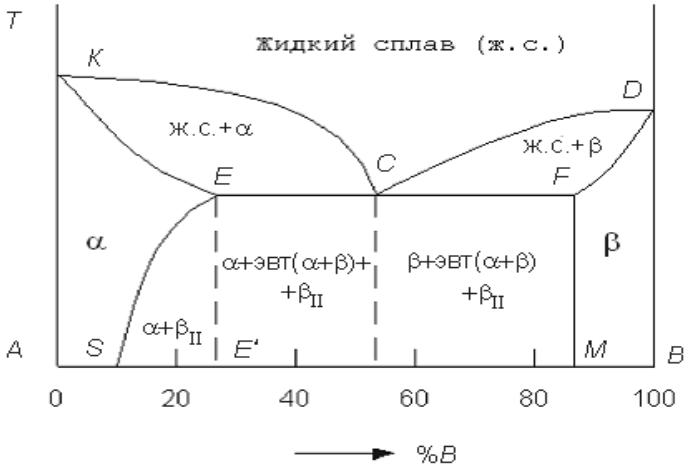


Рис. 1.4. Диаграмма состояния сплавов для случая ограниченной растворимости компонентов *A* и *B* в твердом состоянии

На этой диаграмме линия *KCD* – линия ликвидуса, линия *KECFD* – линия солидуса. По линии ликвидуса *KC* из жидкого сплава выделяются кристаллы α, а по линии *CD* – кристаллы β. На линии солидуса *KE*

сплавы затвердевают с образованием кристаллов α, на линии *DF* – кристаллов β. На линии солидуса *ECF* происходит одновременная кристаллизация α- и β-фаз с образованием эвтектики. Сплав состава, соответствующего точке *C,* после затвердевания состоит только из одной эвтектики α+β. Аналогично ранее рассмотренному случаю сплавы, по своему составу находящиеся левее эвтектической точки *C* (на линии *EC*), после затвердевания имеют структуру α+эвтектика (α+β) и являются доэвтектическими. Сплавы, по своему составу лежащие правее точки *C* (на линии *CF*), после затвердевания имеют структуру β+эвтектика (α+β) и являются заэвтектическими.

Линия *ES* показывает ограниченную растворимость в твердом состоянии компонента *B* в компоненте *A*, уменьшающуюся с понижением температуры, а линия *FM* – растворимость компонента *A* в *B*, не изменяющуюся с понижением температуры.

Точка *E* характеризует предельную растворимость компонента *B* в компоненте *A*, а точка *F* – то же для *A* в *B*. Если кристаллизуются сплавы, состав которых находится левее точки *S* (или правее точки *M*), то при любой температуре в твердом состоянии все количество компонентов *B* (или *A*) находится в твердом растворе, и структура таких сплавов состоит из зерен α (или β). В сплавах, состав которых находится между точками *S* и *E′*, т.е. за пределом растворимости *B* в *A*, образовавшиеся при затвердевании кристаллы α при понижении температуры ниже линии *ES* пересыщены компонентом *B* и поэтому происходит выделение из них избыточных кристаллов, которыми являются кристаллы β концентрации, соответствующей точке *M*, называемые вторичными (β_{11}). После полного охлаждения эти сплавы имеют структуру, состоящую из кристаллов α состава точки *S* и кристаллов β_{11} – $\alpha + \beta_{11}$. В сплавах состава линии *EC*, имеющих после затвердевания структуру α + эвтектика (α+β), из кристаллов α тоже выделяются кристаллы β, и после полного охлаждения будет структура α + эвтектика (α+β)+β_{11}.

Процесс выделения вторичных кристаллов из твердого раствора называется *вторичной кристаллизацией*, в отличие от образования кристаллов в жидком сплаве (*первичная кристаллизация*).

1.4. Диаграмма состояния сплавов с образованием компонентами химического соединения

Химическое соединение обозначают A_mB_n. Это означает, что в данном соединении на *m* атомов компонента *A* приходится *n* атомов компонента *B*. Диаграмма состояния для случая образования компонентами сплава - химического соединения, состав которого при нагреве и охла-

ждении не изменяется, приведена на рис. 1.5.

Данная диаграмма составлена как бы из двух диаграмм: компонент *A* – химическое соединение A_mB_n и компонент *B* – химическое соединение A_mB_n. В сплавах левее точки *C* (соответствующей по составу химическому соединению A_mB_n) компонента *A* имеется больше, чем входит в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах левее точки *C* образуется эвтектика $\alpha + A_mB_n$. В сплавах правее точки *C* компонента *B* больше, чем может входить в химическое соединение. Следовательно, в этих сплавах образуется эвтектика $A_mB_n+\beta$.

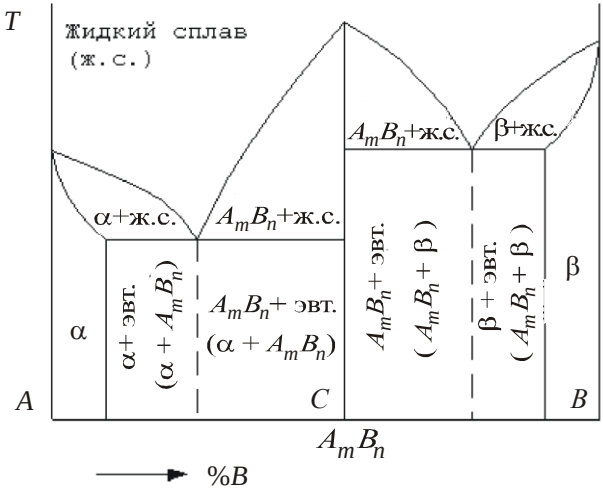


Рис. 1.5. Диаграмма состояния сплавов для случая образования компо нентами А и В сплава - химического соединения

1.5 Диаграмма состояния сплава железо-цементит(Fe–Fe_3C)

Стали и чугуны, относящиеся к черным сплавам (в отличие от цветных), составляют около 95% мирового выпуска металлопродукции. Поэтому изучение диаграммы состояния сплава железо-цементит (Fe–Fe_3C) имеет большое значение для технических специалистов. Диаграмма состояния Fe–Fe_3C (в несколько упрощенном виде) приведена на рис. 1.6. Анализ диаграммы состояния показывает, что она содержит фрагменты диаграмм состояния сплавов, которые создаются при образовании компонентами механической смеси; твердых растворов внедрения с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии; образовании компонентами химического соединения.

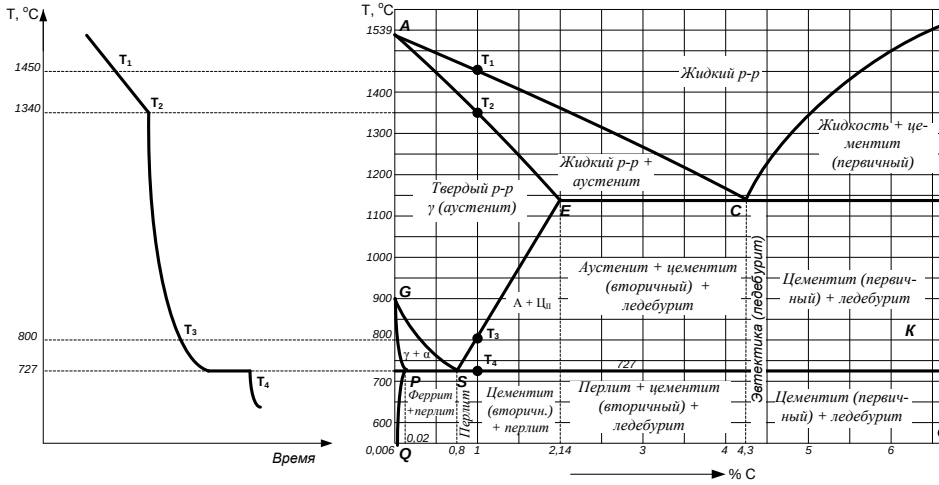
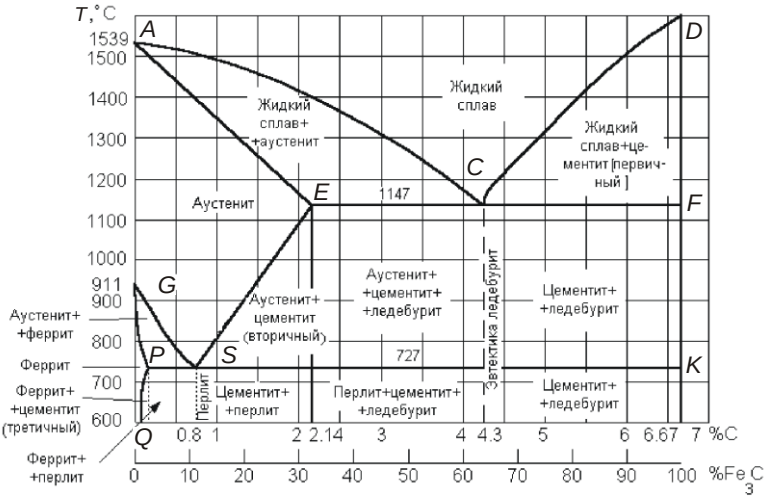


Рис.1.6. Диаграмма состояния Fe–Fe_3C (в упрощенном виде)



Подробное рассмотрение особенностей сплавов на основе железа и углерода приведено в учебных пособиях[1-4,7]. Разнообразие свойств сплавов обусловлено, прежде всего, полиморфизмом железа. В сплавах

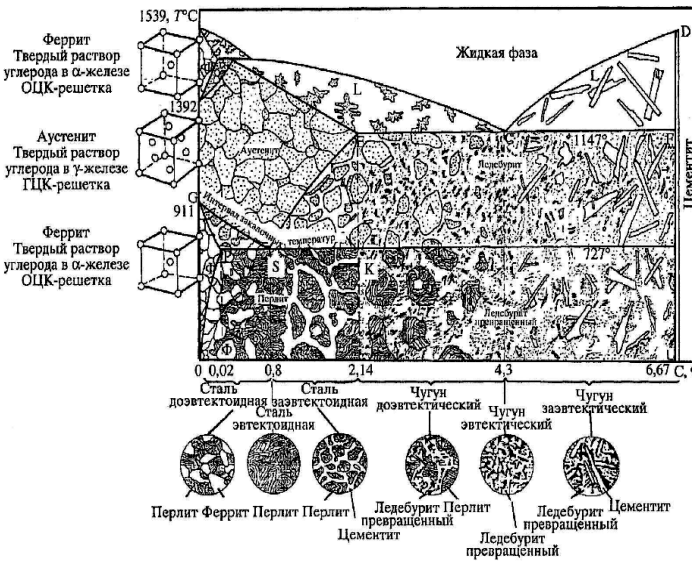


Рис. 1.7 Основные фазы на диаграмме состояния железо - цементит

имеются три твердые фазы – феррит, цементит и аустенит и эти же фазы в структурно связанном состоянии: эвтектоид – перлит и эвтектика – ледебурит (Рис.1.7).

В сплавах железо–углерод при распаде аустенита возможна кристаллизация углерода в свободном состоянии в виде графита.

Графит является неметаллической фазой, он мягок и обладает низкой пластичностью, располагается в основной массе сплава, имеет развитую объемную форму в виде пластинок.

Диаграмма состояния системы железо–цементит используется на практике для определения видов и режимов термической обработки стали с целью придания сплаву необходимых свойств.

2. Описание лабораторной работы

Работа выполняется на персональном компьютере (ПК), на котором сформирована программа, моделирующая установку для термического анализа сплавов. При работе с программой используются обычные приемы управления, характерные для операционной системы Windows. Для начала работы следует запустить на исполнение файл **Терм_анал_спл.** На экране появится окно с названием лабораторной



Рис.2.1. Окно приветствия лабораторной работы

работы, как показано на рис. 2.1.

Для продолжения работы следует использовать кнопку «Продолжить». Если передумали, то кнопку «Выход». Если работа будет продолжена, то появится окно с элементами теории, в котором, используя кнопку «Начинаем», можно приступить к выполнению работы. При этом на экране монитора появится виртуальная лабораторная установка для термического анализа сплавов, как показано на рис.2. 3.

В установке предусмотрено исследование восьми различных образцов сплавов, каждый из которых имеет восемь различных

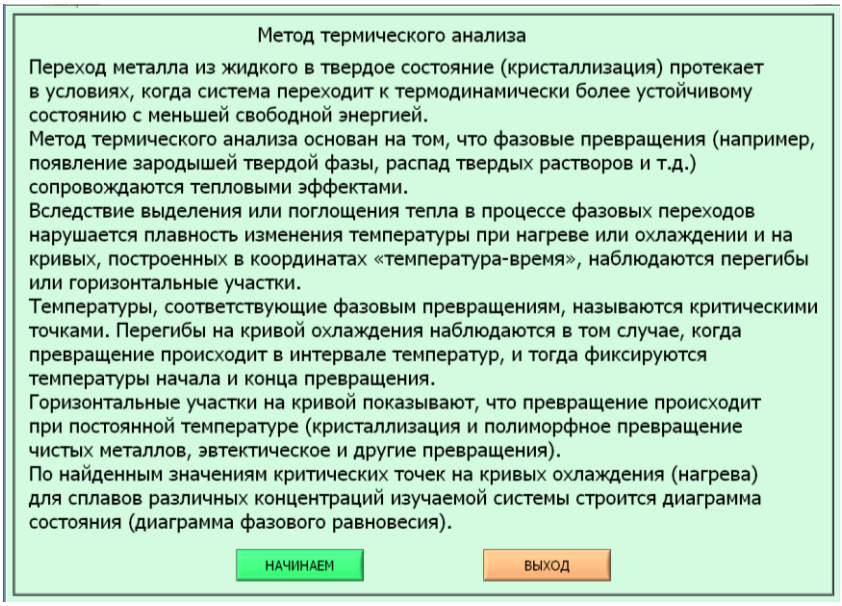


Рис. 2.2. Окно с описанием метода термического анализа

процентных составов компонентов. Вначале необходимо выбрать образец для исследования и его состав. Щелчок мышкой по кнопке «Образец - X» позволяет выбрать необходимый образец, а по кнопке «Состав - X» процентный состав образца. Процентный состав после выбора образца отображается в соответствующих окнах. Окончательный результат подтверждается щелчком по кнопке «Выбран». После этого необходимо включить приборы щелчком по соответствующим тумблерам. Если приборы не включены перед началом работы, то появится предупреждающее сообщение программы. На табло в верхней части окна отображается информация о режимах

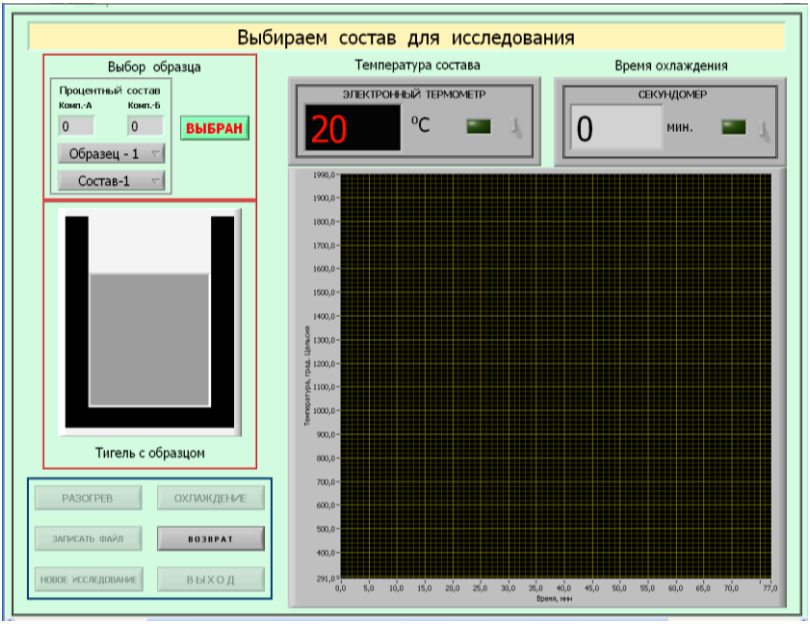
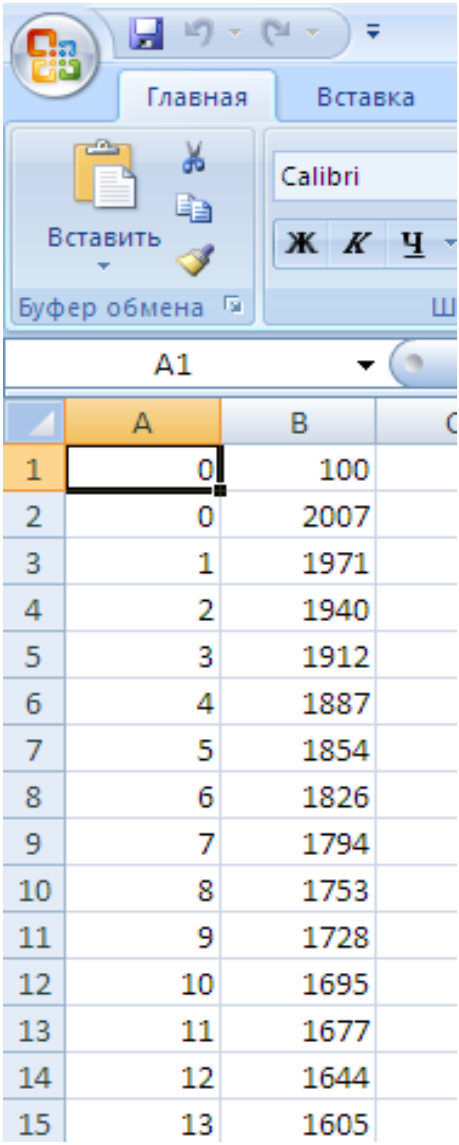


Рис. 2.3. Окно виртуальной лабораторной установки для проведения термического анализа

работы установки.

Работа начинается с разогрева образца в виртуальном тигле до температуры 2000^0C. Для этого следует щелкнуть по кнопке «Разогрев». В этом случае включается «электронагреватель» и температура расплава возрастает. При достижении температуры 2000^0C установка переходит в режим ожидания. Для охлаждения состава следует щелкнуть по кнопке «Охлаждение» и предполагается, что тигель с расплавом начинает охлаждаться естественным образом за счет теплообмена с окружающей средой. На графической панели отображается по вертикали температура расплава, а по горизонтали время в минутах. В программе для удобства использован режим ускорение времени при проведения анализа.

На графической панели строится график зависимости температуры сплава от времени. После окончания построения графика массив данных можно записать в файл для дальнейшего анализа. Для этого следует использовать кнопку «Записать в файл».



	A	B
1	0	100
2	0	2007
3	1	1971
4	2	1940
5	3	1912
6	4	1887
7	5	1854
8	6	1826
9	7	1794
10	8	1753
11	9	1728
12	10	1695
13	11	1677
14	12	1644
15	13	1605

Рис. 2.4. Массив данных, загруженный в программу Excel для анализа

ВНИМАНИЕ! Файл всегда записывается в папку «Student» на рабочем столе с раширением ***.txt**. Имя файла может быть любым. Рекомендуется делать его уникальным с указанием номера группы и процентным составом (можно указать и фамилию одного из студентов бригады), например **322Иванов-4-7.txt**. Студент Иванов, группа 322, образец 4 состав 7. Таким образом, после выполнения лабораторной работы в этой папке будет восемь различных файлов с разными составами для одного образца. Эти файлы можно загрузить в программу Excel для дальнейшей обработки.

Возможен вариант, когда на графике охлаждения расплава на графической панели (рис. 2.3) фиксируются особые точки охлаждения расплава с известной концентрацией компонентов и затем, составив соответствующую таблицу, можно приступить к анализу диаграммы состояния расплава и ее построению.

Для работы в программе Excel необходимо **Открыть** файл с Вашими данными и указать вариант расширения ***.txt.** В дальнейшем указать **Формат данных** (*с*

разделителями) «**Далее**», **Символом разделителя является** (*знак табуляции*) «**Далее**», **Формат данных столбца** (*общий*) «**Готово**» (такая последовательность команд характерна для Excel 2003). После этого в программе отобразится массив данных, как показано на рис. 2.4. В первых строчках столбцов указывается процентный состав вещества А и В, а ниже идут данные взятые из Ваших файлов. Слева время в минутах, а справа температура в градусах Цельсия.

Затем, используя эти массивы данных, можно в программе Excel построить графики изменения температуры при охлаждении расплава. Для этого следует выделить оба столбца (кроме первых строк) и **Вставить** в программу **Точечную диаграмму** любого вида. На экране появится график охлаждения расплава. Пример такого графика показан на рис. 2.5 перед разделом «Содержание отчета».

Таким образом, можно построить восемь графиков охлаждения расплавов с различной процентной концентрацией компонентов. Затем их можно использовать для построения диаграммы состояния образца сплава.

3. Выполнение работы

1. Получить у преподавателя задание (номер образца) на проведение термического анализа указанного образца сплава.
2. Запустить на исполнение файл с лабораторной работой, как указано в разделе 2 методического пособия. Рекомендуется ознакомиться с общетеоретической частью работы, и затем перейти в режим термического анализа расплава.
3. Выбрать указанный преподавателем образец сплава для исследования.
4. Выбрать «Состав-1» и после этого щелчком по кнопке «Выбран» подтвердить факт выбора образца и состава компонентов.
5. Включить все приборы и произвести разогрев сплава до температуры 2000^0С щелчком по кнопке «Разогрев». Дождаться остановки разогрева расплава.
6. Приступить к охлаждению расплава щелчком по кнопке «Охлаждение». На графической панели будет отображаться график изменения температуры при охлаждении расплава.
7. После достижения минимальной температуры сплава следует записать полученный массив данных в файл для дальнейшей обработки, как показано в разделе 2 методических указаний используя кнопку «Записать в файл». Имя файла задавать, как рекомендовано в разделе 2 методического указания. Щелчком по кнопке «Новое исследование» перейти к исследованию нового состава сплава.

8. Повторить пункты с 4 по 7 методических указаний для каждого состава сплава.

9. Используя программу Excel построить восемь графиков охлаждения сплава с разными составами компонентов.

10. Используя полученные графики, построить диаграмму состояния исследуемого сплава.

11. Оформить полученные результаты в виде таблиц и графиков.

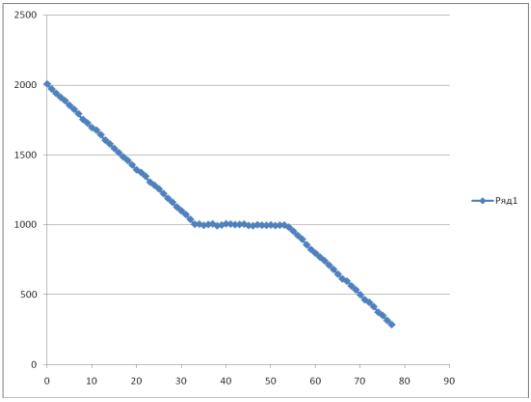


Рис. 2.5. График охлаждения расплава построенный в программе Excel

4. Содержание отчета

1) Наименование работы.

2) Цель работы.

3) Краткие теоретические сведения (основные определения, расчетные соотношения, методика эксперимента и схемы измерений, которые выполняются карандашом в соответствии с требованиями ЕСКД).

4) Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.

5) Выводы, включающие анализ полученных результатов, и сравнение их со справочными данными

5.Контрольные вопросы

1.Чем обусловлен горизонтальный участок на кривых охлаждения металлов и сплавов?

2.Что такое критическая точка на кривых охлаждения или нагревания металлов и сплавов?

3.Какой физический процесс является основой процесса получения сплава?

4.Какой процесс называется термическим анализом металлов и сплавов?

5.По каким признакам легированный металл отличается от сплава?

6.Что происходит при перекристаллизации металлов в твердом состоянии?

7.Какое явление называется полиморфизмом?

8.Что происходит при перекристаллизации металлов в твердом состоянии?

9. Что такое диаграмма состояния сплава?

10.Что такое линия ликвидуса?

11.Что такое линия солидуса?

12.Какие свойства характерны для эвтектического сплава?

13.Какие сплавы называются заэвтектическими?

14.Что такое твердая эвтектика?

15.Что такое эвтектоид?

16.Какие фазы содержит сплав с ограниченной растворимостью компонентов А и В в твердом состоянии (по диаграмме состояния)?

17.Какие фазовые состояния сплава типа «механическая смесь компонентов» иллюстрирует диаграмма состояния?

18.Какие фазовые состояния сплава типа «механическая смесь компонентов» иллюстрирует диаграмма состояния?

19.Поясните особенности основных типов диаграмм состояния двухкомпонентных сплавов.

20.Какие фазы входят в структуры сплавов железа с углеродом в соответствии с диаграммой состояния при нормальной температуре?

21.Какой сплав называется аустенитом?

22.Какой сплав называется ферритом?

23.Какой сплав называется цементитом?

24.По диаграмме Fe—Fe_3C определите максимальное содержание углерода в аустените при 800°С.

25.При исследовании структуры стали установлено, что в ней содержится примерно 30% перлита. Каков состав этой стали по углероду?

26.Какая группа материалов называется сталями?

27.Из каких компонентов состоит структура заэвтектоидной стали?

28.Из каких компонентов состоит структура заэвтектоидной стали?

29.Из каких фаз состоит перлит?

30.Изобразите схему охлаждения сплава Fe—Fe_3C с 3% С, отметив на ней структурные состояния сплава.

31.Из какой фазы и при каких температурных условиях образуется цементитная составляющая в структуре стали с 1% углерода ?

32.Какие технологические операции включает процесс термической обработки стали?

33.Какова цель термической обработки стали?

34.Каковы основные виды термообработки стали?

35.От чего зависит температура превращения перлита в аустенит железо-углеродистых сплавов в реальных условиях нагрева?

36.Какова цель закалки стали?

37.Для каких сталей отжиг можно заменить более дешевой обработкой — нормализацией?

38.Каковы преимущества изотермического отжига стали по сравнению с полным?

39.Какова цель полного отжига стали?

40.Какова цель рекристаллизационного отжига как метода термической обработки стали?

41.Какова цель отжига 1-го рода как метода термической обработки стали?

42.Какова цель отжига 2-го рода как метода термической обработки стали?

43.Температура нагрева эвтектоидной стали 750°С, далее - охлаждение в воде. Какой это вид термообработки?

6. Библиографический список

1.Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.- 383 с.

2. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учеб. для вузов. – М.: Высш шк., 2004. – 519 с.

3.Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение металлов и сплавов: учеб.пособие. – Рязань: РГРТА, 2014. – 84 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А. Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб.пособие. – Рязань: РГРТА, 2013. – 96 с.

5.Справочник по электротехническим материалам/ Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - М.: Энергия, 1974. - 583с.

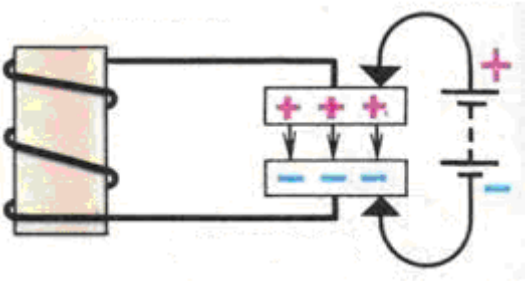
6.Богородицкий Н.П., Пасынков В.В. Электротехнические материалы: Учебник для электротехнических и энергетических специальных вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304с

7.Кузьмин Б.А., Абраменко Ю.Е., Ефремов В.К. Технология металлов и конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 351с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Т.А. ХОЛОМИНА, М.В. ЗУБКОВ

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ И МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ



Рязань 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации
Рязанский государственный радиотехнический университет

Т.А. ХОЛОМИНА, М.В. ЗУБКОВ

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ И МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Рязань 2015

УДК 621.38+615.83

Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов: учеб. пособие/ Т.А. Холомина, М.В.Зубков; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. - Рязань, 2015. - 48 с.

В краткой и доступной форме излагается учебный материал, предусмотренный действующими образовательными стандартами. Содержатся краткие теоретические сведения, а также задачи по каждому разделу. Рассмотрены основные физические процессы – поляризация, диэлектрические потери, пробой диэлектриков, классификация и свойства магнитных материалов, а также применение указанных групп материалов в радиоэлектронике.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 38.03.02, 11.03.01 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 09.03.02, 11.03.03, 11.03.04, 12.03.04, 13.03.02 дневного отделения при проведении практических занятий и для самостоятельной работы.

Ил. 15. Библиогр.: 6 назв.

Электрические свойства, диэлектрики, магнитные материалы, поляризация, потери энергии, пробой, практическое применение

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра электронных приборов (зав. кафедрой, д-р физ.-мат. наук, проф. М.В. Чиркин)

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2015

1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1. Классификация диэлектриков

К диэлектрикам относится чрезвычайно широкий круг материалов как органического (синтетические смолы, каучуки, волокнистые материалы), так и неорганического (стекла, керамика) происхождения. Синтетическими называют материалы, полученные с помощью синтеза – реакции полимеризации из веществ-мономеров. Эти материалы носят также названия: полимеры, пластические массы, синтетические смолы. К искусственным относятся материалы, полученные химической переработкой сырья природного происхождения (целлофан, бумага, вискоза, ацетат). Существует также множество композиционных материалов самого разнообразного состава, включающие в себя как синтетические, так и искусственные компоненты (целлулоид, слоистые пластики, фенопласты, аминопласты).

Выделим ряд основных групп диэлектрических материалов, применяемых в радиотехнике и электронике:

– синтетические смолы (пластмассы, полимеры);
– эластомеры;
– волокнистые материалы;
– слоистые пластики;
– стекла;
– керамика.

Рассмотрим основные физические свойства диэлектрических материалов, определяющие их применение.

1.2. Электропроводность диэлектриков

Основными свойствами, определяющими применение диэлектриков в радиотехнике и электронике, являются их изолирующие качества, а также способность создавать электрическую емкость за счет существования внутреннего электрического поля, т. е. поляризации.

Для выполнения функции электрической изоляции диэлектрические материалы должны препятствовать прохождению электрического тока путями, нежелательными для работы прибора. С этой точки зрения основной характеристикой диэлектриков является величина удельной электропроводности или удельного сопротивления.

Особенностью электропроводности твердых диэлектриков является то, что ввиду их большого удельного сопротивления ток через

объем диэлектрика I_V сравним с током по поверхности I_S (рис. 1.1), поэтому общий ток изоляции равен

$$I = I_v + I_s. \qquad (1.1)$$

При характеристике диэлектрика различают объемную и поверхностную удельные электропроводности (σ_v и σ_s). Величины, обратные электропроводности, называются удельными объемным и поверхностным сопротивлениями (ρ_v и ρ_s).

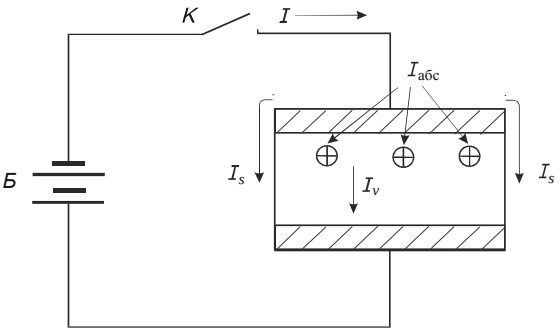


Рис. 1.1. Виды электрического тока в образце диэлектрика:
I – общий ток изоляции; $I_{абс}$ – ток абсорбции; I_V – объемный ток;
I_S – поверхностный ток

Удельное объемное сопротивление (ρ_v) определяется как сопротивление куба диэлектрика с ребром, равным единице длины, если ток протекает через две противоположные грани. Значения ρ_v большинства диэлектриков находятся в пределах 10^6 - 10^{16} Ом·м.

Удельное поверхностное сопротивление (ρ_s) определяется как сопротивление квадрата поверхности диэлектрика со стороной любого размера, если ток протекает через две противоположные стороны. Значение удельного поверхностного сопротивления, как правило, на порядок выше объемного, т.е. находится в пределах 10^7 - 10^{17} Ом, но оно в сильной степени зависит от величины и состояния поверхности (наличия влаги, проводящих веществ) и не является характеристикой материала.

Сопротивление изоляции диэлектрика определяется как результирующее двух сопротивлений (R_v и R_S), включенных параллельно:

$$R = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}. \qquad (1.2)$$

Для диэлектрика с сечением S и толщиной h величина объемного сопротивления находится по формуле

$$R_v = \rho_v \frac{h}{S}, \qquad (1.3)$$

откуда можно определить ρ_v.

Второй характерной особенностью электропроводности диэлектриков является постепенное уменьшение тока со временем (рис. 1.2), после включения постоянного напряжения (замыкания контакта K на рис. 1.1). С течением времени ток достигает некоторой постоянной величины, называемой током сквозной проводимости ($I_{скв}$), величина которого определяется наличием в диэлектрике свободных носителей заряда. Снижающаяся со временем часть тока (рис. 1.2) называется током абсорбции ($I_{абс}$), обусловленным наличием в диэлектрике замедленных видов поляризации. Этот ток также условно показан на рис. 1.1.

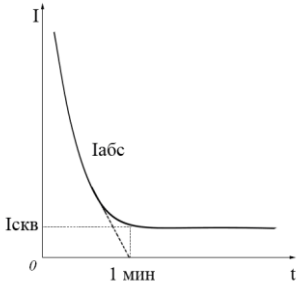


Рис. 1.2. Зависимость тока в диэлектрике от времени

Объемное сопротивление определяется по формуле

$$R_v = \frac{U}{I_{скв}}. \qquad (1.4)$$

Электропроводность диэлектриков определяется зарядом свободных носителей (q), их концентрацией (n), подвижностью (μ) и чаще всего носит не электронный, а ионный характер. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны ΔE в диэлектриках велика и лишь ничтожное количество электронов может покидать свои атомы за счет теплового движения. Ионы же часто оказываются слабо связанными в узлах решетки (особенно примесные) и под действием тепловой энергии становятся свободными. Например, в кристалле $NaCl$ имеем $\Delta E = 6$ эВ и, несмотря на то, что μ иона < μ электрона, σ ионная > σ электронной за счет значительно большей концентрации свободных ионов.

Удельная электропроводность твердых диэлектриков увеличивается с ростом температуры по экспоненциальному закону:

$$\sigma = qn\mu = \sigma_o \exp\left(-\frac{W_0}{kT}\right), \qquad (1.5)$$

где W_0 – энергия активации ионной проводимости; q – заряд; n – концентрация; μ – подвижность ионов.

Дрейфовая подвижность ионов мала и их движение осуществляется путем перескока с ловушки на ловушку, которые разделены потенциальным барьером высотой W_0, соответствующим энергии активации ионов (так называемая прыжковая проводимость).

В качестве ловушек для ионов могут выступать различные дефекты структуры, например вакансии, характеризующиеся незавершенными химическими связями вследствие отсутствия атома на "положенном" месте в структуре. Вероятность таких перескоков под действием тепловой энергии прямо пропорциональна $\exp(W_0/kT)$ (рис. 1.3).

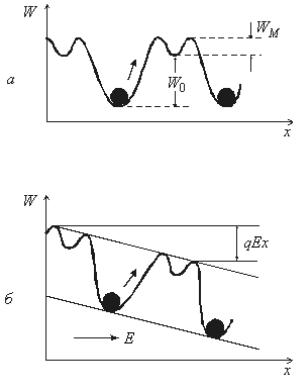


Рис. 1.3. Модель ионной проводимости твердых диэлектриков: *а* – без внешнего поля; *б* – понижение потенциального барьера W_0 на величину qEx при наложении электрического поля напряженностью E ($W_м$ – глубина междоузельной потенциальной ямы)

В широком диапазоне температур зависимость $ln\sigma = f(1/T)$ состоит из двух прямолинейных участков (рис. 1.4) с различными углами наклона к оси абсцисс. При температуре выше точки перегиба A электропроводность определяется в основном собственными ионами (собственная электропроводность). Ниже перегиба, в низкотемпературной области, зависимость более пологая и определяется наличием в диэлектрике ионов примеси (примесная электропроводность). По углам

наклона участков прямых зависимости $ln\sigma = f(1/T)$ можно определить энергию активации носителей заряда и их природу.

Некоторые твердые диэлектрики, особенно в области высоких температур, обладают электронной или дырочной проводимостью (титаносодержащие керамические материалы). Однако носителями часто являются электроны не основного вещества, а атомов примесей.

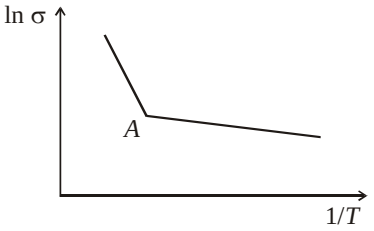


Рис. 1.4. Температурная зависимость электропроводности диэлектриков

Задачи

1.2.1. Капельки воды находятся во взвешенном состоянии в трансформаторном масле. Что с ними произойдет, если масло поместить в постоянное электрическое поле?

1.2.2. Назовите носители зарядов, создающих токи утечки в газовых, жидких и твердых диэлектриках. Каков механизм электропроводности твердых диэлектриков? Как влияет температура на их удельную проводимость? В каких случаях можно пренебречь поверхностной электропроводностью?

1.2.3. В каких единицах выражают удельное объемное и поверхностное сопротивления диэлектриков? Дайте определения этих физических величин. Почему их экспериментальное определение рекомендуют проводить при постоянном, а не при переменном напряжении, а также через 1 мин после подачи напряжения на диэлектрик?

1.2.4. Что делают с обкладками высоковольтного конденсатора после выключения приложенного к нему напряжения во избежание опасности для человека? Объясните, какие процессы в диэлектрике создают эту опасность.

1.2.5. Почему в диэлектриках не обнаруживается эффект Холла?

1.2.6. Как объяснить, что неполярные диэлектрики обладают гидрофобными свойствами?

1.2.7. При каких условиях для электроизоляционных материалов соблюдается закон Ома?

1.2.8. Почему диэлектрические свойства газа не характеризуют значением удельного электрического сопротивления?

1.2.9. Почему диэлектрики не используют в качестве датчиков температуры, несмотря на сильную зависимость их проводимости?

1.2.10. В каких условиях металлы являются электроизоляционными материалами?

1.2.11. Изобразите (качественно) температурные зависимости удельной проводимости твердых ионных диэлектриков в координатах $ln\gamma=f(1/T)$ при различном содержании примесей.

1.2.12. Объясните, почему полимеры с повышенной диэлектрической проницаемостью имеют, как правило, пониженное удельное сопротивление.

1.2.13. Удельное объемное сопротивление диэлектрика экспоненциально зависит от температуры: $\rho_v = Ae^{W/kT}$, где W – энергия активации диэлектрика; A и k – постоянные. Определите температурный коэффициент удельного сопротивления диэлектрика.

1.2.14. Почему удельное поверхностное сопротивление ионных и полярных диэлектриков существенно зависит от влажности окружающей среды?

1.2.15. Две противоположные грани куба с ребром a =10 мм из диэлектрического материала с удельным объемным сопротивлением $\rho_v = 10^{10}$ *Ом·м* и удельным поверхностным сопротивлением $\rho_s = 10^{11}$ Ом покрыты металлическими электродами. Определите ток, протекающий через эти грани куба при постоянном напряжении U_0=2 кВ.

1.2.16. Сопротивление изоляции двухжильного кабеля длиной 2 м равно 300 МОм. Чему равно сопротивление изоляции такого же кабеля длиной 6 м?

1.2.17. Цилиндрический стержень диаметром 10 мм и длиной 20 мм из диэлектрика с удельным объемным сопротивлением 10^{13} Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением 10^{14} Ом покрыт с торцов металлическими электродами. Чему равно сопротивление между электродами?

1.2.18. Пленочный конденсатор из поликарбоната с диэлектрической проницаемостью ε=3 теряет за время 30 мин половину сообщенного ему заряда. Полагая, что утечка заряда происходит только через пленку диэлектрика, определите его удельное сопротивление.

1.2.19. Диэлектрик в форме прямоугольного параллелепипеда длиной l=5 см и площадью поперечного сечения $b{\cdot}h$=2·0,5 см^2 с торцов покрыт металлическими электродами. При напряжении U_0=1500 В через диэлектрик проходит ток $I_0=10^{-9}$ А. Найдите удельное сопротив-

ление диэлектрика, если его удельное объемное сопротивление $\rho_v = 10^{10}$ Ом·м

1.2.20. На поверхности диэлектрика параллельно друг другу расположены два плоских электрода. Расстояние между электродами b=2 мм, их ширина h=10 мм. Чему равно удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, если сопротивление между электродами 5 МОм?

1.2.21. Между плоскими электродами площадью $S=2\cdot10^{-4}$ м^2 размещены соединенные последовательно две пластины из различных диэлектрических материалов. Один из них имеет: диэлектрическую проницаемость ε_1=2; удельную проводимость $\gamma_1=10^{-6}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$; толщину h_1= 1 см; другой имеет: ε_2=3; $\gamma_2=10^{-10}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$; h_2= 2 см. В момент времени t=0 к электродам подключено постоянное напряжение U=5 кВ. Определите напряженность электрического поля в обоих диэлектриках в моменты времени $t=0$ и $t\to\infty$. Найдите напряженность электрического поля в этих диэлектриках при $t\to\infty$, если к электродам приложено переменное напряжение U=20 В частотой f=50 МГц.

1.2.22. Площадь каждого электрода ионизационной камеры $S=100$ *см*^{2}, расстояние между электродами $l=6{,}2$ см. Какой ток установить между электродами при напряжении $U=20$ В, если известно, что ионизатор ежесекундно образует в 1 см^3 газа $N=10^9$ одновалентных ионов каждого знака? Подвижность положительных и отрицательных ионов $\mu_+=\mu_-=10^{-4}$ м^2/(В·с) , коэффициент рекомбинации $\nu=10^{-12}$ м^3/с. Какую долю тока насыщения составляет найденный ток?

1.2.23. Какой состав неорганического стекла характеризуется минимальным значением удельного объемного сопротивления: а) 100 % SiO_2; б) 90 % SiO_2 + 10 % K_2O; в) 90 % SiO_2 + 5 % Na_2O + 5 % K_2O; г) 90 % SiO_2 + 10 % Na_2O?

1.2.24. Кубик из диэлектрика с ребром 0,06 м имеет удельное объемное сопротивление 10^{12} Ом·м и удельное поверхностное сопротивление $5\cdot10^{12}$ Ом. На противоположной грани кубика нанесены электроды, к которым приложено напряжение частотой 1 МГц. Определите модуль комплексной проводимости кубика на этой частоте, если его диэлектрическая проницаемость ε=60.

1.2.25. При изменении температуры от 60 до 127 ºС удельное сопротивление радиофарфора уменьшается от $\rho_1=10^{13}$ Ом·м до $\rho_2=10^{11}$ Ом·м. Определите температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ радиофарфора, считая его постоянным в рассматриваемом диапазоне температур. При этом же допущении найдите удельное сопротивление материала при комнатной температуре.

1.2.26. На рис.1.5 изображена температурная зависимость удельной проводимости кристаллического диэлектрика, имеющего примесь с концентрацией $N_{пр1}$. Определить: а) энергию ионизации примесных атомов; б) энергию образования собственных дефектов в этом диэлектрике.

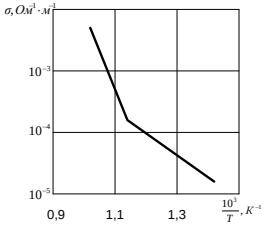


Рис 1.5. К задаче 1.2.26

1.3. Поляризация диэлектриков

Фундаментальное явление, определяющее возможность использования диэлектрика для создания емкости конденсаторов электронной аппаратуры, – это поляризация диэлектриков.

Электрическая поляризация при воздействии поля проявляется в ограниченном упругом смещении связанных зарядов, ориентации дипольных молекул, в результате чего некоторый объем или поверхность диэлектрика приобретает электрический момент. После снятия электрического поля связанные заряды возвращаются в первоначальное состояние.

Для сравнения диэлектриков, имеющих различную степень поляризации, пользуются понятием относительной диэлектрической проницаемости ε. Эта величина представляет собой отношение заряда Q конденсатора с конкретным диэлектриком к заряду Q_0 конденсатора тех же размеров и при том же напряжении, между обкладками которого находится вакуум:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0}. \qquad (1.6)$$

ε – величина безразмерная и всегда больше единицы, поскольку реальные диэлектрики, в отличие от вакуума, всегда содержат электрические заряды.

Диэлектрики делятся на два класса: полярные и неполярные. У молекул неполярных веществ центры тяжести суммарных положительных и отрицательных зарядов совпадают. Молекулы полярных материалов имеют вид электрических диполей, способных ориентироваться в электрическом поле.Все виды поляризации делятся на две

группы: мгновеннные и релаксационные. Мгновенная поляризация (электронная, ионная) происходит практически без потерь энергии. Замедленная поляризация (электронно-, ионно-, дипольно-релаксационная, структурная, спонтанная) сопровождается потерями электрической энергии.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около 10^{-15} с), процесс происходит практически без потерь энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков без исключения, поскольку у всех диэлектриков имеются электроны, находящиеся в связанном состоянии.

Ионная поляризация характерна для твердых диэлектриков с ионным строением (слюда, корунд, каменная соль) и проявляется в упругом смещении связанных ионов под действием электрического поля. При этом смещение ионов происходит на расстояния, меньшие постоянной кристаллической решетки (минимального расстояния между одинаковыми ионами). Время установления поляризации около 10^{-13} с, потерь энергии не происходит.

Электронно- и ионно-релаксационная поляризации сопровождаются диэлектрическими потерями. Электронно-релаксационная поляризация возникает вследствие возбуждения тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок. Ионно-релаксационная поляризация характерна для материалов ионного строения с неплотной упаковкой ионов (например, в неорганических стеклах). При этом виде поляризации слабо связанные ионы под действием поля перемещаются на одно или несколько атомных расстояний и закрепляются в новом положении, что создает асимметрию распределения зарядов и, следовательно, электрический момент единицы объема. Время релаксации составляет $10^{-11} – 10^{-8}$ с.

Дипольно-релаксационная поляризация обычно наблюдается в полярных органических диэлектриках (полиметилметакрилат, поливинилхлорид и т.д.) и заключается в ориентации, повороте дипольных молекул, дипольных групп под действием электрического поля. Этот вид поляризации сопровождается потерями энергии. Чем ниже температура и крупнее диполи, тем больше время релаксации, изменяющееся в пределах $10^{-10} – 10^{-6}$ с.

Структурная (междуслойная, миграционная) поляризация обусловлена движением свободных зарядов (положительных и отрицательных ионов, электронов) и их закреплением на дефектах и поверхностях раздела различных компонентов электроизоляционного мате-

риала. Этот вид поляризации наблюдается в неоднородных диэлектриках (композиционные пластмассы, гетинаксы, текстолиты, керамика и т.д.), компоненты которых обладают разными электрическими свойствами. Время релаксации может достигать десятков минут, поляризация сопровождается диэлектрическими потерями.

Рассмотренные выше механизмы поляризации свойственны так называемым линейным диэлектрикам, зависимость заряда (поляризованности) которых от напряженности электрического поля является линейной функцией, а величина ε от поля не зависит. Особую группу диэлектриков, называемых нелинейными или активными, составляют сегнетоэлектрики, которые обладают самопроизвольной или спонтанной поляризацией.

При температуре, характерной для материала и называемой точкой Кюри, отдельные элементарные ячейки кристалла сегнетоэлектрика приобретают дипольный электрический момент за счет смещения катиона к аниону, т. е. создания несимметричного распределения разноименных зарядов. Совокупность соседних элементарных ячеек представляет собой область с разделенными положительным и отрицательным зарядами, т. е. обладающую внутренним дипольным электрическим моментом. Такие области имеют размер ~ 0,1–1 мм^3 и называются доменами. Таким образом, при определенных условиях материал оказывается спонтанно (самопроизвольно) поляризованным.

До воздействия внешнего электрического поля направления дипольных моментов отдельных доменных областей хаотичны и их сумма равна нулю, поэтому сегнетоэлектрик в целом нейтрален, неполяризован. Под действием внешнего электрического поля в сегнетоэлектрике происходят процессы смещения границ доменов, ориентации векторов электрических моментов доменов преимущественно в направлении внешнего поля, т. е. усиливается поляризованность. Зависимость заряда (поляризованности) сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля имеет нелинейный характер, и в переменном поле представляет собой петлю диэлектрического гистерезиса. Поэтому при спонтанной поляризации и относительная диэлектрическая проницаемость материала нелинейно зависит от напряженности поля (рис. 1.5).

Спонтанная поляризация находит широкое применение в радиоэлектронике. Благодаря форме петли гистерезиса (два устойчивых состояния +1 и -1), сегнетоэлектрики можно применять в запоминающих устройствах ЭВМ. Основное требование в этом случае – наличие как можно более прямоугольной петли гистерезиса. Существование в сегнетоэлектриках зависимости ε от напряженности электрического

поля (рис. 1.6) приводит к аналогичной зависимости емкости сегнетоэлектрических конденсаторов от напряжения.

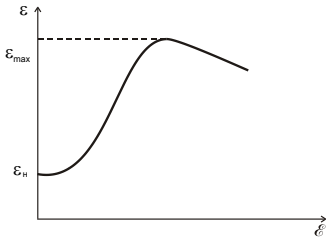


Рис. 1.6. Зависимость ε сегнетоэлектрика
от напряженности электрического поля

Такие конденсаторы называют варикондами и применяют в устройствах стабилизации частоты. Наличие доменной структуры и диэлектрического гистерезиса приводит к аномально высоким значениям ε в сегнетоэлектриках. Это делает возможным создание малогабаритных конденсаторов большой удельной емкости. Зависимость ε сегнетоэлектриков от температуры (рис. 1.7) позволяет использовать их в качестве датчиков температуры.

Спонтанная поляризация сопровождается диэлектрическими потерями, при этом площадь петли диэлектрического гистерезиса пропорциональна мощности потерь. Поэтому практическое применение сегнетоэлектриков возможно только в диапазоне низких частот и в ограниченном интервале температур.

Характер зависимости ε(*T*) конкретного диэлектрика обусловлен преобладающим видом поляризации. У неполярных материалов (полиэтилен, парафин) ε с ростом температуры снижается из-за уменьшения плотности и соответственно концентрации объектов поляризации (рис. 1.7, кривая *1*).

Зависимость ε полярных диэлектриков (с доминирующей дипольно-релаксационной поляризацией) от температуры имеет максимум при определенной температуре T_1 (рис. 1.7, кривая *2*). При увеличении температуры до T_1 диэлектрическая проницаемость ε увеличивается за счет уменьшения вязкости и облегчения ориентации диполей; далее, при $T > T_1$ (определенной для каждого диэлектрика), ε уменьшается, так как тепловое движение нарушает ориентацию диполя в направлении поля. У большинства неорганических стеклообразных и кристаллических материалов ионного строения ε увеличивается с рос-

том температуры, а у некоторых уменьшается (рис. 1.7, кривые *3*). Это объясняется наличием у таких диэлектриков как электронной (снижение ε с ростом *T*), так и ионной поляризации. Вследствие уменьшения связи между ионами ε при ионной поляризации с ростом температуры увеличивается.

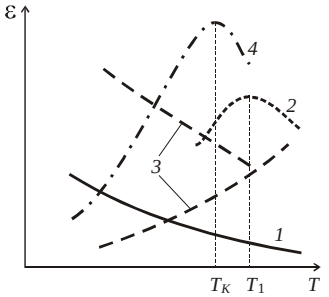


Рис. 1.7. Зависимость ε от температуры для диэлектриков с электронной (*1*), дипольно-релаксационной (*2*), ионной и ионно-релаксационной (*3*) и спонтанной (*4*) поляризацией

При повышении температуры до точки Кюри (T_K на рис. 1.7, кривая *4*) ε сегнетоэлектриков увеличивается вследствие облегчения поляризации доменов, а выше точки Кюри уменьшается из-за того, что нарушается доменное строение.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε неполярных диэлектриков не зависит от частоты электрического поля, как показано на рис. 1.8 (кривая *1*), так как им свойственна только мгновенная поляризация, время релаксации которой мало по сравнению с полупериодом действия напряжения. В полярных материалах с дипольно-релаксационной или ионно-релаксационной поляризацией величина ε до определенной частоты f' не меняется (рис. 1.8, кривая *2*). Когда поляризация не будет успевать полностью устанавливаться за один полупериод действия напряжения (f' – величина, обратная времени релаксации), ε будет снижаться, приближаясь к значению, обусловленному всегда имеющейся электронной поляризацией. Некоторые полярные полимеры имеют ступенчатую зависимость ε(f), аналогичную кривой *3* на рис. 1.8, обусловленную наличием набора разных релаксаторов (диполей; групп, сегментов атомов или ионов материала) с соответствующими характеристическими частотами "выбывания" f_1, f_2 и временами релаксации поляризационных процессов.

Зависимость характеристической частоты f_x от ряда факторов описывается следующим соотношением:

$$f_x = \frac{kT}{8\pi^2 \eta r^3}, \qquad (1.7)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, η – вязкость среды, r – радиус поляризующегося элемента (макромолекулы, диполя и т.п.).

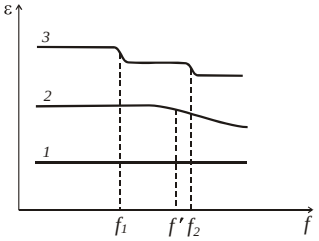


Рис. 1.8. Частотная зависимость ε диэлектриков с мгновенной (*1*) и релаксационными (*2*, *3*) видами поляризации

Применительно к диполям, т.е. полярным молекулам, f_x соответствует максимальной частоте внешнего электромагнитного поля, которую они способны воспроизвести своими поворотами в нем. За счет таких поворотов (ориентации) достигается максимально возможная компенсация внешнего поля собственным электрическим полем диэлектрика. Важно, что полярные молекулы одинаковых размеров, пребывая в средах с разной вязкостью, обладают неодинаковой характеристической частотой. Поскольку емкость любого конденсатора пропорциональна величине ε, зависимости $C(T)$ и $C(f)$ полностью определяются зависимостями $\varepsilon(T)$ и $\varepsilon(f)$ конкретного диэлектрика.

Задачи

1.3.1. Какое явление называют поляризацией диэлектриков? Какие виды поляризации можно считать мгновенными, а какие замедленными?

1.3.2. В чем различие между ионной и ионно-релаксационной поляризациями? Что характеризует время релаксации и от каких факторов оно зависят?

1.3.3. Какая электрическая упорядоченность свойственна сегнетоэлектрикам? Как объяснить явление диэлектрического гистерезиса и нелинейность зависимости заряда от напряжения у сегнетоэлектриков?

1.3.4. Какую температуру называют сегнетоэлектрической точкой Кюри? Как ее можно определить экспериментально?

1.3.5. Что такое начальная, реверсивная и эффективная диэлектрическая проницаемости? Можно ли их определить, если известна основная кривая поляризации сегнетоэлектрика?

1.3.6. Что такое пироэлектрический эффект? Как его можно охарактеризовать количественно? Где применяют пироэлектрики?

1.3.7. Какова природа электретного состояния в диэлектриках? Что такое гомо- и гетерозаряд? Приведите типичные временные зависимости заряда электретов на различных диэлектриках. Как влияет напряженность поля поляризации на характер этих зависимостей?

1.3.8. Что такое прямой и обратный пьезоэффекты? В каких диэлектриках можно наблюдать это явление? Приведите примеры практического использования пьезоэффекта.

1.3.9. От каких факторов зависит резонансная частота кварцевых пьезорезонаторов? Какое практическое применение находят кварцевые пьезоэлементы высокой добротности?

1.3.10. Какова диэлектрическая проницаемость кварца на частоте рентгеновского излучения?

1.3.11. Что понимают под линейными и нелинейными, полярными и неполярными диэлектриками? Какие из перечисленных видов диэлектриков могут быть использованы на высоких частотах?

1.3.12. Дайте определения смолы, пластмассы, лака и компаунда. Приведите примеры использования этих веществ при изготовлении радиоэлектронной аппаратуры.

1.3.13. Назовите основные преимущества эпоксидных компаундов. Каков механизм их отверждения?

1.3.14. Какими специфическими свойствами должны обладать электроизоляционные материалы, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре, предназначенной для эксплуатации в тропических условиях?

1.3.15. Почему применение корпусов и покрытий из органических электроизоляционных материалов обеспечивает лишь временную влагозащиту изделий электронной техники? Как обеспечить длительную влагозащиту?

1.3.16. Почему для изоляции обмоточных проводов трансформаторов и электродвигателей используют термореактивные, а не термопластичные лаки?

1.3.17. С какой целью производят пропитку пористых диэлектриков? Можно ли использовать для пропитки твердые диэлектрики? Какими свойствами должны обладать твердые пропитывающие вещества?

1.3.18. Какие требования предъявляют к связующему диэлектрику стеклотекстолита?

1.3.19. Какими способами и для каких целей производят изделия из композиционных пластмасс?

1.3.20. Приведите примеры установочных высокочастотных керамических диэлектриков. Назовите наиболее характерные области их применения.

1.3.21. Как и почему изменится напряжение поверхностного пробоя, если керамический изолятор поместить в трансформаторное масло?

1.3.22. На каких принципах основано создание термостабильной конденсаторной керамики?

1.3.23. Что понимают под температурой стеклования и температурой текучести стекломассы? При какой температуре производят формовку изделий? Каким образом управляют технологическими характеристиками стекломассы?

1.3.24. Каким образом изготовляют тонкие стеклянные волокна? Какие стекла используют для производства стекловолокна?

1.3.25. Укажите, какие требования предъявляются к диэлектрическим материалам, применяемым в высокочастотных конденсаторах. Какие из перечисленных материалов могут быть использованы для этих целей: кварцевое стекло, поливинилхлорид, сегнетокерамика, слюда, полистирол, лавсан, политетрафторэтилен, цельзиановая керамика?

1.3.26. Нормально к вектору напряженности однородного электрического поля E_0=100 В/м расположена пластина изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε=2. Определите: а)напряженность поля E и электрическое смещение (электрическую индукцию) D внутри пластины; б) поляризованность диэлектрика P и поверхностную плотность связанных зарядов σ.

1.3.27. Вычислите поляризованность монокристалла каменной соли, считая, что смещение ионов под действием электрического поля от положения равновесия составляет 1 % расстояния между ближайшими соседними ионами. Элементарная ячейка кристалла имеет форму куба, расстояние между соседними ионами a=0,28 нм.

1.3.28. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определите напряженность электрического поля, воздействующего на монокристалл каменной соли, если ее диэлектрическая проницаемость ε=5,65. Вычислите коэффициент упругой связи ионов $k_{упр}$ в кристалле, полагая, что напряженность внутреннего электрического поля равна напряженности внешнего поля.

1.3.29. Между пластинами плоского конденсатора без воздушных промежутков зажат лист гетинакса толщиной h=1 мм. На конден-

сатор подано напряжение U=200 В. Определите поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора σ_1 и на диэлектрике $\sigma_д$. Диэлектрическую проницаемость принять равной шести.

1.3.30. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε_1, в котором во взвешенном состоянии находится шар из твердого диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε_2. Изобразите картину силовых линий электрического поля в конденсаторе для двух случаев: а) $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, б) $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$.

1.3.31. При напряжении 2 кВ плоский конденсатор , изготовленный из высокочастотного диэлектрика, имеет заряд $3{,}5 \cdot 10^{-8}$Кл. При этом же напряжении и при повышении температуры на 100 К заряд возрастает на 1 %. Определите диэлектрическую проницаемость материала и температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, если толщина диэлектрика между пластинами S= 5 см^2. Какой вывод можно сделать о наиболее вероятном механизме поляризации данного диэлектрика?

1.3.32. Диэлектрическая проницаемость воздуха при 300 К и нормальном атмосферном давлении ε=1,00058. На сколько изменится ее значение, если давление воздуха увеличить в 20 раз?

1.3.33. Диэлектрическая проницаемость газа при давлении 10^5 Па и температурах 273 и 450 К равна соответственно 1,0067 и 1,0060. Определите: а) температурный коэффициент диэлектрической проницаемости газа; б) диэлектрическую проницаемость этого газа при температуре 273 К и давлении $5 \cdot 10^4$ Па. Оцените концентрацию молекул газа при этих условиях.

1.3.34. Диэлектрическая проницаемость ε кристаллического кварца на частоте 1 МГц равна 4,5, а показатель преломления света в видимой области спектра n=1,55. Можно ли данный диэлектрик отнести к группе неполярных веществ?

1.4. Диэлектрические потери

Удельными диэлектрическими потерями называется энергия, рассеиваемая в виде тепла в единице объема и в единицу времени в диэлектрике, находящемся в электрическом поле, и вызывающая его нагрев. При постоянном поле потери обусловливаются током сквозной проводимости – движением ионов, иногда – свободных электронов. Потери на сквозную электропроводность присущи в большей или меньшей мере всем диэлектрикам без исключения. Величина потерь на сквозную электропроводность определяется удельным объемным со-

противлением ρ_v, а в твердых диэлектриках также и удельным поверхностным сопротивлением ρ_s.

При переменном поле различают следующие виды потерь: 1) потери на сквозную электропроводность; 2) поляризационные потери, обусловленные замедленной поляризацией; 3) ионизационные потери; 4) потери, обусловленные неоднородностью структуры. Для вывода выражения мощности потерь пользуются эквивалентной схемой диэлектрика, состоящей из последовательно или параллельно включенных активного сопротивления *R* и емкости *C*. Эквивалентная схема выбирается так, чтобы расходуемая активная мощность была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а вектор тока был сдвинут относительно вектора напряжения на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

В идеальном вакуумном конденсаторе без потерь угол между векторами тока $\vec{I}_c$ и напряжения $\vec{U}_c$ равен 90^0 (рис. 1.9,а). Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция tgδ (рис. 1.9,б). Тангенс угла диэлектрических потерь (tgδ) – параметр, учитывающий все виды потерь в диэлектрике и представляющий собой тангенс угла, дополняющего угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи до 90^0. Тангенс угла диэлектрических потерь равен отношению

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{I_a}{I_c}, \qquad (1.8)$$

а мощность диэлектрических потерь в переменном электрическом поле равна

$$P_{\sim} = U^2 \omega C tg\delta, \qquad (1.9)$$

где *U* – приложенное напряжение; $\omega = 2\pi f$ – частота. Из выражения (1.8) следует, что диэлектрические потери существенно влияют на работу аппаратуры высокого напряжения, высокочастотной и, в особенности, одновременно высокочастотной и высоковольтной. Тангенс угла диэлектрических потерь зависит от состава и структуры диэлектриков, от агрегатного состояния, а также от условий эксплуатации.

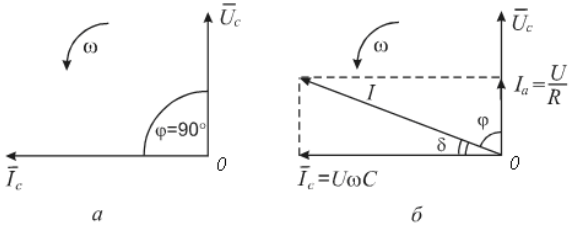


Рис. 1.9. Векторные диаграммы для конденсатора
с идеальным диэлектриком (*а*) и диэлектриком с потерями (*б*)

У чистых однородных неполярных диэлектриков диэлектрические потери малы и обусловлены только током сквозной проводимости; tgδ незначителен, порядка 10^{-4}, с ростом частоты падает (рис. 1.10, кривая *1*), так как I_a от частоты практически не зависит, а реактивный ток I_c увеличивается. Для таких диэлектриков при повышении температуры tgδ возрастает за счет увеличения тока сквозной проводимости (рис. 1.11, кривая *1*).

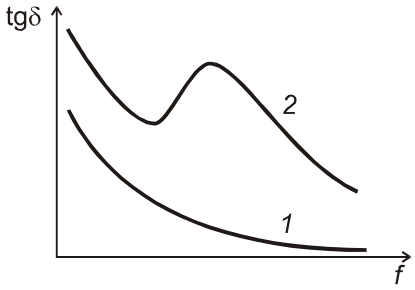


Рис. 1.10 Частотная зависимость tgδ для диэлектриков с потерями на сквозную электропроводность (1); с потерями на электропроводность и поляризационными потерями (2)

Полярные диэлектрики, у которых потери обусловлены как сквозной проводимостью (иногда значительной), так и релаксационными видами поляризации, имеют высокий tgδ ~ 10^{-2} – 10^{-1}. Частотная и температурная зависимости tgδ таких диэлектриков имеют максимумы, показанные на рис. 1.10, кривая *2* и 1.11, кривая *2*. Появление максимума на зависимости tgδ(*f*) объясняется инерционностью диполей и дипольных групп, не успевающих ориентироваться по полю за полупериод его изменения. Общий характер частотной зависимости соот-

ветствует кривой *1*, рис. 1.10, т. е. потерям на сквозную электропроводность. При наличии нескольких релаксаторов появляется соответствующее число максимумов tgδ, аналогичных «ступенькам» на зависимости ε(*f*) рис. 1.8. Появление максимумов на температурной зависимости tgδ полярных диэлектриков объясняется тем, что по мере повышения температуры закрепленные диполи, получившие дополнительную энергию, получают большую свободу перемещения и ориентации по полю. При этом возрастает мощность диэлектрических потерь и tgδ. Начиная с определенной температуры, соответствующей максимуму tgδ на его температурной зависимости, энергия

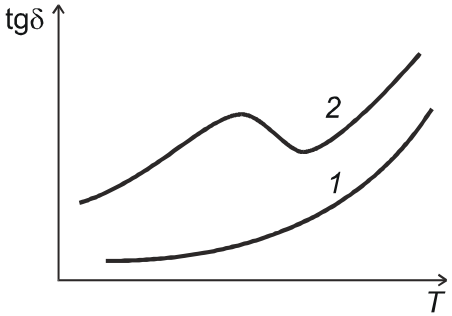


Рис. 1.11. Зависимость tgδ от температуры для неполярных (*1*) и полярных (*2*) диэлектриков

теплового движения становится выше энергии электрического поля, нарушается ориентация диполей, затрата энергии уменьшается и tgδ снижается. При высоких температурах tgδ полярных диэлектриков возрастает за счет роста тока сквозной проводимости.

У диэлектриков с газовыми включениями tgδ растет при увеличении напряжения вследствие ионизации газа. Поэтому пористые диэлектрики непригодны для высоковольтной аппаратуры. У гигроскопичных материалов tgδ имеет повышенное значение, так как вода является источником свободных ионов.

Величина tgδ для неоднородных и композиционных диэлектриков зависит от природы и распределения включений, от специальных наполнителей. Значения tgδ слоистых пластмасс могут изменяться в широких пределах в зависимости от количественных соотношений компонентов, достигая нескольких единиц.

Наименьшие потери имеют однородные диэлектрики плотной структуры с минимальным содержанием примесей, имеющие мгно-

венную поляризацию. К таким материалам относятся полистирол, полиэтилен, фторопласт-4, трансформаторное масло, слюда, высокочастотный стеатит и др. Особенно высокие требования предъявляются к диэлектрикам, применяемым на высоких частотах и в высоковольтной аппаратуре.

Задачи

1.4.1. В каких диэлектриках и при каких условиях существенную роль играют потери на ионизацию?

1.4.2. Установите взаимосвязь между видами поляризации и механизмом диэлектрических потерь.

1.4.3. Приведите пример диэлектрика, диэлектрические потери которого в некотором интервале температур уменьшаются при нагревании. Укажите механизм потерь в таком диэлектрике.

1.4.4. Как влияет температура на положение частотного максимума тангенса угла релаксационных потерь?

1.4.5. Можно ли частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и активной мощности рассчитывать по формулам для эквивалентных схем диэлектрика с потерями?

1.4.6. При комнатной температуре тангенс угла диэлектрических потерь ультрафарфора $\mathrm{tg}\delta=5\cdot10^{-4}$, а при повышении температуры до 100 ºС он возрастает в 2 раза. Чему равен $\mathrm{tg}\delta$ этого материала при температуре 200 ºС? Во сколько раз увеличится активная мощность, выделяющаяся в высокочастотном проходном изоляторе из этого материала, при изменении температуры от 20 до 200 ºС? Изменением диэлектрической проницаемости керамики пренебречь.

1.4.7. При определении активной мощности при тех же условиях, что и в предыдущей задаче, учтите температурные изменения диэлектрической проницаемости, считая $\alpha_\varepsilon=120\cdot10^{-6}\ \mathrm{K}^{-1}$.

1.4.8.. В дисковом керамическом конденсаторе емкостью C=100 пФ, включенном на переменное напряжение U=100 В частотой f=1 МГц, рассеивается мощность $P_a=10^{-3}$ Вт. Определите реактивную мощность, тангенс угла диэлектрических потерь и добротность конденсатора.

1.4.9. При тех же условиях, что и в предыдущей задаче, определите удельные потери в диэлектрике, если его диэлектрическая проницаемость ε = 150 , электрическая прочность $E_{пр}$=10 МВ/м и запас по электрической прочности K=10.

1.4.10. При изменении параметров керамического конденсатора на частоте f=1 кГц получено: емкость C=1000 пФ; $tg\delta=8\cdot10^{-3}$. Определите эквивалентное последовательное (r_s) и эквивалентное параллельное (R_p) сопротивление на этой частоте.

1.4.11. Активная мощность рассеяния P_{a1} в кабеле с изоляцией из полиэтилена при напряжении U=20 В частотой 1 МГц равна 200 мкВт. Чему равна активная мощность рассеяния P_{a2} в этом же кабеле при напряжении 10 В частотой 2 МГц? Считать, что потери в полиэтилене обусловлены только сквозной электропроводностью.

1.4.12. Определите коэффициент потерь неполярного диэлектрика на частоте 1 МГц, если удельное сопротивление материала равно 10^{15} Ом·м.

1.4.13. При изменении сопротивления изоляции керамического конденсатора емкостью 100 пФ получили $R_{из}=2\cdot10^{11}$ Ом; при изменении на частоте f=1 МГц получили $tg\delta=7\cdot10^{-4}$. Рассчитайте эквивалентное параллельное сопротивление R_p на частоте 1 МГц и сравните его со значением сопротивления изоляции. Какие выводы можно сделать о механизме диэлектрических потерь в керамическом материале этого конденсатора?

1.4.14. Рассчитайте активную мощность потерь при постоянном напряжении U_0=100 В для конденсатора на основе пленки полиэтилентерефталата емкостью C= 1 мкФ. Постоянная времени этого конденсатора τ_c=10 000 МОм·мкФ. Какой ток будет протекать по выводам этого конденсатора, если его включить в сеть с напряжением 220 В и частотой 50 Гц?

1.4.15. Тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) неполярного диэлектрика на частоте 50 Гц равен 10^{-3}. Вычислите активную мощность рассеяния P_a в конденсаторе из этого диэлектрика на частоте f=1 кГц при напряжении 1 кВ, если емкость конденсатора C равна 1000 пФ.

1.4.16. Получите выражение для комплексной диэлектрической проницаемости полиэтилена (ε=2,2; $tg\delta=10^{-4}$). Чему равна диэлектрическая восприимчивость χ полиэтилена?

1.4.17. Чему равна активная мощность рассеяния в кабеле с сопротивлением изоляции 20 МОм при постоянном напряжении 20 В?

1.4.18. Вычислите на частоте 50 Гц тангенс угла диэлектрических потерь хорошо очищенного трансформаторного масла, удельное объемное сопротивление которого равно 10^{12} Ом·м и диэлектрическая проницаемость ε=2,2.

1.4.19. Определите удельные диэлектрические потери в плоском конденсаторе, изготовленном из пленки полистирола толщиной 20 мкм, если на конденсатор подано напряжение 2 В частотой 2 МГц (для полистирола ε=2,5 $tg\delta=2\cdot10^{-4}$).

1.4.20. Полиэтиленовая изоляция характеризуется следующими значениями электрических параметров: ε=2,3; $\rho_v = 10^{15}$ Ом·м

$tg\delta$=3·10^{-4} (на частоте f=1 МГц). Объясните, можно ли частотные изменения tgδ и активной мощности рассеяния P_a описать, используя параллельную эквивалентную схему диэлектрика.

1.4.21. Изобразите (качественно) температурную частотную зависимость емкости и эквивалентную схему с учетом всех видов поляризации и диэлектрических потерь: для слюдяного конденсатора; полистирольного конденсатора; сегнетокерамического конденсатора; конденсатора на основе неорганического стекла; конденсатора на основе рутиловой керамики. Постройте (качественно) температурную зависимость температурного коэффициента емкости для этих конденсаторов. Конденсаторы используются в диапазоне температур 5-85 ºС на частотах до 100 кГц.

1.4.22. Между латунными электродами площадью S помещена керамическая пластина толщиной h=5 мм, имеющая диэлектрическую проницаемость ε=7, тангенс угла диэлектрических потерь при комнатной температуре $tg\delta_0$=2·10^{-4}, температурный коэффициент $\alpha_{tg\delta}$=5·10^{-3} К$^{-1}$. Определите допустимое напряжение U между электродами на рабочей частоте f=50 МГц, если температура, до которой нагревается пластина в электрическом поле, не превышает T=373 К. При расчете полагать что суммарный коэффициент теплопередачи от диэлектрика во внешнюю среду σ=30 Вт/(м^2·К), а температура окружающей среды T_o=293 К.

1.4.23. Объясните, почему при пластификации поливинилхлорида органическими полярными жидкостями максимум релаксационных потерь на температурной зависимости tg δ смещается в область более низких температур.

1.4.24. Какой состав неорганического стекла характеризуется максимальным значением tg δ: а) 100 %SiO_2; б)90 % SiO_2+5 % Na_2O + 5 % K_2O; в) 90 % SiO_2+10 % Na_2O; г) 85 % SiO_2+10 % Na_2O+5 % BaO?

1.4.25. При увеличении переменного напряжения от 10 до 11 кВ ионизационные потери в высоковольтном керамическом конденсаторе возрастают в 8 раз. Определите напряжение начала ионизации газовых включений в керамике.

1.5. Пробой диэлектриков

Надежность и долговечность электрической изоляции проводов, диэлектрика конденсатора и других деталей радиоэлектронной аппаратуры зависят от электрической прочности диэлектрика. Пробоем называется потеря диэлектриком изолирующих свойств в канале, образующемся между электродами, под действием электрического

поля. Напряжение, при котором происходит пробой, называется пробивным напряжением ($U_{пр}$).

Электрическую прочность диэлектрика $E_{пр}$ в однородном электрическом поле определяют величиной пробивного напряжения $U_{пр}$, отнесенной к толщине диэлектрика d (расстоянию между электродами):

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{d}, \text{ В/м.} \qquad (1.10)$$

Допускаются производные единицы измерения: МВ/м, кВ/мм, кВ/см.

В случае неоднородного поля под $E_{пр}$ подразумевают среднее значение пробивной напряженности. Величина $E_{пр}$ характеризует способность диэлектрика противостоять разрушающему действию электрического поля.

Явление пробоя связано с нарушением химических связей между молекулами (атомами), ионизацией атомов вещества лавинообразно нарастающим под действием ударной ионизации потоком электронов. Электрическая прочность материала определяется длиной свободного пробега электронов, т. е. плотностью вещества и его агрегатным состоянием.

В *твердых* диэлектриках различают три основных вида пробоя: электрический, электротепловой и электрохимический. Возникновение того или иного вида пробоя в диэлектрике зависит от его свойств, формы электродов, условий эксплуатации.

Электрический пробой твердых диэлектриков сводится к нарушению упругих связей в молекулах под действием электронной лавины и по своей природе является чисто электронным процессом. Электрический пробой, в отличие от электротеплового, возникает при условии хорошего теплоотвода и отсутствия краевого разряда, искажающего поле. В этих условиях значения электрической прочности диэлектриков высоки и могут составлять ~10^3 МВ/м. Электрический пробой протекает очень быстро (10^{-8} – 10^{-7} с), электрическая прочность большинства однородных материалов в однородном поле не зависит от толщины, температуры и времени действия напряжения. Величина $E_{пр}$ неоднородных диэлектриков заметно уменьшается с увеличением площади электродов и толщины диэлектрика из-за повышения вероятности попадания слабых мест в направлении электрического поля.

На практике часто до наступления электрического пробоя при более низком напряжении происходит электротепловой пробой, вызванный тем, что количество теплоты, выделяющейся в диэлектрике за счет сквозной проводимости и диэлектрических потерь, превышает

количество теплоты, которое может рассеиваться. При этом нарушается тепловое равновесие и процесс приобретает лавинообразный характер, материал разогревается до температур, соответствующих расплавлению и обугливанию. Для теплового пробоя характерно уменьшение электрической прочности с ростом температуры, а также частоты электрического поля вследствие роста мощности диэлектрических потерь [соотношение(1.9)]. Напряжение электротеплового пробоя определяют по формуле

$$U_{\text{пр}} = K\sqrt{\frac{\sigma h\left(t - t_0\right)}{f\varepsilon tg\,\delta}}, \qquad (1.11)$$

Где K – числовой коэффициент, равный $1{,}15\cdot10^5$, если все величины выражены в единицах СИ; σ - коэффициент теплопередачи системы диэлектрик – металл электродов; h – толщина диэлектрика; f – частота; ε - относительная диэлектрическая проницаемость материала; $tg\,\delta$ - тангенс угла потерь диэлектрика при температуре окружающей среды, равной t_0 ; t - температура нагретого за счет диэлектрических потерь материала.

Пробивное напряжение с увеличением длительности действия приложенного напряжения уменьшается из-за дополнительного разогрева диэлектрика, а также химического старения и других явлений. При кратковременном приложении напряжения (например, импульсного) вероятность теплового пробоя мала даже при сравнительно большой проводимости, так как образец не успевает прогреться.

Электрическая прочность при тепловом пробое уменьшается с ростом толщины диэлектрика вследствие увеличения его неоднородности и ухудшения теплоотдачи.

В диэлектриках, длительно находящихся в электрическом поле, может происходить электрохимический пробой вследствие электролиза, ионизации газовых включений и т.д. Эти процессы приводят к химическому старению диэлектрика. Конечной стадией электрохимического пробоя чаще всего является тепловой пробой.

Наибольшей электрической прочностью обладают твердые диэлектрики, однородные по структуре, имеющие низкую электрическую проводимость, повышенные теплопроводность и нагревостойкость (пленочные фторопласт-4, полиэтилен, лавсан, слюда и т.д.). Величина $E_{\text{пр}}$ таких материалов достигает 100 – 300 МВ/м.

Пробой *жидких* диэлектриков в основном обусловлен количеством и природой примесей, содержащихся в них. Пробой жидкостей, содержащих газовые включения, объясняется локальным перегревом жидкости за счет энергии, выделяющейся в легкоионизирующихся

пузырьках. Вскипание жидкости приводит к образованию газового канала между электродами, в котором и развивается пробой. Частицы твердых примесей также понижают $E_{пр}$ жидких диэлектриков вследствие возможности поляризации в поле и создания проводящих “мостиков”, полностью или частично соединяющих электроды.

Большое внимание уделяется очистке гигроскопичных жидких диэлектриков от воды, снижающей $E_{пр}$. Неочищенное трансформаторное масло, например, имеет $E_{пр}$ = 4 МВ/м, после тщательной очистки электрическая прочность масла повышается до 20 – 25 МВ/м.

Газообразные диэлектрики широко применяются в газонаполненных и вакуумных конденсаторах. Воздух является хорошим изолятором, но только в слабых полях. Электрическая прочность газообразных диэлектриков не превышает 2 – 3 МВ/м. Процесс пробоя обусловлен лавинным умножением электронов под действием ударной ионизации и фотоионизации.

Число электронов, образующихся в течение 1 с в 1 см^3 воздуха под действием радиоактивности Земли или космических лучей, составляет от 10 до 20. Эти электроны являются начальными зарядами, приводящими к пробою в достаточно сильном поле.

При увеличении напряженности электрического поля E электроны на длине свободного пробега λ приобретают энергию $W=e\lambda E$, достаточную для ионизации молекул газа: $W \geq W_u$ ($W_И$ – энергия ионизации, e – заряд электрона). В результате при столкновении с атомами и молекулами они порождают новые электроны. «Вторичные» электроны под действием поля в свою очередь вызывают ионизацию молекул газа. В результате этого процесса число электронов в газовом промежутке, лавинообразно нарастая, очень быстро увеличивается. Электроны распределяются в межэлектродном пространстве в виде компактного облачка, называемого *электронной лавиной*.

Известны два механизма пробоя газов: лавинный и лавинно-стримерный. *Стример* представляет собой скопление ионизированных частиц, сильно превосходящее лавину по степени ионизации.

При *лавинном* механизме ударная ионизация электронами сопровождается вторичными процессами на катоде, в результате которых заряды в газовом промежутке восполняются. Пробой газа сопровождается образованием серии лавин, причем каждая вновь образующаяся лавина по сравнению с предыдущей содержит большее число электронов – происходит «раскачивание» электронных лавин. Лавинный пробой, как правило, развивается в течение относительно длительного времени (более 1 мкс) и не характерен для импульсных напряжений.

При *лавинно*-стримерном механизме на развитие пробоя существенно влияет совместное действие поля пространственного заряда лавины и фотоионизации в объеме газа.

В некоторых случаях электрон, ускоренный электрическим полем, может не ионизировать молекулу, а привести ее в возбужденное состояние: электрон, находящийся внутри молекулы, переходит из равновесного состояния с меньшей энергией в состояние с более высокой энергией (на более удаленную от ядра орбиту). Такая возбужденная молекула в следующий момент отдает свою избыточную энергию в форме излучения – испускает фотон. Фотон поглощается какой-либо другой молекулой, которая при этом может ионизироваться. Такая внутренняя фотонная *ионизация* газа благодаря большой скорости распространения излучения приводит к быстрому развитию в разрядном промежутке каналов с повышенной концентрацией носителей заряда, которая достаточна для преобразования лавины в стример. После распространения стримеров (положительного, образованного ионами, и отрицательного, созданного электронами) на весь межэлектродный промежуток происходит пробой газа.

Электрическая прочность газов уменьшается с ростом расстояния между электродами, имеет немонотонную зависимость от давления с минимумом, соответствующим давлению, близкому к атмосферному.

Задачи

1.5.1. Какие механизмы пробоя твердых диэлектриков вам известны? Каковы условия проявления каждого из них? Почему значение пробивного напряжения не характеризует электрическую прочность диэлектрика?

1.5.2. Почему электрическая прочность твердых диэлектриков больше, чем жидких, а жидких – больше, чем газообразных?

1.5.3. Электрическая прочность непропитанной конденсаторной бумаги и конденсаторного масла соответственно равна 35 и 20 кВ/мм. После пропитки бумаги конденсаторным маслом ее электрическая прочность возрастает до 50 кВ/мм. Почему электрическая прочность пропитанной бумаги больше, чем электрические прочности непропитанной бумаги и пропитывающего диэлектрика?

1.5.4. Одинаково ли будет изменяться пробивное напряжение воздуха, если производить его нагревание: а) при постоянном давлении; б) при постоянном объеме?

1.5.5. Почему ударная ионизация молекул газа в сильном электрическом поле производится главным образом электронами, а не ионами?

1.5.6. Как влияет давление газа на его электрическую прочность и ионизационные потери?

1.5.7. Чем отличается пробой газа в однородном и неоднородном электрических полях? Каким образом в газе можно создать однородное поле? Почему при увеличении расстояния между электродами пробивное напряжение газа в однородном поле возрастает?

1.5.8. При расстоянии между электродами 0,1 мм электрическая прочность вакуума равна 10^8 В/м. Каков при этом механизм пробоя вакуума? Как меняется электрическая прочность вакуума при увеличении расстояния между электродами?

1.5.9. По каким признакам можно выявить механизм пробоя твердых диэлектриков? Какой механизм пробоя характерен для диэлектриков при импульсном воздействии высокого напряжения?

1.5.10. Почему более толстые слои диэлектриков, как правило, имеют меньшую электрическую прочность?

1.5.11. Предполагая, что в диэлектрике доминируют потери на электропроводность, изобразите график зависимости напряжения теплового пробоя от температуры окружающей среды.

1.5.12. Изобразите графически зависимости напряжения пробоя воздуха от расстояния между электронами при постоянном давлении. Как изменится вид графика, если давление станет меньше первоначального? Дайте объяснение рассматриваемым закономерностям.

1.5.13. Изобразите графически зависимость напряжения пробоя газа от давления при различных расстояниях между электродами. Объясните закономерности в изменении хода кривых.

1.5.14. Как изменится энергия, приобретаемая свободным электроном в газе в однородном электрическом поле, если давление газа увеличить в два раза при одновременном уменьшении в два раза длины разрядного промежутка? Как изменится при этом средняя длина свободного пробега электрона? Внешнее напряжение, приложенное к газу, считать постоянным.

1.5.15. Пленка поливинилхлорида при электрическом пробое разрушается при напряжении 1,5 кВ. Определите толщину пленки, если ее электрическая прочность равна 50 МВ/м.

1.5.16. В изоляторе линии электропередачи при постоянном напряжении 25 кВ происходит поверхностный пробой. Объясните, можно ли использовать этот изолятор в линиях электропередачи промышленной частоты с действующим напряжением 220 кВ.

1.5.17. При каком максимальном напряжении может работать слюдяной конденсатор емкостью C=1000 пФ с площадью обкладок $S=6\cdot10^{-4}$м^2, если он должен иметь четырехкратный запас по электриче-

ской прочности? Диэлектрическая проницаемость слюды ε=7, ее электрическая прочность $E_{пр}$=100 МВ/м. Какова толщина h слюдяной пластинки?

1.5.18. Определите запас по электрической прочности плоского конденсатора и толщину диэлектрика из неорганического стекла, если емкость конденсатора 68 пФ, площадь обкладки 10 см^2, а рабочее напряжение 10 кВ. Диэлектрическую проницаемость стекла принять равной 6,5, а его электрическую прочность равной $5 \cdot 10^7$ В/м.

1.5.19. В плоском конденсаторе емкостью C=39 пФ используется неорганическое стекло, имеющее диэлектрическую проницаемость ε=6 и электрическую прочность $E_{пр}$=100 МВ/м. Какими следует выбрать толщину диэлектрика h и площадь обкладок S, если конденсатор должен работать при напряжении 16 кВ при четырехкратном запасе по электрической прочности? Возможность поверхностного пробоя при расчете не учитывать.

1.5.20. Известно, что при тепловом пробое в равномерном поле диэлектрик однородной структуры толщиной 2 мм, расположенный между электродами площадью 2 см^2, пробивается при напряжении 15 кВ. При каком напряжении пробьется этот диэлектрик, если его расположить между электродами площадью 3 см^2?

1.5.21. Известно, что при тепловом пробое диэлектрик толщиной 4 мм пробивается при напряжении 15 кВ на частоте 100 Гц. При каком напряжении промышленной частоты пробьется такой же диэлектрик толщиной 2 мм?

1.5.22. Известно, что диэлектрик толщиной 1 мм при тепловом пробое разрушается при напряжении 10 кВ. Рассчитайте и постройте для этого диэлектрика график зависимости пробивного напряжения от толщины (до толщины 5 мм).

1.5.23. Имеются две стеклянные пластины разной толщины ($h_1 \ll h_2$), для каждой из которых в однородном электрическом поле определены значения пробивного напряжения ($U_{пр1}$, $U_{пр2}$) и электрической прочности ($E_{пр1}$, $E_{пр2}$). Каким будет соотношение между значениями пробивного напряжения и электрической прочности этих двух пластин? Изобразите (качественно) зависимости пробивного напряжения и электрической прочности стекла от толщины.

1.5.24. Ответьте на вопросы, поставленные в предыдущей задаче, для случая двух листов картона разной толщины.

1.5.25. На обкладки конденсатора подали напряжение U_1=5 кВ. Между обкладками находится однородный материал с диэлектрической проницаемостью ε_1=6. Затем его заменили материалом с другой диэлектрической проницаемостью, а к конденсатору приложили напряжение U_1=10 кВ. Напряженность электрического поля в диэлектри-

ке в обоих случаях одинакова, а расстояние между обкладками h_2 во втором случае равно 4 мм. Определите расстояние между обкладками и емкость конденсатора в первом случае, если размер обкладок 2·4 см.

1.5.26. Как и почему изменится пробивное напряжение воздуха при нормальном атмосферном давлении, если температуру повысить от 20 ºС до 100 ºС?

1.5.27. Определите минимальную скорость электрона, чтобы он мог ионизировать атом неона, если потенциал ионизации неона 21,5 В. Какое расстояние должен пройти электрон в поле напряженностью 3 МВ/м, чтобы приобрести эту скорость?

1.5.28. Средняя длина свободного пробега электрона в неоне составляет $7{,}9\cdot10^{-4}$ м при T=300 К и давлении p=133 Па. Определите минимальную напряженность электрического поля, при которой электрон на длине свободного пробега достигнет энергии ионизации неона. Начальную скорость электрона принять равной нулю. Потенциал ионизации неона 21,5 В.

1.5.29. В нормальных условиях (p=10^5 Па; T=20 ºС) электрическая прочность воздуха составляет 3,2 МВ/м. Как изменится электрическая прочность, если температура повысится до 100 ºС, а давление – до 0,2 МПа.

2. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Классификация магнитных материалов

Все вещества в природе являются магнетиками, т.е. обладают определенными магнитными свойствами и определенным образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств изолированных элементарных частиц, структуры атомов и молекул, а также их групп.

Магнитные свойства атома в основном определяются магнитными свойствами электронов. Магнетизм других частиц относительно мал. Так, магнитный момент атомного ядра приблизительно в тысячу раз меньше магнитного момента электронной оболочки атома. Магнитный момент электрона возникает вследствие движения электрона по орбите (орбитальный момент) и наличия у него спина (спиновый момент). Магнитный момент многоэлектронного атома представляет собой сумму магнитных моментов всех электронов, включая как орбитальные моменты, так и спиновые. Каждый электрон вносит в полный магнитный момент атома независимый векторный вклад.

В соответствии с современными представлениями о магнетизме различают следующие основные типы магнитного состояния вещества: диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм, антиферромагнетизм и ферримагнетизм (нескомпенсированный антиферромагнетизм). Вещества, в которых проявляются эти явления, соответственно называются: *диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.* Схематическое расположение моментов электронов атомов, для разных по магнитным свойствам веществ иллюстрируется на рис. 2.1.

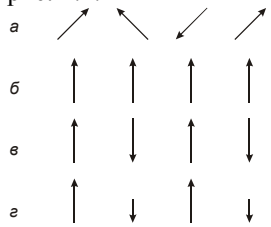


Рис. 2.1. Схематическое расположение спинов в парамагнитных (*а*), ферромагнитных (*б*), антиферромагнитных (*в*) и ферримагнитных (*г*) веществах. Диамагнетикам свойственна полная взаимная компенсация магнитных моментов атомов

Основными магнитными величинами являются: намагниченность *M*, А/м; $M = \kappa \vec{H}$, где κ – магнитная восприимчивость; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, А/м. Магнитная индукция *B*, Тл (тесла), характеризует суммарное магнитное поле внутри материала:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1+\kappa)\vec{H} = \mu_0\mu\vec{H} = \mu_a\vec{H}\,, \qquad (2.1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, численно равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, характеризующая магнитную проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость вещества, которая показывает, во сколько раз магнитная проницаемость данной среды больше магнитной проницаемости вакуума (величина безразмерная); $\mu_a = \mu_0\mu$ – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Отдельные классы магнетиков различаются по величине и знаку магнитной восприимчивости, а также по характеру зависимости магнитных характеристик от температуры и напряженности магнитного поля.

Диамагнетиками называют вещества, в которых имеет место полная взаимная компенсация как орбитальных, так и спиновых магнитных моментов.

Физическая природа диамагнетизма основана на классическом представлении об атоме как системе электронов, движущихся вокруг

ядра по определенным замкнутым траекториям-орбитам с некоторой угловой скоростью.

Если на атом накладывается медленно меняющееся магнитное поле, то эта угловая скорость меняется, а радиус орбиты остается неизменным. Изменение угловой скорости приводит к возникновению магнитного момента $\vec{\mu}_m$ величиной

$$\vec{\mu}_m = -\frac{e^2}{4m}\mu_0 r^2 \vec{H}, \qquad (2.2)$$

где e – заряд электрона, m – его масса, r – радиус электронной орбиты, $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля, приложенного перпендикулярно к плоскости орбиты. Атомная магнитная восприимчивость κ, рассчитанная по (2.1), (2.2), имеет порядок $\kappa \approx -(10^{-6} - 10^{-5})$, т.е. соответствует величине, измеряемой экспериментально для диамагнитных твердых тел, и не зависит от температуры. Магнитная проницаемость диамагнетиков $\mu \approx 0{,}99999$ и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля.

Изменение угловой скорости электрона, связанное с наложением магнитного поля, всегда обусловливает отрицательную магнитную восприимчивость. Атом с циркулирующим в нем электроном ведет себя подобно индуктивности, в которой в соответствии с правилом Ленца возникла э.д.с. противоположного знака. Таким образом, во всем объеме твердого тела возникают индуцированные внешним магнитным полем незатухающие микроскопические вихревые токи, обусловленные прецессией электронных орбит. Направление индуцированных магнитных моментов всегда противоположно направлению внешнего магнитного поля, поэтому диамагнетики отличаются тем, что выталкиваются из неоднородного магнитного поля. Диамагнетизм является результатом прецессии всех электронов атомов и молекул, поэтому присущ всем веществам, но проявляется только в том случае, если не перекрывается более сильным пара- и ферромагнетизмом.

К диамагнитным веществам относятся водород, инертные газы, азот, хлор, вода, большинство органических соединений, ряд металлов: Cu, Ag, Au, Be, Zn, Cd, Mg, Pb, B, Ga, Sb, а также графит, стекло и др.

Диамагнетизм не имеет простого практического применения. К числу наиболее интересных диамагнетиков относятся сверхпроводники. Они обладают бесконечно большой диамагнитной восприимчивостью – свойством, которое чрезвычайно полезно при конструировании сверхпроводящих магнитов.

Парамагнетиками называются вещества, в которых взаимодействие между постоянными магнитными моментами атомов – элементарными магнитными диполями – мало, в результате чего при обычных температурах под действием теплового движения молекул магнитные моменты атомов располагаются статистически равновероятно относительно любого направления и суммарный магнитный момент равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля создается преимущественное направление расположения элементарных магнитных моментов, т.е. тело оказывается намагниченным, однако при обычных полях и температурах намагниченность парамагнетиков очень мала. Магнитная восприимчивость их положительна и имеет значение $\kappa \sim (10^{-5} - 10^{-2})$, относительная магнитная проницаемость $\mu \approx 1{,}001$.

Проявлением парамагнетизма является независимая ориентация магнитных моментов атомов и ионов под действием внешнего магнитного поля. Так как моменты ориентируются в направлении поля и тем самым увеличивают его, магнитная восприимчивость κ больше нуля.

Парамагнетизм характеризуется двумя независимыми факторами. Один из них – температурная зависимость суммарной намагниченности всего образца, другой – природа самих магнитных моментов атомов.

Для парамагнитных газов и редкоземельных элементов температурная зависимость магнитной восприимчивости характеризуется законом Кюри, установленным экспериментально в 1895 г.:

$$\kappa = C/T, \qquad (2.3)$$

где C – постоянная Кюри, T – температура, К.

Для переходных парамагнитных металлов, у которых взаимодействием между элементарными носителями магнетизма (молекулярным полем) пренебречь нельзя, справедлив более общий закон Кюри – Вейса:

$$\kappa = C/(T - \Delta), \qquad (2.4)$$

где Δ – постоянная Вейса, различная для разных веществ (может быть и больше, и меньше нуля).

На рис. 2.2,а показана зависимость намагниченности $M(H)$ для диа- и парамагнетиков при слабых полях и при обычных или высоких температурах. В обоих случаях значение M пропорционально H, что свидетельствует о независимости κ от H. Для намагничивания парамагнетиков до насыщения (рис. 2.2,б), т.е. до состояния, когда все элементарные магнитные моменты будут параллельны внешнему полю, требуется при комнатной температуре поле напряженностью примерно

10^{11} А/м, а при $T = 1$ К примерно $3 \cdot 10^5$ А/м. Однако в последние годы выяснилось, что в парамагнетиках можно создать высокую намагниченность, не прибегая к сильным магнитным полям, а используя поток квантов света (оптическую накачку).

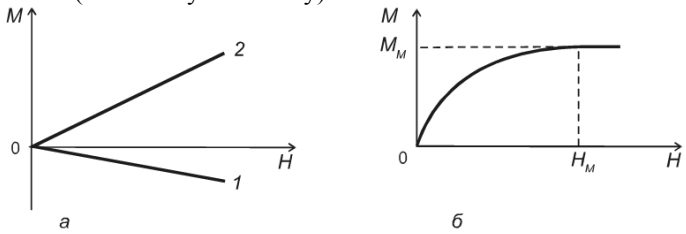


Рис. 2.2. Зависимость намагниченности M от напряженности магнитного поля H: *а* – для диамагнетиков *(1)* и парамагнетиков *(2)*; *б* – для парамагнетиков при низких температурах или очень сильных полях

С повышением температуры при неизменной напряженности поля возрастает дезориентирующая роль теплового движения молекул и поэтому намагниченность убывает. Парамагнетики отличаются тем, что они втягиваются в неоднородное магнитное поле.

Поскольку все заполненные электронные оболочки имеют нулевой полный момент количества движения, они обладают также нулевым полным магнитным моментом. В частности, атомы или ионы, обладающие только заполненными оболочками, не имеют постоянных магнитных моментов и, следовательно, не могут быть парамагнитными. Никаких исключений из этого правила не обнаружено. Инертные газы He, Ar, Kr и т.д. и такие ионы, как Na^+ и Cl^-, диамагнитны. Диамагнитны также и многие газы, такие как Б и др., поскольку все электроны в их молекулах спарены. Свободные атомы других веществ обнаруживают парамагнетизм, если у них имеются неспаренные спины или нескомпенсированный момент количества движения.

К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, а также Mg, Ca, Al, Cr, Mo, Mn, Pt, Pb и др.

Парамагнетизм в атомах или ионах не существует в одиночку: одновременно с ним всегда имеют место и диамагнитные свойства. Поскольку оба эти эффекта противоположны друг другу по знаку, суммарные магнитные свойства материала определяются преобладающим. У большинства материалов величина парамагнитной восприимчивости значительно больше диамагнитной, т.е. парамагнетизм обычно преобладает над диамагнетизмом.

Парамагнитные вещества используются в качестве рабочих тел в квантовых парамагнитных усилителях и генераторах.

Ферромагнетиками называют вещества, характеризующиеся намагничиванием недостроенных внутренних оболочек атомов, поскольку магнитные моменты заполненных оболочек равны нулю, а внешние валентные электроны металла обобществлены. Такими элементами являются переходные металлы группы железа, имеющие недостроенную 3*d*-оболочку, и редкоземельные элементы с недостроенной 4*f*-оболочкой. Наличие магнитного момента у атомов обусловлено только нескомпенсированными спиновыми магнитными моментами, поскольку орбитальные магнитные моменты весьма малы. Для ферромагнетиков в отсутствие внешнего поля энергетически выгодным является параллельное расположение магнитных моментов соседних атомов внутри домена.

При помещении ферромагнитного материала в магнитное поле одновременно происходят процессы ориентации магнитных моментов доменов и смещение их границ (изменение объема). В слабом поле преобладает процесс обратимого смещения границ, т.е. рост объема доменов, у которых магнитный момент, направленный вдоль оси легкого намагничивания, составляет наименьший угол с направлением внешнего поля. При усилении поля процесс идет более интенсивно и приобретает необратимый характер, кривая намагничивания $B(H)$ становится круче (рис. 2.3). При дальнейшем увеличении напряженности поля осуществляется процесс вращения вектора намагниченности в направлении внешнего поля и магнитное состояние материала достигает технического насыщения.

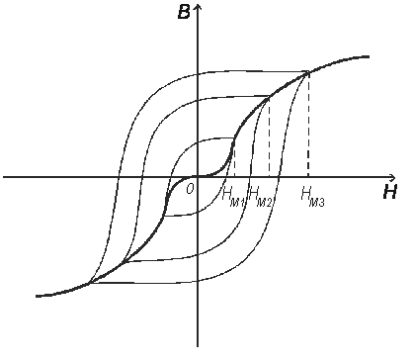
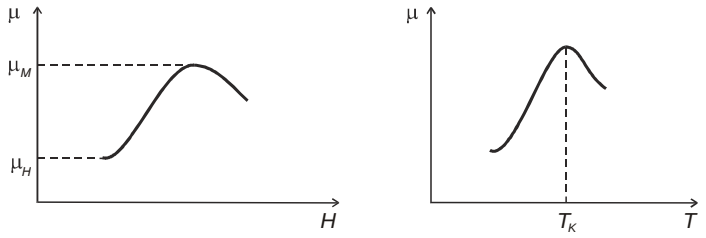


Рис. 2.3. Основная кривая намагничивания
и семейство гистерезисных циклов

В переменных магнитных полях магнитное состояние образца периодически повторяется и его магнитная индукция зависит от величины намагничивающего поля, направления и частоты его изменения. Форма петли гистерезиса при неизменной частоте зависит от предельных значений напряженности поля. Семейство таких симметричных петель изображено на рис. 2.3. Сплошная кривая, проходящая по вершинам петель, называется нормальной, или основной, кривой индукции.

Причинами гистерезиса являются необратимые смещения границ доменов, необратимые процессы вращения и задержка роста зародышей перемагничивания, под которыми понимают небольшие объемы с самопроизвольной намагниченностью обратного направления по отношению к основной ориентации намагниченности образца. Ферромагнетики характеризуются большими положительными значениями κ и μ (до сотен тысяч и миллионов), а также сложной нелинейной зависимостью этих параметров от напряженности внешнего магнитного поля (рис. 2.4,а). При температурах выше точки Кюри $T_к$, определенной для каждого материала, ферромагнитное состояние переходит в парамагнитное (рис. 2.4,б) вследствие того, что хаотическое тепловое движение атомов нарушает параллельную ориентацию их магнитных моментов и, следовательно, доменное строение ферромагнетика. Точка Кюри чистого железа составляет 768, никеля – 631, кобальта – 1404 °С.



а б

Рис. 2.4. Зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля *(а)* и температуры *(б)*

Антиферромагнетики – это вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, поэтому имеет место их взаимная компенсация. Магнитная восприимчивость антиферромагнетиков мала и составляет $\kappa \approx (10^{-5} - 10^{-3})$. В слабых полях κ и μ практически не зависят

от напряженности внешнего магнитного поля, в сильных являются сложной функцией напряженности поля. В некоторой степени свойства антиферромагнетиков схожи со свойствами парамагнетиков. Пара- и антиферроманитные вещества объединяют положительная магнитная восприимчивость и компенсация магнитных моментов атомов. Различие заключается в том, что спиновые моменты парамагнетиков ориентированы хаотически, а антиферромагнетиков – параллельно друг другу.

По мере повышения температуры от 0 К величина к растет, достигая максимума при температуре, называемой точкой Нееля, и далее начинает уменьшаться, подчиняясь на этом участке закону Кюри – Вейса.

К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, а также Cr и Mn; многие окислы, хлориды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца: MnO, $MnCl_2$, MnF_2, MnS_2 и др., аналогично на основе Fe, Co, Ni, Cr и др.

Феррримагнетиками (или нескомпенсированными антиферромагнетиками) называют вещества, в которых магнитные моменты атомов взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу, однако величины этих магнитных моментов имеют различные значения, благодаря чему результирующая намагниченность может быть большой.

К ферримагнетикам относятся ферриты, представляющие собой магнитную керамику, состоящую из смеси окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов. Структурная формула ферритов $MeO{\cdot}Fe_2O_3$, где Me – двухвалентный металл (Fe, Ni, Mn, Zn, Co, Cu, Cd, Mg и др.). Многие свойства ферримагнетиков качественно аналогичны свойствам ферромагнетиков, однако имеются и существенные различия. Например, ферримагнетики (ферриты) отличаются от ферромагнетиков меньшей величиной индукции насыщения и имеют более сложную температурную зависимость основных магнитных параметров.

Преимущества ферритов при работе в ВЧ- и СВЧ-диапазонах обусловлены тем, что их удельное электрическое сопротивление в 10^6 - 10^{11} раз превышает удельное сопротивление металлических ферромагнетиков, так как они являются оксидными материалами, а не металлами. По значению удельного электрического сопротивления ρ они относятся к классу полупроводников или диэлектриков. Вследствие этого вихревые токи (и соответствующая мощность магнитных потерь) в ферритах очень малы и они применяются в качестве магнитного мате-

риала при частотах до сотен мегагерц, тогда как металлические магнитные материалы применяются при частотах до нескольких десятков мегагерц.

Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость ферримагнетиков ниже, чем у ферромагнетиков, и достигают значений нескольких десятков тысяч.

Диа-, пара- и антиферромагнетики объединяются в группу слабомагнитных веществ, а ферро- и ферримагнетики – в группу сильномагнитных (см. рис. 2.1).

2.2. Потери в магнитных материалах

При перемагничивании ферромагнетиков в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые потери энергии. Они складываются из потерь на гистерезис и динамических потерь. В свою очередь динамические потери включают в себя потери на вихревые токи и магнитное последействие. Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_{\Gamma} = \frac{f \oint HdB}{D}, \qquad (2.5)$$

где f – частота тока; D – плотность материала, $\oint HdB$ - площадь петли гистерезиса.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_{\text{в.т.}} = \frac{f^2 B_{\text{макс}}^2 d^2 \eta}{D\rho}, \qquad (2.6)$$

где η – коэффициент формы; d – толщина материала; $B_{макс}$ – максимальная индукция, достигаемая в начале цикла; ρ – удельное сопротивление материала.

В цепях переменного тока рассеяние мощности в катушках индуктивности иногда оценивают тангенсом угла магнитных потерь

$$\operatorname{tg}\delta_M = \frac{r}{\omega L}, \qquad (2.7)$$

где L – индуктивность катушки; r – сопротивление, эквивалентное всем видам потерь мощности в магнитном материале.

Задачи

2.2.1. Почему диамагнетики намагничиваются противоположно направлению вектора напряженности и внешнего магнитного поля? Как влияет температура на диамагнитную восприимчивость?

2.2.2. Как изменяется магнитная восприимчивость парамагнетиков с повышением температуры? Может ли быть достигнуто магнитное насыщение парамагнитных веществ?

2.2.3. Назовите основные механизмы намагничивания ферромагнетика, приводящие к нелинейной зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

2.2.4. Почему в области магнитного насыщении ферромагнетика намагниченность материала возрастает с увеличением напряженности магнитного поля? Как влияет температура на изменение намагниченности в области технического насыщения?

2.2.5. Могут ли обладать ферромагнитными свойствами сплавы, состоящие из неферромагнитных элементов?

2.2.6. Объясните, как и почему изменяется индукция насыщения ферромагнетиков при повышении температуры.

2.2.7. Объясните, чем определяются направления векторов спонтанных намагниченностей в доменах и расположение доменных границ в отсутствие внешнего магнитного поля.

2.2.8. Чем отличается спиновое обменное взаимодействие в ферро- и антиферромагнетиках?

2.2.9. Объясните, почему высоконикелевый пермаллой, имеющий примерно в два раза меньшую, чем железо и электротехническая сталь, индукцию насыщения, обладает вместе с тем существенно более высокой начальной магнитной проницаемостью.

2.2.10. Какими причинами обусловлен различный характер температурных зависимостей магнитной проницаемости магнитного материала, измеряемой в слабом и сильном магнитных полях?

2.2.11. Укажите, какими способами можно полностью размагнитить ранее намагниченный ферромагнитный образец.

2.2.12. Изобразите (качественно) зависимость потерь на перемагничивание ферромагнитного сердечника от напряженности магнитного поля.

2.2.13.Укажите, следствием какого универсального закона являются диамагнитные свойства вещества. Почему парамагнетизм, в отличие от диамагнетизма, не универсален? Как зависит диамагнитная восприимчивость химического элемента от его места в Периодической системе элементов?

2.2.14. Чем и почему отличаются предельные петли гистерезиса металлических ферромагнетиков и ферритов? Изложите методику

экспериментального определения петли гистерезиса и основной кривой намагничивания.

2.2.15. Какое влияние оказывает магнитная проницаемость на характеристики кольцевых ферритовых сердечников?

2.2.16. Назовите магнитомягкие и магнитотвердые ферромагнетики, на основе которых получают композиционные магнитные материалы – магнитодиэлектрики и магнитопласты. Почему применительно к магнитодиэлектрикам употребляется термин «эффективная магнитная проницаемость»? Какова технология изготовления изделий из этих материалов?

2.2.17. Чем объясняется высокая магнитная проницаемость пермаллоев?

2.2.18. Объясните природу широкой петли гистерезиса бариевых ферритов и ферромагнитных сплавов системы Fe – Ni – Al. Какими технологическими приемами удается получить из этих материалов постоянные магниты с анизотропными свойствами?

2.2.19. Укажите, как можно экспериментально определить напряженность магнитного поля в зазоре электромагнита? На каких физических эффектах основан принцип действия магнитных датчиков?

2.2.20. В однородное магнитное поле помещен цилиндр из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью так, что ось цилиндра перпендикулярна к вектору напряженности магнитного поля. Изобразите распределение линий магнитной индукции.

2.2.21. В нейтральном атоме железа два электрона находятся в 4-s состоянии при не полностью заполненной внутренней 3d-оболочке. Учитывая, что при ионизации сначала удаляются 4s-электроны, приведите распределение электронов по энергетическим состояниям в свободном атоме железа, а также двух- и трехвалентных ионах железа.

2.2.22. Диамагнитная восприимчивость меди равна - $9.5 \cdot 10^{-6}$ Определите намагниченность и магнитную индукцию в медном проводе при воздействии на него однородного магнитного поля напряженностью1000 А/м.

Укажите, как ориентированы векторы намагниченности и магнитной индукции относительно друг друга.

2.2.23. При насыщении магнитная индукция чистого железа B=2.2 Тл. Учитывая, что элементарная ячейка кристаллической решетки железа представляет собой объемно-центрированный куб с ребром a=0.286 нм, рассчитайте магнитный момент, приходящийся на один атом железа.

2.2.24. Магнитная индукция насыщения металлического никеля, имеющего плотность 8960 кг/см^3, равна 0,65 Тл. Определить маг-

нитный момент, приходящийся на один атом никеля (в магнетонах Бора).

2.2.25. Имеется два магнитных материала, для которых выполняются условия: $\mu_{max1} > \mu_{max2}$, $B_{S1} > B_{S2}$. Постройте (качественно) на одном графике: а) основные кривые намагничивания для этих материалов; б) зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

2.2.26. В однородное магнитное поле с индукцией B_0 перпендикулярно к магнитному потоку помещена плоскопараллельная пластина из однородного изотропного ферромагнетика с магнитной проницаемостью μ. Определите магнитную индукцию B_1 и напряженность магнитной индукцию H_1 внутри ферромагнетика.

2.2.27. Какую форму петли гистерезиса должны иметь магнитные материалы, чтобы их магнитная проницаемость не зависела от напряженности магнитного поля?

2.2.28. При напряженности магнитного поля $H=10^4$ А/м магнитная индукция в висмуте B=12,564 Тл. Определите магнитную восприимчивость $k_м$ вещества. Какой вывод можно сделать о природе намагниченности?

2.2.29. Магнитная восприимчивость никеля при температурах 400 и 800 ^{0} С равна соответственно $1{,}25\cdot10^{-3}$ и $1{,}14\cdot10^{-4}$. Определите температуру Кюри и магнитную восприимчивость при T= 600 ^{0}С.

2.2.30. Допуская, что железо является парамагнетиком в широкой области температур, оцените напряженность магнитного поля, необходимую для создания при комнатной температуре спонтанной намагниченности, равной 0,12 Тл.

2.2.31. В сердечнике трансформатора удельные магнитные потери на гистерезис и на вихревые токи при частоте 2 кГц равны и составляют 2 Вт/кг. Определите суммарные удельные магнитные потери в сердечнике на частоте 400 Гц, если максимальная магнитная индукция в нем та же, что и на частоте 2 кГц.

2.2.32. В сердечнике трансформатора на частоте 50 Гц потери на гистерезис при индукции магнитного поля 0,1 и 0,5 Тл составляют 0,15 и 1,97 Вт/кг соответственно. Определите потери на гистерезис на частоте 200 Гц при индукции поля 0,6 Тл.

2.2.33. На частоте 50 Гц удельные потери на вихревые токи в сердечнике из электротехнической стали при индукции магнитного поля B=1,2 Тл составляет 6,5 Вт/кг. Определите потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 400 Гц при магнитной индукции 0,5 Тл, если масса сердечника *m=0,5 кг.*

2.2.34. Ферромагнитное железо обладает кубической объемноцентрированной решеткой с периодом идентичности 2,86 Å и намаг-

ниченностью $1{,}75 \cdot 10^6$ Гс. Вычислите магнитный момент, приходящийся на один атом железа, в магнетонах Бора.

2.2.35. Определите удельные магнитные потери на вихревые токи в сердечнике трансформатора, набранном из листов электротехнической стали толщиной 0,35 мм, если на сердечник воздействует изменяющийся по синусоидальному закону магнитный поток с частотой 50 Гц и максимальной индукцией 0,5 Тл, обусловленный прохождением
переменного тока i по обмотке. Удельное сопротивление стали ρ принять равным 0,5 мкОм·м.

2.2.36. Запишите распределение катионов по кислородным междоузлиям для никель-цинкового феррита составом $Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4$. Рассчитайте для этого материала индукцию насыщения при температуре вблизи абсолютного нуля и сравните полученный результат с индукцией насыщения для феррита никеля в тех же условиях. Период кристаллической решетки твердого раствора принять равным 0,84 нм.

2.2.37. Объясните, почему при замене части ионов Ni^{2+} немагнитнымим ионами Zn^{2+} наблюдается снижение температуры Кюри и увеличение начальной магнитной проницаемости феррита $NiFe_2O_4$.

2.2.38. Объясните, как изменится температурная зависимость индукции насыщения магнетита Fe_2O_4, если часть ионов Fe^{3+} замещена ионами Al^{3+}. Известно, что ионы AL^{3+} занимают в решетке шпинели октаэдрические кислородные междоузлия.

2.2.39. Определите магнитные потери в сердечнике К40·20·7,5 из феррита марки 200 НМ на частоте 0,1 МГц при пропускании через намагничивающую обмотку тока 40 мА. Обмотка состоит из 100 витков, добротность сердечника в данных условиях равна 10. Магнитную проницаемость сердечника при рабочей напряженности поля принять равной $\mu_н$.

2.2.40. Найти удельные магнитные потери в ферритовом сердечнике марки 200 НН, перемагничивающемся на частоте 0,1 МГц магнитным полем напряженностью H_m=4 А/м, если в данных условиях $tg\ \delta_м = 0{,}2$, магнитная проницаемость μ=2500.

2.2.41. Кольцевой сердечник размерами $R{\cdot}r{\cdot}h{=}16{\cdot}8{\cdot}8$ мм, изготовленный из феррита марки 200 НМ, на частоте 0,01 МГц имеет $tg\ \delta_м = 0{,}5$. На сердечнике намотана обмотка из 20 витков. Найдите эквивалентное сопротивление потерь в сердечнике в слабых магнитных полях.

2.2.42. Изобразите (качественно) температурные $\mu(T)$ и частотные $\mu(f)$ зависимости магнитной проницаемости ферритов марок 4000 НМ и 1000 НМ, исходя из общих закономерностей изменения

свойств марганец-цинковых ферритов. Сравните эти материалы по следующим параметрам:

- начальной магнитной проницаемости $\mu_н$;
- граничной частоте $f_{гр}$;
- тангенсу угла магнитных потерь $tg\ \delta_м$;
- коэрцитивной силе H_c;
- удельному сопротивлению ρ;
- температурному коэффициенту магнитной проницаемости α_μ;
- температуре Кюри $T_к$;
- потерям на вихревые токи $P_{вт}$;
- потерям на гистерезис $P_г$.

2.2.43. Кольцевой ферритовый сердечник массой $m=0,1$кг перемагничивается переменным магнитным полем напряженностью H_m=1 кА/м и частотой $f = 10^4$ Гц. Определить мощность, выделяемую в сердечнике, если магнитная проницаемость материала μ=1000; $tg\ \delta_м$ = 0,02; плотность феррита d = 4,5 Мг/м^3.

2.2.44. Кольцевой ферритовый сердечник размерами $R{\cdot}r{\cdot}h=16{\cdot}8{\cdot}8$ мм с магнитной проницаемостью μ=1000 имеет обмотку, содержащую 100 витков. Измерениями установлено, что на частоте 0,1 МГц при токе 100 мА в катушке выделяется активная мощность 0,3 Вт, а в отсутствие магнитного сердечника при том же токе в обмотке выделяется лишь 0,1 Вт. Определите добротность сердечника.

2.2.45. Пористость ферритовых стержней круглого сечения диаметром $D_ф$=10 мм составляет 3 %. Стержни изготовлены по керамической технологии путем обжига предварительного спрессованных заготовок. Каким должен быть диаметр заготовок $D_з$, если их пористость составляет 27 %? Определите относительное уменьшение длины стержня при обжиге.

2.2.46. Определите коэрцитивную силу кольцевого ферромагнитного сердечника, если для его размагничивания через обмотку, содержащую 100 витков, требуется пропустить ток 63 мА. Средний диаметр кольца 20 мм.

2.2.47. Кольцевой магнитопровод имеет площадь поперечного сечения S=100 мм^2 и среднюю длину магнитного контура $l_{ср}=0,1$ *м*. На сердечник намотана обмотка с числом витков $n=100$. Определите магнитный поток через сердечник при токе в обмотке $I=1$ *А*, если магнитная проницаемость материала сердечника равна 2000.

2.2.48. Определите индуктивность катушки с кольцевым магнитным сердечником размерами $R{\cdot}r{\cdot}h=30{\cdot}20{\cdot}20$ мм и обмоткой, состоящей из 200 витков. Сердечник изготовлен из высоконикелевого

пермаллоя с относительной магнитной проницаемостью μ=50000 (при рабочей напряженности магнитного поля).

2.2.49. Катушка с ферритовым тороидальным сердечником диаметром 10 мм имеет индуктивность 0,12 Гн и содержит 100 витков. Определите ток в катушке, при котором магнитная индукция в сердечнике равна 0,1 Тл.

2.2.50. Найдите индуктивность соленоида, имеющего 200 витков, намотанных на диэлектрическое основание, длиной l = 50 мм. Площадь поперечного сечения основания S=50 мм^2. Как изменится индуктивность катушки, если в нее введен цилиндрический ферритовый сердечник, имеющий магнитную проницаемость μ=400, определенную с учетом размагничивающего действия воздушного зазора?

2.2.51. Определите, сколько витков необходимо намотать на магнитный сердечник длиной 100 мм и диаметром 8 мм, чтобы получить индуктивность катушки L=10 мГн. Магнитную проницаемость сердечника считать равной 500.

2.2.52. Тороидальный сердечник из пермаллоя с внутренним диаметром 30 мм и наружным диаметром 40 мм имеет обмотку из 200 витков. При пропускании через обмотку тока 0,5 А в сердечнике создается магнитное поле индукцией 1,5 Тл. Определите магнитную проницаемость сердечника.

2.2.53. Найдите намагниченность $J_м$ парамагнетика, находящегося внутри соленоида длиной l=30 см с сечением S=2 см^2 и числом витков n=300, когда по обмотке проходит ток I=1,5 А. Индуктивность соленоида L=7,55·10^{-5} Гн.

2.2.54. Определите магнитную индукцию ферромагнитного сердечника, помещенного внутрь соленоида длиной l=20 см с числом витков n=800, если по обмотке проходит ток 0,2 А, а эффективная магнитная проницаемость сердечника μ=200.

2.2.55. Кольцевой ферритовый сердечник со средним диаметром $d_{ср}$= 25 мм имеет воздушный зазор длиной 1 мм. При пропускании тока 0,17 А через обмотку сердечника, состоящую из 500 витков, в зазоре создается магнитная индукция B_0=0,1 Тл. Определите магнитную проницаемость феррита.

2.2.56. Магнитная восприимчивость сердечника из магнитодиэлектрика на основе альсифера k_M=10. Определите напряженность магнитного поля внутри этого сердечника, если индукция магнитного поля B=0,1 Тл.

2.2.57. Приведите пример конструкции катушки с регулируемой индуктивностью. Какие физические закономерности лежат в основе процесса регулирования?

2.2.58. Покажите направление вектора магнитной индукции в ферритовых сердечниках Ш-образной, тороидальной и броневой конструкции. Как должна быть расположена обмотка относительно сердечника?

2.2.59. Как изменится добротность катушки индуктивности, если в её тороидальном сердечнике перпендикулярно к направлению магнитного потока образовалась трещина (тонкий воздушный зазор)?

2.2.60. Почему катушки индуктивности с сердечниками из магнитодиэлектриков обычно обладают лучшей температурной стабильностью, чем катушка с ферритовыми сердечниками?

2.2.61. Расшифруйте обозначения пермаллоев промышленных марок: 76 НХД, 65 НП, 80 НХС, 79 НМ.

2.2.62. Какими параметрами характеризуют термостойкость, температурную стабильность и частотные свойства ферритов?

2.2.63. Расшифруйте обозначения ферритов марок: 20000 НМ, 10000 НН, 100 ВЧ.

2.2.64. От какого параметра магнитного материала зависит площадь поперечного сечения магнитопровода силового трансформатора?

2.2.65. При напряженности магнитного поля H=400 кА/м магнитотвердый сплав ЮНДК35Т5 имеет магнитную индукцию B=1 Тл. Определите намагниченность сплава.

2.2.66. Определите силу, с которой притягиваются друг к другу полюса электромагнита, если площадь сечения полюса S=25 см^2, а магнитная индукция в зазоре между ними B=0,6 Тл.

2.2.67. Какой из трех ленточных кольцевых сердечников одинаковых размеров из пермаллоев марок 50 НХС, 50 Н, 79 НМ имеет при одних и тех же условиях эксплуатации меньшие потери на вихревые токи, если толщина пермаллоевой ленты всех сердечников одинакова? Изобразите (качественно) на одном рисунке основные кривые намагничивания пермаллоев марок 50 Н, 79 НМ.

2.2.68. Намагниченный тороидальный сердечник, изготовленный из магнитотвердого материала, имеет прямоугольное сечение 10·10 мм при наружном диаметре $D_н$=6 см. Определите напряженность магнитного поля в зазоре, если напряженность магнитного поля в сердечнике составляет 5 кА/м. Чему равна магнитная энергия в зазоре? При расчете рассеянием поля у краев зазора пренебречь.

2.2.69. Для магнита из феррита бария, имеющего коэрцитивную силу H_{c1}=240 кА/м и остаточную индукцию B_{r1}=0.35 Тл, получен наибольший запас магнитной энергии W_{max}=10 кДж/м^3. Чему равен наибольший запас магнитной энергии W_{max2} для магнита из материала на основе редкоземельных металлов состава $Sm_{0.5}Pr_{0.5}Co_{0.5}$, для кото-

рого H_{c2}=700 кА/м и B_{r2}=0.93 Тл, если коэффициенты выпуклости кривых размагничивания этих двух магнитов считать одинаковыми?

2.2.70. Какие требования предъявляется к значениям остаточной индукции и коэрцитивной силе материалов, применяемых в устройствах магнитной записи в качестве носителей информации?

2.2.71. Объясните, почему полюсные наконечники сердечников электромагнитов и постоянных магнитов изготавливают в форме усеченного конуса?

2.2.72. Катушка индуктивности выполнена в виде плоской спирали, образованной нанесенной на поверхность диэлектрической подложки металлической пленкой. Как изменится добротность Q такой катушки, если ширину витка спирали увеличить в два раза при том же числе витков? Как изменятся индуктивность L и добротность катушки, если плоскую спираль нанести на поверхность ферритовой пластины?

2.2.73. Вычислите намагниченность насыщения смешанного феррита составом $Y_3Fe_{4.5}Ga_{0.5}O_{12}$ вблизи абсолютного нуля, если известно, что галлий занимает в кристаллической решетке тетраэдрические кислородные междоузлия. Как изменится температура Кюри при добавлении галлия к иттриевому феррогранату?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Холомина Т.А., Зубков М.В. Свойства и применение металлов и сплавов: учеб. пособие. – Рязань: РГРТУ, 2014. – 84 с.

2. Материаловедение: учеб. пособие/ С.П.Вихров Т.А.Холомина; под ред. Ю.М.Солдака. – Рязань: РГРТУ, 2006. – 160 с.

3. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2004. – 519 с.

4. Вихров С.П., Холомина Т.А., Бегун П.И., Афонин П.Н. Биомедицинское материаловедение. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2006.- 383 с.

5.Антонов Б.Л., Сорокин В.С.,Терехов В.А.Материалы электронной техники. Задачи и вопросы – М.: Высшая школа, 1990. – 208 с.

6. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев В.М. Электротехнические материалы – Изд. 7-е – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

7. Покровский Ф.Н. Материалы и компоненты радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 350 с.

8.Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения: пер. с англ. К.М. Зотовой, Д.О.Чаркина; под ред. В.П.Зломанова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 400 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ …… . 3
1.1. Классификация диэлектриков …… ……. ….. 3
1.2.Электропроводность диэлектриков …… …… 3
Задачи …… ……... 7
1.3. Поляризация диэлектриков…… 10
Задачи ……... 15
1.4. Диэлектрические потери…… 18
Задачи …….. 21
1.5. Пробой диэлектриков…… 24
Задачи…….. 28
2. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ …….. 31
2.1.Классификация магнитных материалов…….. 31
2.2. Потери в магнитных материалах…… 39
Задачи……..... 39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ……... 47

Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

З у б к о в Михаил Владимирович

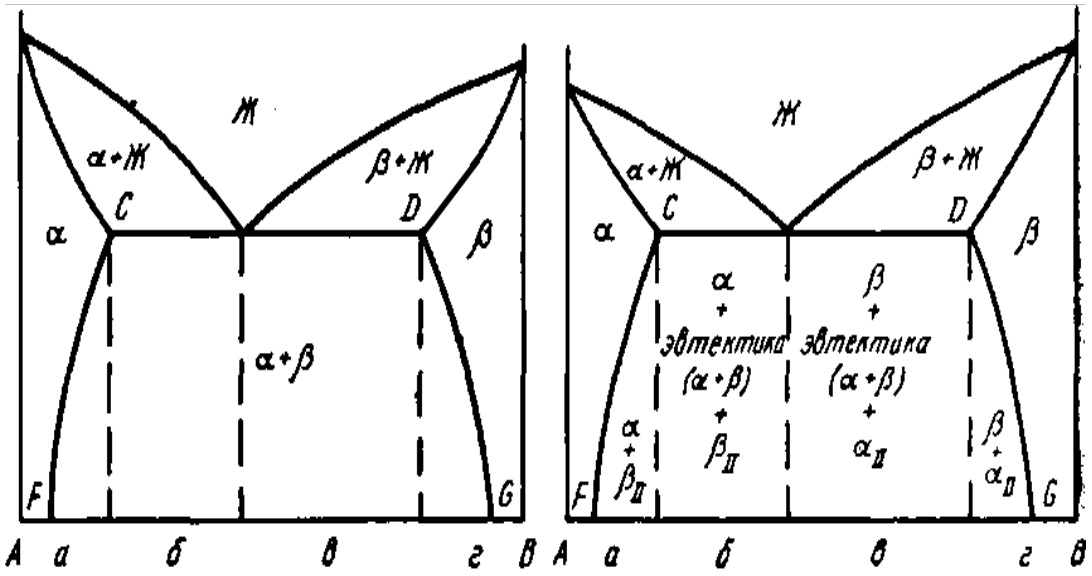
Свойства и применение диэлектриков и магнитных материалов

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В. Макушина
Подписано в печать . Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл печ. л. 3,0.
Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Т.А.ХОЛОМИНА, М.В.ЗУБКОВ

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ



Рязань 2014

Министерство образования и науки Российской Федерации
Рязанский государственный радиотехнический университет

Т.А.ХОЛОМИНА, М.В.ЗУБКОВ

СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Учебное пособие

Рязань 2014

УДК 621.38+615.83

Свойства и применение металлов и сплавов: учеб. пособие/ Т.А. Холомина, М.В.Зубков; Рязан. гос. радиотехн. университет. - Рязань, 2014. - 84 с.

В краткой и доступной форме излагается учебный материал, предусмотренный действующими образовательными стандартами. Содержатся краткие теоретические сведения, методические рекомендации, а также задачи по каждому разделу. Рассмотрены особенности основных типов диаграмм состояния сплавов. Особое внимание уделено анализу диаграммы состояния системы железо - углерод, а также влиянию термической и химико-термической обработки на свойства сталей. Проанализированы свойства, классификация и маркировка сталей и чугунов, а также их применение в технике.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 080200.62, 210400.62 заочной и очной форм обучения, а также направлениям 140400.62, 210601.65, 210100.62, 201000.62, 201000.62, 200100.62 дневного отделения при проведении практических занятий и для самостоятельной работы.

Ил. 8. Библиогр.: 8 назв.

Металлы, сплавы, диаграмма состояния сплава, маркировка, электрические свойства, практическое применение

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра теоретических основ электротехники (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. О.Н.Крютченко)

© Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Совершенствование учебного процесса подготовки инженерных кадров должно сопровождаться повышением роли самостоятельной работы студентов в процессе обучения. Как показывает опыт преподавания, успешное выполнение студентами поставленных перед ними учебных целей достигается в случае, если при аудиторном или самостоятельном изучении теоретического материала студенты одновременно осваивают серию контрольных вопросов и задач, касающихся материала конкретной темы.

Основная цель таких задач заключается в том, чтобы сделать самостоятельное изучение учебной информации более конкретным и целенаправленным; ориентировать на усвоение важнейших положений изучаемой темы, что в ряде случаев трудно выполнить студенту самостоятельно, особенно при большом объеме теоретического материала.

Авторы полагают, что решение задач параллельно с изучением теоретического материала должно содействовать приобретению требуемых знаний при оптимальном расходе времени студента за счет улучшения организации самостоятельной работы. Некоторые задачи снабжены методическими указаниями к решению.

Цель настоящего учебного пособия - формирование у обучающихся систематических знаний о свойствах и особенностях применения материалов, используемых в приборостроении, медицине и электронной технике, подготовка студента к решению типовых задач, связанных с проектной, научно-исследовательской и производственно-технологической деятельностью.

При составлении задач, а также последовательности изложения материала в настоящем учебном пособии авторы учитывали необходимость поэтапного формирования у студентов навыков и компетенций, предусмотренных государственными стандартами.

Учебное пособие посвящено изучению практического использования материалов в приборостроении и электронной технике, которое определяется их свойствами, зависящими от состава, структуры и воздействия внешних факторов.

Учебное пособие рекомендуется для проведения аудиторных практических занятий и самостоятельной работы студентов.

1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

1.1. Диаграммы состояния сплавов

Металлы и сплавы относятся к наиболее широко применяемым в технике материалам. Диаграммы состояния сплавов показывают фазовый состав сплава данных компонентов при любой концентрации и при любой температуре. Диаграммы строят при медленном охлаждении, поэтому структуры на диаграмме соответствуют равновесному состоянию. Критические точки сплавов - это температуры фазовых превращений.

В зависимости от характера строения двухкомпонентных сплавов (в жидком состоянии оба компонента неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный жидкий раствор) различают следующие основные типы диаграмм состояния:

1) при образовании компонентами механической смеси;

2) при неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

3) при ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

4) при образовании компонентами химического соединения.

Диаграммы состояния реальных сплавов могут содержать элементы диаграмм состояния разных типов [1-5].

Образование сплавов происходит из компонентов, кристаллизующихся в твердом состоянии в **механическую смесь,** когда

элементы обладают ограниченной растворимостью, а также из компонентов, не участвующих в образовании сплава - химического соединения. Механические смеси, таким образом, могут состоять из кристаллов чистых компонентов, твердых растворов и химических соединений. При образовании механической смеси кристаллические решетки отдельных фаз не меняются.

При изучении диаграмм состояния сплавов, компоненты которых в твердом состоянии не растворяются друг в друге (например, свинец—сурьма, олово—цинк), необходимо четко представлять, что такое **эвтектика.** Эвтектический сплав образуется в результате того, что компоненты друг в друге не растворяются, и представляет собой очень тонкую механическую смесь двух фаз. Так как обе фазы кристаллизуются одновременно при одной и той же температуре, то отдельные кристаллы обеих фаз не успевают вырасти до значительных размеров и образуют настолько мелкую механическую смесь, что практически их нельзя разделить. Поэтому эвтектика обладает специфическими, только ей присущими свойствами, которые резко отличаются от свойств входящих в нее компонентов. Необходимо обратить внимание на то, что температура окончательного затвердевания сплавов, образующих эвтектику, от состава сплава не зависит, и на диаграмме образование эвтектики характеризуется горизонтальной линией, при этом состав жидкого сплава при температуре окончательного затвердевания всегда одинаковый, значит, и состав эвтектики во всех сплавах один и тот же, количество же эвтектики в разных сплавах разное. Сплавы, состав которых соответствует минимальной температуре кристаллизации (плавления), называются эвтектическими. Сплавы, состав которых соответствует концентрациям компонентов до эвтектического и после

эвтектического состояния, называются соответственно до- и заэвтектическими. [1-3].

Сплавы – **твердые растворы** могут обладать как ограниченной, так и неограниченной растворимостью компонентов. Существуют сплавы – твердые растворы, создаваемые замещением компонентов или внедрением одного из компонентов в кристаллическую решетку другого [1-3].

Особенности диаграмм состояния сплавов с неограниченной и ограниченной растворимостью компонентов подробно рассмотрены в [1,2].

Твердые растворы — это сложные, но однородные вещества, поэтому под микроскопом твердые растворы, подобно чистому металлу, представляют собой однородные кристаллические зерна. В сплавах, образующих твердые растворы, в отличие от сплавов с эвтектикой, температуры и начала, и конца затвердевания зависят от состава, и все сплавы затвердевают в определенном интервале температур. Если вещества обладают неограниченной растворимостью, то ни в одном сплаве не будет кристаллов свободных компонентов, т.е. все сплавы данной системы однофазны и представляют собой однородный твердый раствор .

Подавляющее большинство сплавов обладают ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии, причем предел растворимости уменьшается с уменьшением температуры (например, сплавы свинец—олово, медь—серебро, алюминий—$CuAl_2$). В этих случаях эвтектика появляется только в тех сплавах, в которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости.

В сплавах, у которых концентрация растворимого компонента меньше предела растворимости, после окончательного затвердевания структура представляет собой однородный твердый

раствор. Уже в твердом состоянии в связи с уменьшением предела растворимости при понижении температуры из твердого раствора начинает выделяться вторая фаза. Например, в сплавах свинец—олово, содержащих менее 19,5 % олова, в сплавах медь—серебро, содержащих менее 7 % серебра, и в сплавах алюминий—$CuA1_2$, содержащих менее 5,67 % меди, при охлаждении ниже кривой растворимости начинает образовываться вторая фаза, и при комнатной температуре сплавы получаются двухфазными.

Отметим, что процессы кристаллизации из одного твердого состояния в другое происходят по тем же законам, что и из жидкого, т.е. путем зарождения центров кристаллизации и последующего их роста, поэтому для образования второй фазы охлаждение должно быть медленным. Следует иметь в виду, что продукты вторичной кристаллизации всегда мельче, чем первичной. Важно помнить, что у сплавов, у которых есть превращения в твердом состоянии, можно менять структуру, а значит, и свойства путем нагрева и охлаждения с различной скоростью, т.е. путем термической обработки.

Диаграммы состояния сплавов, образующих устойчивое **химическое соединение** (магний—кальций, цинк—магний), можно рассматривать как состоящие из двух самостоятельных диаграмм, у которых вторым компонентом является химическое соединение [1-4].

Элементы сплавов, образующие химические соединения, обычно резко отличаются по размерам атомов, строению электронных оболочек и параметрам кристаллических решеток. К образованию химических соединений склонны элементы, далеко расположенные друг от друга в периодической таблице Д.И. Менделеева.

В отличие от обычных химических соединений многие металлические соединения имеют переменный состав, который может

изменяться в широких пределах. Получение химического соединения A_mB_n с образованием однородного кристаллического вещества возможно только при строго определенных соотношениях концентраций компонентов. При этом образуется кристаллическая решетка, не похожая на решетки сплавляемых компонентов. Примером может служить сплав Cu–Mg при содержании 17 % Mg. Свойства сплава – химического соединения резко отличаются от свойств элементов, образующих его.

Сплавы – химические соединения не всегда встречаются в чистом виде. Например, при избытке растворимого компонента возможно образование химического соединения в комбинации с твердым раствором.

Физические, механические и технологические свойства сплава зависят от его структуры. Зависимость между типом диаграммы состояния сплава и его свойствами установили Н.С.Курнаков и А.А.Бочвар. Диаграммы состав—свойства для сплавов разных типов приведены в [1-4].

Задачи

1.1.1. Каковы основные области применения металлов и сплавов в приборостроении?

Ответ: 1) изоляция компонентов; 2) создание электронно-дырочных переходов; 3) изготовление деталей, конструкций, машин; коммутация, контактирование, создание резистивных элементов.

1.1.2. Каковы основные отличия проводниковых материалов от непроводниковых?

Ответ: 1) наличие электропроводности при температуре абсолютного нуля и увеличение удельного сопротивления с ростом температуры;
2) низкие плотность и температура плавления; 3) возможность применения в качестве изолятора.

1.1.3. При увеличении частоты внешнего электрического поля как изменяются свойства материалов ?

Ответ: 1) не изменяются; 2) изменяются в сторону усиления проводящих свойств; 3) изменяются в сторону усиления диэлектрических свойств.

1.1.4. Какая структура наиболее характерна для металлов и сплавов?

Ответ: 1) стеклообразная; 2) стеклокристаллическая;
3) поликристаллическая; 4) монокристаллическая.

1.1.5. Какой тип химической связи характерен для металлов?

Ответ: 1) ковалентная; 2) металлическая; 3) ионная.

1.1.6. Какие типы пространственных кристаллических решеток наиболее характерны для металлов и сплавов?

Ответ: 1) тригональная, тетрагональная, ромбическая;
2) объемноцентрированная кубическая, гранецентрированная кубическая и гексагональная плотноупакованная; 3) гранецентрированная тетрагональная, триклинная и моноклинная.

1.1.7. Чем обусловлен горизонтальный участок на кривых охлаждения металлов и сплавов?

Ответ: 1) неравномерным изменением температуры; 2) выпадением осадка в химической реакции; 3) равенством теплоты, отводимой в окружающую среду, выделяющейся при скрытой теплоте кристаллизации.

1.1.8. Что такое критическая точка на кривых охлаждения или нагревания металлов и сплавов?

Ответ: 1) минимальная точка кривой; 2) температура, соответствующая каким-либо фазовым превращениям; 3) температура, максимально допустимая для данного материала.

1.1.9. Какой физический процесс является основой процесса получения сплава?

Ответ: 1) дробление и спекание компонентов; 2) измельчение и растворение; 3) взаимная диффузия компонентов после расплавления.

1.1.10. На какие группы сплавы подразделяются по составу?

Ответ: 1) механическая смесь, твердый раствор, химическое соединение компонентов; 2) однородные и неоднородные; 3) простые и сложные.

1.1.11. По каким признакам легированный металл отличается от сплава?

Ответ: 1) легированный металл обладает более высокими твердостью и ударной прочностью; 2) в легированном металле сохраняется исходный тип кристаллической решетки; 3) легированный металл обладает более высокими пластичностью и температурой плавления.

1.1.12.Многие элементы при различных температурах имеют различное кристаллическое строение. Как называют это явление?

Ответ: 1) политипия; 2) полиморфизм; 3) изоморфизм.

1.1.13. Что происходит при перекристаллизации металлов в твердом состоянии?

Ответ: 1) образование центров новых кристаллов; 2) рост новых кристаллов за счет ранее существовавших; 3) образование новой кристаллической структуры.

1.1.14. Какой системой с точки зрения количества фаз является поликристаллическое железо?

Ответ: 1) однофазной; 2) многофазной.

1.1.15. Какие основные фазы могут иметься в сплавах?

Ответ: 1) жидкая и твердая фазы; 2) твердые растворы и кристаллы почти чистых компонентов; 3) химические соединения.

1.1.16. Какой процесс называется термическим анализом?

Ответ: 1) изучение строения и химических свойств металла или сплава; 2) построение кривых охлаждения (нагревания) на основе экспериментальных данных; 3) изучение температурной зависимости удельного электрического сопротивления металла или сплава.

1.1.17. Что такое диаграмма состояния сплава?

Ответ: 1) графическое изображение зависимости предела прочности сплава при растяжении от его состава и температуры окружающей среды в условиях равновесия; 2) графическое изображение фазового состояния сплава и критических точек в зависимости от температуры и концентрации компонентов в условиях равновесия; 3) графическое изображение агрегатного состояния сплава и его механических или электрических свойств в зависимости от температуры и концентрации компонентов в условиях равновесия.

1.1.18. Какие условия при проведении термического анализа считаются равновесными?

Ответ: 1) такие, при которых процессы, протекающие в системе, являются обратимыми; 2) такие, при которых обеспечивается минимально возможная температура; 3) такие, при которых обеспечивается максимальная скорость процессов.

1.1.19. В какой системе координат изображают диаграмму состояния сплава?

Ответ: 1) скорость нагревания – концентрация компонентов;
2) температура – концентрация компонентов; 3) удельное сопротивление сплава – температура.

1.1.20. Что такое линия ликвидуса?

Ответ: 1) граница зерна поликристаллического материала; 2) линия на диаграмме состояния сплава, ниже которой сплав находится в твердом состоянии; 3) линия на диаграмме состояния сплава, выше которой сплав находится в жидком состоянии.

1.1.21. Что такое линия солидуса?

Ответ: 1) линия на диаграмме состояния сплава, ниже которой сплав находится в твердом состоянии; 2) линия на диаграмме состояния сплава, выше которой сплав находится в жидком состоянии; 3) граница раздела фаз в неоднородном материале.

1.1.22. Какие свойства характерны для эвтектического сплава?

Ответ: 1) мелкодисперсная структура; 2) крупнодисперсная структура; 3) температура плавления, более низкая, чем у исходных компонентов и сплавов этих же элементов любого другого состава.

1.1.23. Какие сплавы называются заэвтектическими?

Ответ: 1) составы которых расположены на диаграмме состояния сплава слева от эвтектики; 2) составы которых расположены на диаграмме состояния сплава справа от эвтектики; 3) совпадающие по составу с концентрацией компонентов сплава, соответствующей эвтектоидному состоянию.

1.1.24. Что такое твердая эвтектика?

Ответ: 1) расплавленное состояние материала; 2) механическая смесь кристаллов двух или более твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из жидкого сплава при температуре ниже температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей;

3) сплав типа «твердый раствор замещения», состоящий из двух или более твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из жидкого сплава при температуре выше температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей.

1.1.27. Что такое эвтектоид?

Ответ: 1) сплав типа «твердый раствор замещения», состоящий из двух или более твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из жидкого сплава при температуре выше температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей; 2) механическая смесь компонентов сплава, содержащая значительную концентрацию их

химического соединения; 3) сплав типа «механическая смесь компонентов», состоящий из двух или более твердых веществ, одновременно закристаллизовавшихся из твердой фазы при температуре ниже температуры плавления отдельных компонентов или любых других их смесей.

1.1.28. Существуют ли среди сплавов с неограниченной растворимостью компонентов эвтектические?

Ответ: 1) нет, ни при каких условиях; 2) да, при определенной температуре; 3) да, при определенных концентрациях компонентов.

1.1.29. Какие фазы содержит сплав с ограниченной растворимостью компонентов А и В в твердом состоянии (по диаграмме состояния)?

Ответ: 1) жидкий сплав и химическое соединение компонентов;
2) жидкий сплав, твердый раствор компонента А в компоненте В и твердый раствор компонента В в компоненте А; 3) жидкий сплав, эвтектику и эвтектоид.

1.1.30. Какие фазовые состояния сплава типа «механическая смесь компонентов» иллюстрирует диаграмма состояния?

Ответ: 1) жидкий сплав, твердые растворы компонентов;
2) жидкий сплав, смесь исходных компонентов; 3) жидкий сплав, химическое соединение компонентов.

1.1.31.В чем сущность процесса модифицирования?

Ответ: модифицирование есть искусственное 1) изменение условий кристаллизации; 2) увеличение числа центров кристаллизации введением в расплав затравок; 3) ускорение процесса кристаллизации.

1.1.32.Объясните значение всех критических точек и линий на диаграмме состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии.

1.1.34.Почему в качестве конструкционных материалов наибольшее применение нашли сплавы, у которых есть фазовые превращения в твердом состоянии?

1.2. Сплав железо - углерод

Углерод — элемент, содержание которого определяет структуру и свойства так называемых «черных» сплавов - сталей и чугунов. Известно, что объем производства таких сплавов составляет 95 % мирового выпуска металлопродукции [1-5].

Детальный разбор диаграммы состояния железо - углерод, точнее железо - цементит (Fe – Fe_3C) приведен в [1,2]. Необходимо обратить внимание на то, чем характерны все критические точки и линии диаграммы состояния, приведенной на рис.1.1, соответствующие им температуры и концентрация углерода.

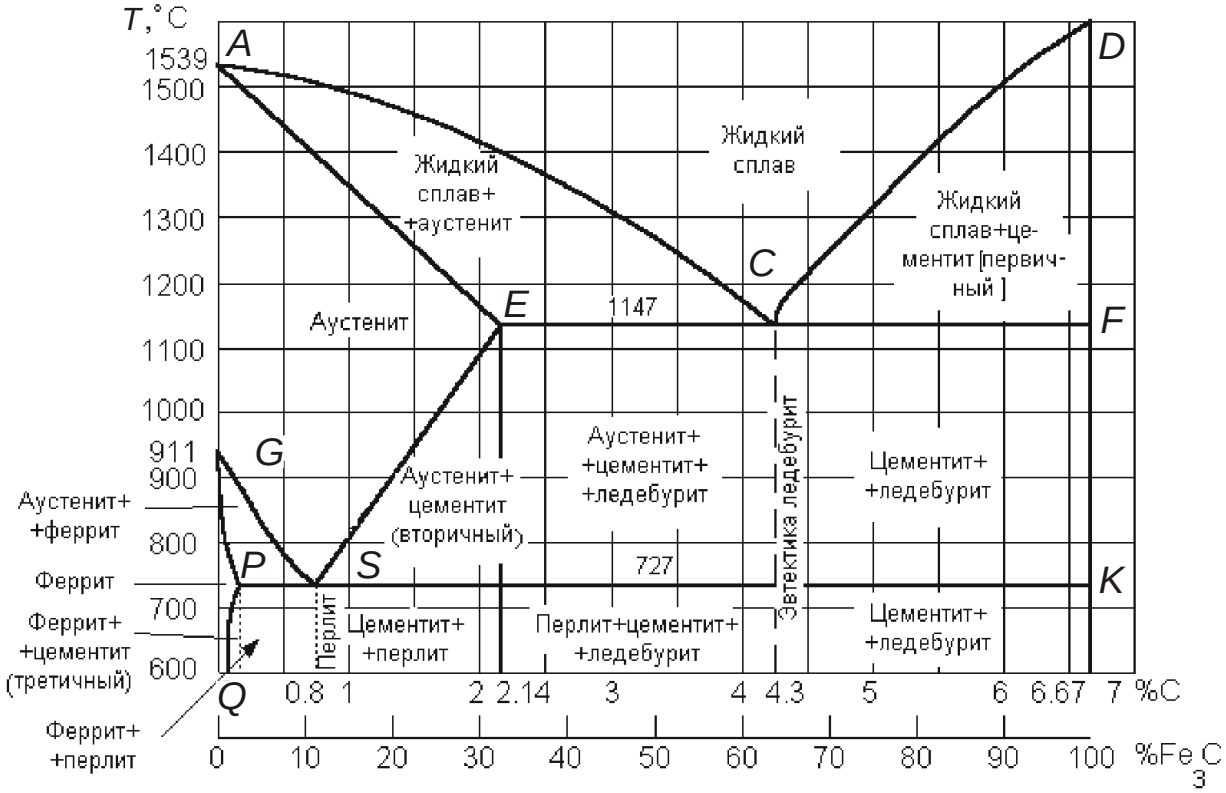


Рис. 1.1. Диаграмма состояния Fe – Fe_3C (в упрощенном виде)

Отметим некоторые особенности. В результате вторичной кристаллизации по линии GS при охлаждении начинается превращение аустенита в феррит вследствие аллотропического превращения γ-железа в α-железо. Так как в феррите максимально растворяется 0,025 % углерода (точка Р), то в аустените количество углерода все время увеличивается и при температуре 1147 °С достигает 2,14 %. Каждая точка линии GS показывает содержание углерода в аустените при данной температуре. Критические точки, образующие линию GS, принято обозначать при нагреве Ac_3, а при охлаждении—Ar_3. По линии ES при охлаждении из аустенита начинает выделяться вторичный цементит вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените при понижении температуры. Цементит содержит 6,67 % углерода, поэтому в остающемся аустените количество углерода уменьшается. Каждая точка линии ES показывает содержание углерода в аустените при данной температуре.

Критические точки, образующие линию ES, принято обозначать Ac_m. По линии PSK происходит окончательный распад аустенита на перлит во всех сплавах системы. Из аустенита образуется мелкая механическая смесь — эвтектоид, так как в равновесном состоянии γ -железо при температуре ниже 727 °С существовать не может, а α -железо практически углерод не растворяет (точка Р).

При температуре 727 °С во всех сплавах в аустените содержится около 0,8 % С (точка S, куда сходятся линии GS и ES), значит, состав перлита также постоянен и содержит 0,8 % углерода. Критические точки, образующие линию PSK при нагреве обозначают Ac_1, а при охлаждении Ar_1

Отметим, что температура, при которой из аустенита начинает выделяться феррит или цементит (линии GS и ES), зависит от состава

сплава, а превращение аустенита в перлит происходит во всех сплавах при одной и той же температуре (727 °С).

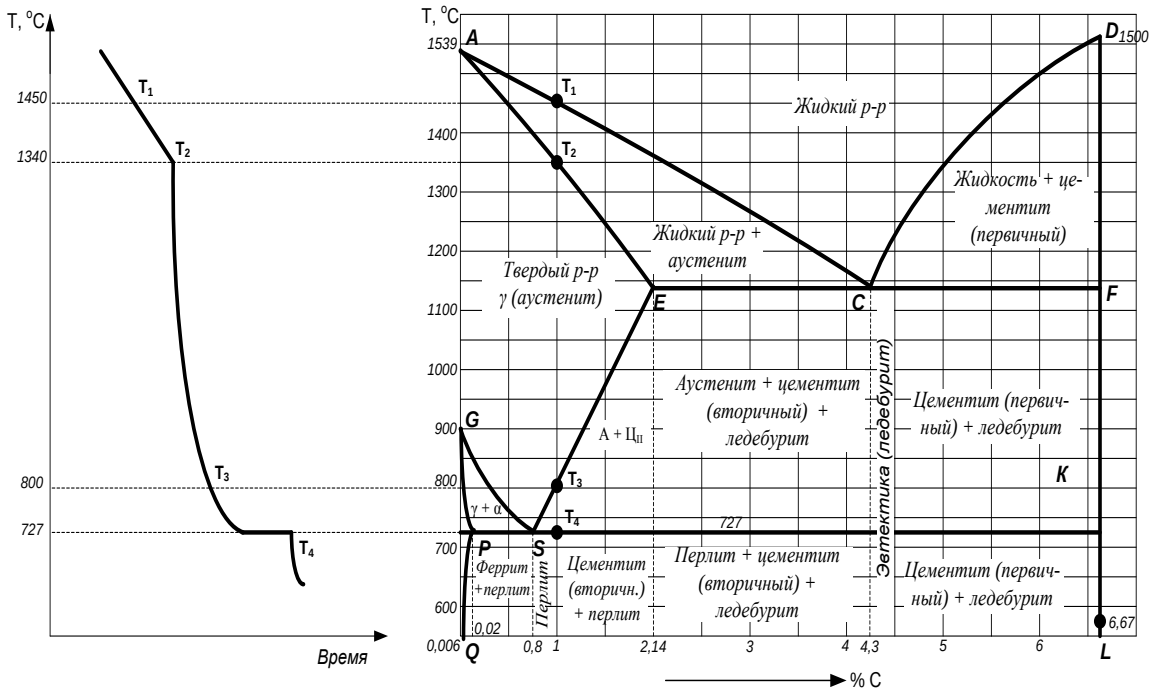
Необходимо отметить, что в простых углеродистых сплавах в равновесном состоянии при температуре ниже 727 °С аустенит существовать не может, он превращается в перлит (эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного). Равновесные структуры железоуглеродистых сплавов: аустенит, феррит, перлит, цементит, ледебурит[1-5].

Существенна разница между эвтектикой и эвтектоидом: и то и другое представляют собой сплав — мелкую механическую смесь, но эвтектика — продукт первичной кристаллизации, она получается при одновременной кристаллизации двух или нескольких фаз из жидкого раствора, а эвтектоид — продукт вторичной кристаллизации, он образуется при распаде сплава— твердого раствора, т.е. в результате перекристаллизации из одного твердого состояния в другое. И эвтектика, и эвтектоид образуются в том случае, если вещества друг в друге не растворяются в твердом состоянии.

Эвтектика — ледебурит является характерным признаком белых чугунов [1-3]. Содержание углерода может быть одинаковым и у белых и у серых чугунов; отличаются они состоянием углерода. В серых чугунах углерод имеет форму пластинок. Металлическая основа может быть перлитной или ферритной.

При ответе на вопрос о превращениях в стали, например содержащей 1 % углерода, происходящих при медленном охлаждении от 1600 до 20°С, следует провести вертикаль на диаграмме состояния, отвечающую заданному сплаву. Рядом с диаграммой необходимо вычертить кривую охлаждения данного сплава, указать на ней температуры, соответствующие каждой критической точке. Далее следует описать структурные превращения в каждой критической точке, происходящие в сплаве заданного состава.

Таким образом, при охлаждении сплава до температуры T_1=1450 °С (рис.1.2) идет охлаждение жидкого раствора. Из жидкого раствора выделяются кристаллы аустенита - твердого раствора углерода в γ-железе. В интервале между температурами T_1=1450 и T_2=1340 ° С количество кристаллов аустенита увеличивается, а количество жидкой фазы уменьшается. В точке T_2=1340 °С происходит окончательное затвердевание аустенита. В интервале температур между температурами точками T_2=1340 °С и T_3=800 °С никаких превращений не происходит, идет охлаждение аустенита. В точке T_3=800 °С начинается вторичная кристаллизация: из аустенита начинает выделяться вторичный цементит, так как растворимость углерода в железе с уменьшением температуры уменьшается.



а б

Рис.1.2. Кривая охлаждения (а) и иллюстрация на диаграмме состояния изменений фазового состояния стали, содержащей 1% углерода, происходящих при медленном охлаждении от 1600 до 20°С (б)

Цементит — это химическое соединение железа с углеродом — карбид железа (Fe_3C). При дальнейшем понижении температуры количество цементита увеличивается. Поскольку цементит содержит 6,67 % углерода, в остающемся аустените количество углерода уменьшается в соответствии с точками линии ES. В точке T = 727 °C оставшийся аустенит, содержащий 0,8 % углерода (точка S), окончательно распадается на перлит. Перлит — это эвтектоид (сплав в виде мелкой механической смеси феррита и цементита вторичного). Окончательная структура сплава - перлит и цементит вторичный.

Задачи

1.2.1. Какие фазы входят в структуры сплавов железа с углеродом в соответствии с диаграммой состояния (рис. 1.1) при нормальной температуре?

Ответ: 1) феррит, аустенит, перлит, ледебурит, цементит; 2) феррит, перлит, ледебурит; 3) феррит, перлит, ледебурит,чв цементит;
4) феррит, перлит; 5) феррит, цементит.

1.2.2. Какой сплав называется ферритом?

Ответ: 1) твердый раствор замещения углерода и других элементов в α –железе с неограниченной растворимостью компонентов;
2) твердый раствор внедрения углерода и других элементов в α–железе;
3) сплав - химическое соединение железа с углеродом.

1.2.3. Какой сплав называется аустенитом?

Ответ: 1) твердый раствор внедрения углерода и других элементов в γ-железе; 2) твердый раствор внедрения углерода и других элементов в α–железе; 3) сплав - химическое соединение железа с углеродом.

1.2.4. Какой сплав называется цементитом?

Ответ: 1) сплав - химическое соединение железа с углеродом;
2) твердый раствор замещения железа с углеродом; 3) твердый раствор внедрения углерода и других элементов в γ-железе.

1.2.5. По диаграмме Fe—Fe_3C определите максимальное содержание углерода в аустените при 800 °С.

Ответ: 1) 1 %; 2) 1,5 %; 3) 0,8 %.

1.2.6.При исследовании структуры стали установлено, что в ней содержится примерно 30 % перлита. Каков состав этой стали по углероду?

Ответ: 1) 0,3%; 2) 30%; 3) 0,25%.

1.2.7. Какая группа материалов называется сталями?

Ответ: 1) сплавы железо – углерод, содержащие вредные примеси, технологические добавки с содержанием углерода менее 2,14 % , в которых при кристаллизации образуется аустенит; 2) сплавы железо – углерод, содержащие легирующие элементы, с содержанием более 2,14 % углерода, в которых при кристаллизации образуется троостит;
3) сплавы железо – углерод, содержащие технологические добавки, с содержанием 0,8 % углерода, в которых при кристаллизации образуется ледебурит.

1.2.8. Какие стали называются доэвтектоидными?

Ответ: 1) стали, содержащие более 0,8% углерода, – аустенит + перлит; 2) стали, содержащие менее 0,8% углерода, – феррит + перлит;
3) стали, содержащие 0,8 % углерода, – феррит + перлит.

1.2.9. Какие стали называются эвтектоидными?

Ответ: 1) стали, содержащие более 0,8 % углерода, – аустенит + перлит; 2) стали, содержащие 0,8 % углерода, –перлит; 3) стали, содержащие менее 0,8 % углерода, – феррит + перлит.

1.2.10. Из каких компонентов состоит структура заэвтектоидной стали?

Ответ: 1) из перлита; 2) из перлита и цементита; 3) из цементита и феррита; 4) из цементита.

1.2.11. Какие фазы входят в структуру доэвтектоидной стали при температуре 20° С?

Ответ: 1) перлит; 2) перлит + феррит; 3) феррит + аустенит;
4) феррит + цементит.

1.2.12. Из каких фаз состоит перлит?

Ответ: 1) аустенит+ цементит 2) феррит + аустенит; 3) феррит + цементит.

1.2.13. При какой концентрации углерода находится условная граница между сталями и чугунами?

Ответ: 1) 0,8 % ; 2) 2,14 % ; 3) 4,3 % ;4) 6,67 % С.

1.2.14. Какая группа материалов называется чугунами?

Ответ: 1) сплавы железо – углерод с содержанием более 2,14 % углерода, в которых при кристаллизации образуется ледебурит;
2) сплавы железо – углерод с содержанием менее 2,14 % углерода, в которых при кристаллизации образуется троостит; 3) сплавы железо – углерод с содержанием 0,8 % углерода, в которых при кристаллизации образуется аустенит.

1.2.15. Какой характер превращений отражают линии EF и РК диаграммы Fe—Fe_3C (рис. 1.1)?

Ответ: 1) EF — эвтектическое, РК — перитектическое; 2) EF эвтектическое, РК — эвтектоидное; 3) EF — перитектическое, РК— эвтектоидное ; 4) EF — перитектическое, РК— эвтектическое.

1.2.16. Какие компоненты входят в структуру доэвтектического белого чугуна при нормальной температуре?

Ответ: 1) перлит + цементит; 2) перлит + феррит; 3) феррит + аустенит + ледебурит; 4) перлит + цементит + ледебурит.

1.2.17. Что отличает ледебурит при температурах выше и ниже 727 °С?

Ответ: 1) химический состав; 2) фазовый состав; 3) различия нет.

1.2.18. В соответствии с диаграммой Fe—Fe_3C (рис.1.1) эвтектика (ледебурит) образуется в структуре сплавов, содержащих углерода больше 2,14 %. Возможно ли на практике наличие ледебурита в

структуре сплавов с меньшим содержанием углерода? Если возможно, то при каких условиях и из-за какого эффекта?

Ответ: 1) невозможно; 2) возможно при очень медленном охлаждении сплавов с содержанием углерода, близким к 2 %;

3) возможно при быстром охлаждении сплавов с содержанием углерода, меньшим 2,14 % из-за большой склонности к ликвации железоуглеродистых сплавов.

1.2.19. Изобразите схему охлаждения сплава Fe—Fe_3C с 3 % С, отметив на ней структурные состояния сплава.

1.2.20. Из какой фазы и при каких температурных условиях образуется цементитная составляющая в структуре стали с 1 % углерода ?

1.3. Термическая и химико-термическая обработки стали

Современная техника предъявляет все возрастающие требования к механическим свойствам металлов, которые в значительной степени можно улучшить путем термической и химико-термической обработки. Увеличение прочности деталей во многих случаях позволяет уменьшить их габариты и массу, что дает экономию металла.

Любая ***термическая обработка*** состоит из нагрева до заданной температуры, выдержки и охлаждения с заданной скоростью, поэтому процесс термической обработки обычно выражают графически в координатах температура—время. В зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения различают следующие основные виды термической обработки: отжиг, нормализацию, закалку и отпуск. Цель и сущность, технология, а также особенности структуры и свойств, которые приобретает сталь в результате проведения каждого вида термической обработки, рассмотрены в [1-3].

При изучении процесса ***отжига*** необходимо различать, в каких случаях какой метод отжига наиболее целесообразно применять, каким сталям дают полный отжиг, а каким— неполный. Легированные стали и

крупные поковки требуют очень медленного охлаждения, поэтому применение для них изотермического отжига значительно увеличивает производительность.

Цель отжига — получение максимальной вязкости и пластичности, а так как у разных сталей время устойчивости аустенита разное, то и скорость охлаждения при отжиге для разных сталей должна различаться. Она зависит от устойчивости аустенита в области перлитного превращения.

При изучении процесса нормализации следует уяснить разницу между назначением отжига и нормализации, а также между условиями их проведения. При отжиге скорость охлаждения должна быть разной для разных сталей, так как в структуре необходимо наличие перлита. При нормализации же скорость охлаждения для всех сталей одна и та же — на воздухе. Поэтому после нормализации у разных сталей получается разная структура, она зависит от критической скорости закалки.

В углеродистой стали после нормализации структура практически получается такая же, как и после отжига, но более мелкая, поэтому прочность нормализованных сталей несколько выше, чем отожженных. В ряде случаев для углеродистой стали вместо отжига можно производить нормализацию.

Закалка является одним из наиболее важных видов термической обработки [1-5]. Температура нагрева при закалке выбирается в зависимости от содержания углерода в стали. Охлаждение аустенита с различной скоростью сопровождается образованием структур перлита, сорбита и троостита [1,2,5]. Это двухфазные структуры, представляющие собой ферритно-цементитную смесь различной степени дисперсности (размельченности); они имеют пластинчатое строение.

При большой скорости охлаждения диффузия углерода не успевает произойти, происходит только аллотропическое превращение железа, поэтому из аустенита получается однофазная структура — мартенсит,

который представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в γ-железе, он имеет игольчатое строение. Чем больше скорость охлаждения аустенита, тем более высокую твердость имеют получающиеся структуры.

Мартенситной точкой называется температура, при которой начинается превращение аустенита в мартенсит. В углеродистых сталях начало мартенситного превращения происходит около 200 °С. В отличие от перлитного мартенситное превращение никогда не идет до конца, поэтому в стали всегда остается определенное количество остаточного аустенита; на мартенситную точку скорость охлаждения не влияет, она практически зависит только от состава стали.

Критической скоростью закалки называется скорость охлаждения, обеспечивающая получение структуры – мартенсит или мартенсит и остаточный аустенит. *Прокаливаемостью* называется способность стали приобретать при закалке мартенситную структуру в слое той или иной глубины. Прокаливаемость зависит от состава стали, условий нагрева и охлаждения и других факторов, но в первую очередь определяется кинетикой превращений аустенита [1-3].

Критическая скорость закалки уменьшается (прокаливаемость увеличивается) с увеличением размера зерна аустенита. Поэтому повышение температуры нагрева под закалку и времени выдержки, приводящее к увеличению размера зерна аустенита, связано и с увеличением прокаливаемости. Введение примесей, препятствующих росту зерна аустенита, приводит к увеличению критической скорости закалки и уменьшению прокаливаемости.

Критическая скорость закалки имеет очень важное значение, она зависит от стабильности аустенита, которая, в свою очередь, определяется количеством растворенных в нем углерода и легирующих элементов. Критическая скорость закалки в сильной степени зависит от химического состава аустенита.

Критическая скорость закалки легированных сталей тем меньше, чем больше в них содержится легирующих элементов. Следовательно, чем выше степень легированности, тем более глубокой прокаливаемостью обладают эти стали.

Для доэвтектоидной стали всегда производят полную закалку, так как при неполной остается феррит, который создает в структуре включения пониженной твердости. Для заэвтектоидной стали можно провести неполную закалку, так как остающийся цементит твердости не снижает. Существенную роль при закалке играют охлаждающие среды (вода, 10%-е растворы NaCl, H_2SO_3, Na_2CO_3 в воде, машинное масло, трансформаторное масло, эмульсия масла в воде, мыльная вода, керосин, воздух).

Углеродистые стали, имеющие высокую критическую скорость закалки, охлаждают (закаливают) в воде, а легированные стали, имеющие более низкую критическую скорость закалки, охлаждают в масле, где охлаждение происходит медленнее. Недостатком масла как охлаждающей среды являются его легкая воспламеняемость и относительно высокая стоимость. С понижением температуры охлаждающей среды закалка стали становится более резкой.

Существуют следующие способы закалки: в одном охладителе; в двух средах; с подстуживанием (перед погружением в охладитель материал некоторое время выдерживают на воздухе); ступенчатая; изотермическая закалка и др.

Отметим, что при чрезмерном увеличении скорости охлаждения получаются большие внутренние напряжения, коробления и могут возникнуть трещины.

При ступенчатой и изотермической закалке температура горячей среды, в которой происходит выдержка, может быть одинаковой (вблизи мартенситной точки), но при ступенчатой закалке время выдержки должно быть меньше времени устойчивости аустенита

при данной температуре, что обеспечивает формирование окончательной структуры—мартенсита. При изотермической закалке время выдержки должно обеспечить полный распад аустенита на игольчатый троостит. Игольчатый троостит обладает значительно меньшей твердостью, чем мартенсит, поэтому изотермическую закалку нельзя применять для режущего инструмента, но она обеспечивает большую прочность при минимальных внутренних напряжениях, так как отсутствует мартенситное превращение. Ее наиболее целесообразно применять для тех деталей, которые работают с временными перегрузками и при работе которых отсутствует пластическая деформация, например для пружин [4-6].

В сталях, у которых мартенситная точка лежит ниже 0 °С, после закалки может появиться большое количество остаточного аустенита. Такие стали, например, легированные инструментальные или постоянные магниты, для уменьшения количества остаточного аустенита после закалки обрабатывают холодом, т.е. охлаждают ниже 0 °С [4].

В результате закалки в деталях всегда возникают внутренние напряжения в связи с резким охлаждением и фазовыми превращениями.

Для уменьшения напряжений, увеличения вязкости, иногда снижения твердости после закалки всегда следует отпуск — окончательная термическая обработка, которая определяет конечную структуру, а значит, свойства и качество деталей. После каждого вида отпуска деталей (низкого, среднего или высокого) формируется определенная структура [1-3]. Наилучшим сочетанием между прочностью и вязкостью обладает сорбит отпуска, поэтому термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска,

называется улучшением стали. Эту операцию применяют для среднеуглеродистых сталей (0,35 – 0,60 % С).

Например, если необходимо выбрать и обосновать режим термической обработки для резца из стали У10А, нужно учитывать следующие рекомендации.

Заготовка для резца подвергается предварительной термической обработке — отжигу на зернистый цементит для получения мягкой однородной структуры. Температура отжига 770—790 °С, охлаждение в печи. После окончательной механической обработки, кроме шлифования, резец подвергается закалке и низкому отпуску. Поскольку сталь У10А является заэвтектоидной, закалка производится неполная, температура нагрева 770—780 °С, время выдержки назначается в зависимости от сечения, обычно 1—2 ч. Средой охлаждения является вода, так как углеродистая сталь имеет большую критическую скорость закалки. Лучшие результаты дает закалка в двух средах: в воде, а затем в масле. Так как резец должен иметь высокую твердость, то он подвергается низкому отпуску при температуре 150—200 °С.

Детали, которые должны иметь твердость только на поверхности, подвергают поверхностной закалке, в результате чего увеличивается общая прочность деталей, так как увеличивается предел выносливости. Одним из распространенных методов является нагревание за счет теплового действия тока, индуцируемого в поверхностных слоях материала при помещении его в электромагнитное поле высокой частоты. Закалка токами высокой частоты (ТВЧ) обычно автоматизирована и позволяет получить наилучшие результаты. Поверхностная закалка газовым пламенем для крупных деталей в ряде случаев является единственным методом поверхностного упрочнения.

Существует ряд прогрессивных методов упрочнения деталей: термомеханическая, ультразвуковая, термомагнитная обработка. Высокотемпературной термомеханической обработке (ВТМО) можно подвергать любые стали, а низкотемпературной (НТМО)— только те, у которых переохлажденный аустенит обладает повышенной устойчивостью, т.е. легированные.

При ***химико-термической обработке*** стальных деталей имеют значение температура процесса, химический состав стали (особенно процентное содержание углерода), а также необходимость термической обработки до или после того или иного вида химико-термической обработки. Каждый вид химико-термической обработки имеет свою область применения, определенные достоинства и недостатки.

Газовая цементация является прогрессивным методом, который позволяет наиболее полно осуществить механизацию и автоматизацию процесса. Необходимая твердость поверхностного слоя после цементации достигается только при последующей закалке, сердцевина при этом остается вязкой, так как стали с малым содержанием углерода практически не закаливаются.

Достоинства азотирования состоят в том, что твердость не снижается при повторных нагревах до 500—600 °С и увеличивается коррозионная стойкость. Однако азотирование — процесс очень дорогой и непроизводительный, поэтому применять его следует только в тех случаях, когда никакая другая обработка не обеспечивает нужных свойств, например, для деталей, которые подвергаются истиранию и работают в условиях коррозии, или для деталей, которые истираются и во время работы могут периодически нагреваться до 500—600 °С. Обратим внимание, что не следует путать детали, которые периодически нагреваются во время работы, например штампы для горячей штамповки во время

соприкосновения с заготовкой, с деталями, которые постоянно нагреты во время работы, например лопатки газовых турбин.

При проведении цианирования свойства подвергающегося обработке слоя в значительной степени зависят от температуры, при которой происходит цианирование [1,2,4]. Температурный диапазон разделяется на области низко-, средне- и высокотемпературного цианирования. Высокотемпературное цианирование обычно производится в газовой среде. Этот процесс называется нитроцементацией.

Диффузионная металлизация может проводиться хромом, алюминием и другими элементами и принципиально отличается от метода нанесения гальванических покрытий как технологией, так и назначением.

Использование при термической и химико-термической обработке оборудования с автоматическим регулированием температуры и с контролируемой атмосферой в печи практически исключает такие виды брака, как перегрев, пережог, обезуглероживание и т.п. Качество деталей повышается при широком применении автоматизированных агрегатов для термической и химико-термической обработки, состоящих из печей непрерывного действия, соляных ванн, закалочного и другого оборудования, в которых непрерывно производятся все виды термической обработки стальных деталей.

Задачи

1.3.1. Какие технологические операции включает процесс термической обработки стали?

Ответ: 1) плавление и последующую кристаллизацию путем литья в форму; 2) нагрев до определенной температуры; выдержку в течение необходимого времени; охлаждение с заданной скоростью; 3) плавление;

выдержку в течение определенного времени в электромагнитном поле; охлаждение на воздухе.

1.3.2. Какова цель термической обработки стали?

Ответ: 1) улучшение внешнего вида детали или заготовки;
2) изменение удельного электрического сопротивления; 3) изменения физических, механических и других свойств сплава, обусловленные изменением его внутреннего строения.

1.3.3. Какие параметры характеризуют режим термообработки?

Ответ: 1) температура и скорость нагрева, время выдержки и скорость охлаждения; 2) температура нагрева, скорость охлаждения;
3) скорость нагрева, температура нагрева, длительность выдержки при температуре нагрева, скорость охлаждения; 4) степень перегрева.

1.3.4. Какая термическая обработка изделий применяется после предварительной холодной пластической деформации для устранения наклепа?

Ответ: 1) диффузионный отжиг; 2) рекристаллизационный отжиг;
3) отпуск.

1.3.5. Каковы основные виды термообработки стали?

Ответ: 1) закалка, охлаждение и отжиг; 2) отжиг 1-го и 2-го рода, нормализация, закалка и отпуск; 3) отжиг, нормализация и закалка.

1.3.6. От чего зависит температура превращения перлита в аустенит железо-углеродистых сплавов в реальных условиях нагрева?

Ответ: 1) от содержания углерода в стали; 2) от скорости нагрева;
3) от структуры стали; 4) от величины зерна стали.

1.3.7. Какие элементы уменьшают склонность к росту аустенитного зерна стали при нагреве?

Ответ: 1) Мп; 2) Si и Mn; 3) Ti, V; 4) W, Mo.

1.3.8. В чем проявляется основное влияние легирующих элементов на превращение аустенита?

Ответ: 1) ускоряют распад аустенита; 2) стабилизируют аустенит;

3) снижают критическую температуру закалки стали.

1.3.9. Температура нагрева эвтектоидной стали 750 °С, далее - охлаждение в воде. Какой это вид термообработки?

Ответ: 1) отжиг; 2) неполная закалка; 3) полная закалка; 4) отпуск.

1.3.10. Какой процесс термообработки стали называется отжигом?

Ответ: 1) процесс, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и быстрое охлаждение в воде, масле, керосине; 2) процесс, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и медленное охлаждение в печи; 3) процесс, включающий нагрев до определенной температуры, выдержку и охлаждение на воздухе.

1.3.11. Какова цель отжига как метода термической обработки стали?

Ответ: 1) улучшение внешнего вида детали или заготовки;

2) повышение твердости вследствие приобретения поликристаллическими зернами более крупных размеров и вытянутой формы; 3) повышение пластичности, обусловленное получением более равновесной структуры вследствие устранения внутренних напряжений и измельчения зерна.

1.3.12. Какова цель отжига 1-го рода как метода термической обработки стали?

Ответ: 1) подготовка стали к отжигу 2-го рода; 2) устранение неоднородностей физических свойств и химического состава сплава, созданных предшествующими обработками; 3) эвтектоидные фазовые изменения состава стали – перекристаллизация из одного твердого состояния сплава в другое.

1.3.13. Какова цель диффузионного отжига как метода термической обработки стали?

Ответ: 1) выравнивание химического состава и устранение дендритной структуры кристаллов сплава в деталях и заготовках из легированной стали; 2) введение дополнительного количества

легирующих примесных элементов методом диффузии; 3) повышение твердости вследствие фазовых переходов.

1.3.14. Для чего применяется рекристаллизационный отжиг?

Ответ: 1) для устранения внутренних напряжений; 2) для восстановления исходной структуры и свойств металла после холодной пластической деформации; 3) для проведения фазовых переходов.

1.3.15. Какие факторы влияют на размер зерна после рекристаллизационного отжига?

Ответ: 1) степень деформации; 2) температура рекристаллизационного отжига; 3) размер зерна перед деформацией; 4) длительность процесса отжига.

1.3.16. Укажите необходимое условие для того, чтобы сплав подвергнуть рекристаллизационному отжигу.

Ответ: 1) наличие у сплава фазовых превращений в твердом состоянии; 2) изменение растворимости компонентов сплава в твердом состоянии; 3) изменение растворимости компонентов сплава в твердом состоянии с изменением температуры; 4) наличие предварительной холодной пластической деформации сплава.

1.3.17. Какова цель рекристаллизационного отжига как метода термической обработки стали?

Ответ: 1) повышение твердости вследствие приобретения поликристаллическими зернами более крупных размеров и вытянутой формы; 2) устранение наклепа, возникающего вследствие холодной пластической деформации поверхностных слоев сплава после обработки давлением, получение исходной формы и размера зерна; 3) эвтектоидные фазовые изменения состава стали – перекристаллизация из одного твердого состояния сплава в другое.

1.3.18. Какова цель отжига 2-го рода как метода термической обработки стали?

Ответ: 1) повышение твердости стали вследствие приобретения поликристаллическими зернами более крупных размеров и вытянутой формы; 2) повышение пластичности стали вследствие фазовых превращений (перекристаллизации) и достижения равновесного состояния структуры сплава; 3) устранение возникших неблагоприятных последствий отжига 1-го рода.

1.3.19. Какова цель полного отжига стали?

Ответ: 1) повышение однородности структуры, физических и химических свойств; 2) повышение твердости и прочности сплава вследствие превращения мелкозернистой аустенитной структуры сплава в крупнозернистую ферритно-перлитную; 3) повышение вязкости и пластичности сплава вследствие превращения крупнозернистой ферритно-перлитной структуры в мелкозернистую аустенитную.

1.3.20. Каковы преимущества изотермического отжига стали по сравнению с полным?

Ответ: 1) преимуществ нет, полный отжиг обеспечивает получение лучших свойств стали; 2) изотермический отжиг позволяет снизить продолжительность процесса, получить однородный по структуре и свойствам материал; 3) изотермический отжиг позволяет, хотя и за более продолжительное время, получить более твердую и прочную сталь.

1.3.21. Какие явления в металле сопутствуют наклепу **?**

Ответ: 1) измельчение блоков и зерен; 2) движение и рост плотности дислокации; 3) возникновение напряжений второго и третьего рода; 4) упрочнение металла и понижение его пластичности; 5) образование текстуры.

1.3.22. Какие процессы происходят при нагреве наклепанного металла, когда температура нагрева выше температуры рекристаллизации?

Ответ: 1) возврат или отдых; 2) рекристаллизация;
3) рекристаллизация обработки, собирательная рекристаллизация;

4) восстановление исходных структур и свойств металла.

1.3.23. В чем состоит различие между полиморфизмом и рекристаллизацией?

Ответ: 1) в температуре протекания этих процессов; 2) в механизме образования новой кристаллической структуры; 3) в типах решетки, образующихся при этих процессах.

1.3.24. Каковы особенности нормализации как метода термической обработки стали?

Ответ: 1) процесс охлаждения проводится на воздухе, поэтому продолжительность термообработки меньше, чем при полном отжиге;
2) процесс охлаждения проводится в печи, поэтому продолжительность процесса термообработки больше, чем при закалке; 3) нормализация обеспечивает более высокую пластичность по сравнению со сталью, подвергнутой полному отжигу.

1.3.25. Какова цель нормализации?

Ответ: 1) устранение внутренних напряжений в стали, возникших в результате закалки; 2) исправление структуры перегретой стали, измельчение зерна, подготовка к закалке; 3) повышение прочности и твердости стали.

1.3.26. Отливки из малоуглеродистой стали в литом состоянии характеризуются наличием ликвации, что ухудшает механические свойства отливок. Каким способом можно существенно снизить эффект ликвации в отливках.

Ответ: подвергнуть отливки 1) полному отжигу; 2) отжигу;

3) рекристаллизационному отжигу; 4) диффузионному отжигу.

1.3.27. Рекомендуйте режим нормализации стали с 0,4 % С.

Ответ: 1) 700 ° С - охлаждение в печи; 2) 820 ° С - охлаждение на воздухе; 3) 900 ° С - охлаждение на воздухе.

1.3.28. Для каких сталей отжиг можно заменить более дешевой обработкой — нормализацией?

Ответ: 1) для малоуглеродистых; 2) для среднеуглеродистых; 3) для высокоуглеродистых.

1.3.29. Какова цель закалки стали?

Ответ: 1) повышение мягкости и пластичности стали; 2) измельчение зерна, устранение сетки вторичного цементита в заэвтектоидной стали; 3) повышение твердости и прочности стали.

1.3.30. Из каких основных операций состоит процесс закалки стали?

Ответ: 1) нагрев до температуры, применяемой при полном отжиге, выдержка в течение необходимого времени и охлаждение в печи;
2) нагрев до температуры, применяемой при изотермическом отжиге; выдержка в течение необходимого времени и охлаждение на воздухе;
3) нагрев до температуры, на 30-50 градусов превышающей линию температур аустенитного превращения; выдержка в течение необходимого времени и охлаждение с высокой скоростью в воде, масле или других охладителях.

1.3.31.Какие нежелательные свойства приобретает сталь после закалки?

Ответ: 1) повышенные вязкость и пластичность; 2) повышенную хрупкость вследствие внутренних механических напряжений; 3) наклеп поверхностных слоев.

1.3.32.Каково содержание углерода в мартенсите стали с 0,5 % углерода?

Ответ: 1) 0,2 %; 2) 0,5 %; 3) 0,3 %; 4) 0,8 %.

1.3.33. На рис. 1.3 представлены микроструктуры стали с содержанием С 0,45 % после закалки и отпуска при различных температурах Какие компоненты стали присутствуют при всех указанных режимах термообработки?

Ответ: 1) мартенсит; 2) мартенсит и троостит; 3) мартенсит и остаточный аустенит.

1.3.34. Какой сплав называется мартенситом?

Ответ: 1) твердый раствор углерода в γ-железе; 2) твердый раствор углерода в α-железе ; 3) пересыщенный твердый раствор углерода в α-железе.

1.3.35. Содержится ли в структуре закаленной доэвтектоидной стали с 0,5 % С остаточный аустенит? Почему?

Ответ: 1) содержится; 2) не содержится, так как критическая температура закалки этой стали выше 20 ° С.

1.3.36. На какие фазы разлагается мартенсит при отпуске?

Ответ: 1) на феррит; 2) на феррит и аустенит; 3) на цементит; 4) на феррит и цементит.

1.3.37. На рис.1.4 показана структура стали с содержанием углерода 1,2 % после полной закалки. Из чего состоит эта структура?

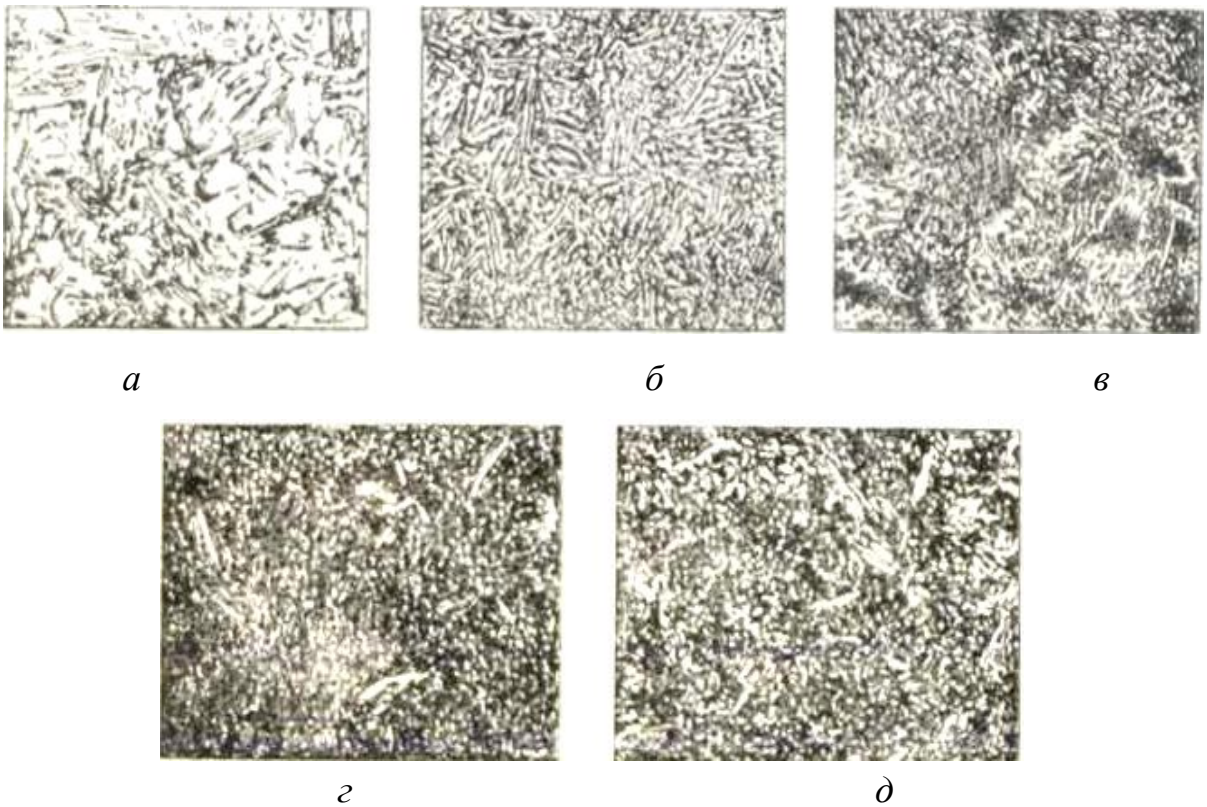


Рис. 1.3. К задаче 1.3.33. Микроструктуры стали с 0,45 % С после различных режимов термообработки:
а — закалка от 900 ° С в воде**;** *б* — закалка от 900 ° С в воде + нагрев 1 ч при 100 ° С; *в* —закалка от 900 ° С в воде + нагрев 1 ч при 200 ° С**;** *г* — закалка от 900 ° С в воде + нагрев 1 ч при 350 ° С*;* *д* — закалка от 900 ° С в воде + нагрев 1 ч при 350 ° С

Ответ: 1) из мартенсита; 2) из мартенсита и троостита; 3) из мартенсита и остаточного аустенита.

1.3.38. Какова структура стали с 1,1 % С после полной закалки?

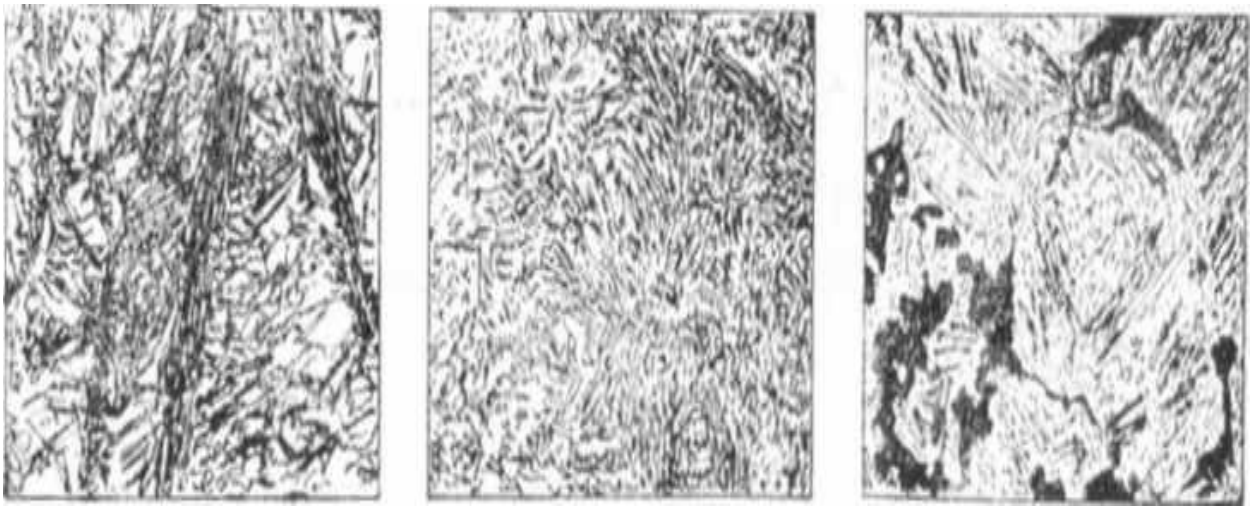
Ответ: 1) аустенит; 2) мартенсит; 3) троостит; 4) бейнит.

1.3.39. Каков основной тип структуры закаленной стали?

Ответ: 1) троостит; 2) мартенсит; 3) сорбит.

1.3.40. Какие технологические преимущества имеют детали из легированных сталей по сравнению с деталями из углеродистых сталей при закалке?

Ответ: 1) эти детали можно закаливать в масле; 2) меньше брака после закалки; 3) менее подвержены росту зерна аустенита при нагреве.



а *б* *в*

Рис. 1.4. К задаче 1.3.37. Микроструктуры сталей после различных режимов закалки: *а* —сталь с 1,2 % С при температуре 1000 ° С в воде; *б* — сталь с 0,86 % С при температуре 860 ° С в воде; *в* — сталь с 0,6 % С при температуре 900 ° С в масле

1.3.41. В чем технологические недостатки стали 40 для изготовления ответственных деталей?

Ответ: 1) заготовки плохо обрабатываются резанием; 2) детали требуют охлаждения в воде при закалке; 3) детали имеют

недостаточную конструктивную прочность (надежность) из-за низкой прокаливаемости стали.

1.3.42. Как влияет перегрев аустенита на прокаливаемость стали?

Ответ: 1) прокаливаемость увеличивается; 2) прокаливаемость уменьшается; 3) перегрев не оказывает влияния на прокаливаемость.

1.3.43. Можно ли в целях увеличения прокаливаемости рекомендовать высокие температуры нагрева для закалки? Почему?

Ответ: 1) можно — улучшаются свойства стали; 2) нельзя — возможно ухудшение свойств стали из-за увеличения размера зерна после закалки.

1.3.44. При каких температурах отпуска заканчивается распад мартенсита в углеродистых сталях?

Ответ: 1) при 200—300 ° С; 2) при 400—450 ° С; 3) при 600—650 ° С; 4) при 100—200 ° С.

1.3.45. Чем объясняется понижение твердости закаленной стали по мере повышения температуры отпуска выше 450 ° С?

Ответ: 1) снижением внутренних напряжений; 2) укрупнением частиц цементита и мозаичной структуры твердого раствора;
3) выделением углерода из кристаллической решетки мартенсита.

1.3.46. По диаграмме состояния Fe—Fe_3C (рис. 1.1) установите, какова оптимальная температура закалки стали с содержанием углерода 0,4 %.

Ответ: температура закалки: 1) 800 °С; 2) 850 °С; 3) 900 °С; 4) 750 °С.

1.3.47. Какова оптимальная температура закалки стали с 1,2% С?

Ответ: 1) 730 °С; 2) 770 °С; 3) 680 °С; 4) 900 °С.

1.3.48. Какие недостатки имеет инструмент, изготовленный из стали с содержанием углерода 1,2 % после закалки от температуры 900 ° С?

Ответ: инструмент 1) недостаточно тверд, быстро изнашивается;
2) слишком тверд и хрупок; 3) недостаточно износостоек и пластичен.

1.3.49. В чем различие сорбита и троостита отпуска?

Ответ: 1) в составе фаз; 2) в степени дисперсности феррита и цементита; 3) в форме включений феррита и цементита.

1.3.50. Чем отличаются этапы отпуска среднеуглеродистой стали от высокоуглеродистой?

Ответ: 1) отсутствует этап превращения остаточного аустенита в мартенсит отпуска; 2) распад мартенсита происходит с меньшей скоростью; 3) меньше углерода в мартенсите; 4) образуются карбиды другого состава.

1.3.51. Какова цель отпуска стали?

Ответ: 1) устранение внутренних напряжений, возникших в сплаве после закалки, снижение твердости и повышение вязкости;
2) измельчение зерна, устранение сетки вторичного цементита в заэвтектоидной стали; 3) снижение плотности стали.

1.3.52. Из каких операций состоит технологический процесс отпуска стали?

Ответ: 1) нагрев стали до температуры плавления; выдержка в течение необходимого времени; охлаждение вместе с печью; 2) нагрев закаленной стали до температуры ниже первой критической;3) нагрев стали до температуры выше точки аустенитного превращения, выдержка в течение необходимого времени, охлаждение на воздухе.

1.3.53. От каких факторов зависят свойства отпущенной углеродистой стали?

Ответ: 1) от температуры, времени отпуска и скорости охлаждения;
2) от температуры, времени отпуска; 3) от температуры отпуска и скорости охлаждения; 4) от температуры отпуска.

1.3.54. Для каких сталей целесообразно проведение обработки холодом?

Ответ: 1) для низкоуглеродистых; 2) для среднеуглеродистых; 3) для высокоуглеродистых; 4) для легированных.

1.3.55. В чем заключается сущность термической обработки, именуемой улучшением?

Ответ: улучшение заключается 1) в закалке стали; 2) в закалке и отпуске стали; 3) в закалке и высоком отпуске стали; 4) в высоком отпуске стали.

1.3.56. Как влияет легирование на процесс отпуска стали?

Ответ: 1) замедляется распад мартенсита; 2) уменьшается скорость коагуляции карбидов; 3) повышается стойкость против отпуска.

1.3.57. Какие преимущества имеют легированные стали в состоянии низкого отпуска?

Ответ: эти стали имеют 1) более однородный состав мартенсита отпуска; 2) меньшие внутренние напряжения; 3) большую хрупкую прочность; 4) большую твердость.

1.3.58. Применяется ли отпуск как самостоятельная операция термической обработки?

Ответ: 1) да; 2) нет; 3) только для легированных сталей.

1.3.59. Какова основная цель проведения отпуска?

Ответ: 1) снижение закалочных напряжений; 2) уменьшение твердости после закалки; 3) уменьшение внутренних напряжений и повышение вязкости термически обработанной детали.

1.3.60. Как осуществляется охлаждение углеродистой стали при отпуске?

Ответ: 1) вместе с печью; 2) на воздухе; 3) в воде.

1.3.61. Нагруженные конструкционные детали изготовляют из среднеуглеродистой стали. Какой вид термообработки для таких деталей можно рекомендовать и какая при этом образуется структура?

Ответ: 1) закалку, образуется мартенсит; 2) закалку и низкотемпературный отпуск, образуется мартенсит отпуска;
3) нормализацию, образуется сорбит закалки; 4) закалку и высокий отпуск, образуется сорбит отпуска.

1.3.62. Что отличает структуру сорбита отпуска и структуру зернистого перлита?

Ответ: 1) фазовый состав; 2) степень дисперсности частиц цементита; 3) форма цементитных частиц; 4) различия нет.

1.3.63. Чем отличается структура сорбита отпуска от структуры сорбита, полученного при распаде аустенита?

Ответ: 1) степенью дисперсности цементитных частиц; 2) составом фаз; 3) формой цементитных частиц; 4) ничем не отличается.

1.3.64. Чем обусловлены более высокие механические свойства стали со структурой сорбита отпуска по сравнению со сталью, имеющей структуру сорбита закалки?

Ответ: 1) округлой формой цементитных частиц; 2) степенью дисперсности цементитных частиц; 3) меньшими внутренними напряжениями; 4) составом цементитных частиц и феррита.

1.3.65. Каким методом нагрева обычно пользуются при поверхностной закалке деталей приборов? Почему?

Ответ: 1) машинными генераторами токов высокой частоты (т. в. ч.)— достигается большая скорость нагрева; 2) кислородно-ацетиленовыми горелками — дешевы и доступны; 3) ламповыми генераторами т. в. ч. —достигается прогрев деталей на незначительную глубину.

1.3.66. Чем объясняется необходимость в более высокой температуре нагрева т. в. ч. для закалки по сравнению с обычной закалкой?

Ответ: 1) высокой скоростью нагрева при т. в. ч., что приводит к превращению перлита в аустенит при более высоких температурах перегрева; 2) тем, что при нагреве т. в. ч. превращение перлита в аустенит происходит при более высоких температурах; 3) различным механизмом превращения перлита в аустенит при нагреве т. в. ч.

1.3.67. Что влияет главным образом на толщину закаленного слоя при нагреве т. в. ч.?

Ответ: 1) состав стали; 2) частота тока; 3) структура стали;

4) электросопротивление стали.

1.3.68. Какова цель химико-термической обработки стали?

Ответ: 1) повышение пластичности стали; 2) повышение блеска поверхности и улучшение внешнего вида детали или заготовки;

3) изменение состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали – получение детали с твердым поверхностным слоем и мягкой сердцевиной.

1.3.69. Какие виды химико-термической обработки стали вам известны?

Ответ: 1) обработка поваренной солью, фосфорной кислотой, азотнокислым серебром при повышенной температуре; 2) цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование, борирование, диффузионная металлизация; 3) обработка в атмосфере водорода или инертных газов при повышенной температуре.

1.3.70. Какова цель азотирования как метода химико-термической обработки стали?

Ответ: 1) повышение пластичности поверхности стали; 2) повышение твердости, износоустойчивости детали или устойчивости против коррозии; 3) измельчение зерна всего объема материала детали или заготовки.

1.3.71. Какова цель борирования как метода химико-термической обработки стали?

Ответ: 1) повышение износоустойчивости детали; 2) измельчение зерна всего объема материала детали или заготовки; 3) повышение отражательной способности поверхности.

1.3.72. Какова цель диффузионной металлизации как метода химико-термической обработки стали?

Ответ: 1) повышение отражательной способности поверхности;

2) снижение твердости и хрупкости; 3) повышение твердости, коррозионной стойкости, жаростойкости и износостойкости.

1.3.73. От каких факторов зависят свойства отпущенной углеродистой стали?

Ответ: 1) от температуры, времени отпуска и скорости охлаждения; 2) от температуры, времени отпуска; 3) от температуры отпуска и скорости охлаждения; 4) от температуры отпуска.

1.3.74. Какие процессы происходят при химико-термической обработке стали?

Ответ: 1) диффузия; 2) диссоциация; 3) абсорбция; 4) распад химических соединений.

1.3.75. Чем определяется интенсивность процесса диффузионного насыщения при химико-термической обработке?

Ответ: 1) температурой, при которой проводится процесс; 2) теплотой активации процесса диффузии; 3) скоростью нагрева.

1.3.76. Проводится цементация и диффузионное хромирование стали. В каком случае процесс протекает более интенсивно? Чем это можно объяснить?

1.3.77. Что представляет собой процесс цианирования?

Ответ: 1) насыщение поверхностных слоев стальной детали цианидами металлов; 2) насыщение поверхностных слоев стальной детали азотом; 3) насыщение поверхностных слоев стальной детали азотом и углеродом.

1.3.78. Каким способом помимо поверхностной закалки и ХТО можно повысить усталостную прочность деталей машин?

Ответ: I) увеличением чистоты поверхности деталей; 2) дробеструйным наклепом; 3) закалкой от более высокой температуры.

1.4. Выбор конструкционного материала для конкретного назначения

При конструировании выбор материала является одним из важнейших вопросов. При выборе материала учитывают следующие основные требования: материал должен обеспечить необходимую прочность и надежность детали в работе (конструктивную прочность), обладать оптимальными технологическими свойствами и обеспечивать минимальную стоимость конструкции [1-5].

Основой для правильного выбора материала являются показатели, определяющие прочность и технологические свойства материала, условия работы детали, влияющие на поведение материала в работе. Сведения о материалах обычно берут из справочников, где приводятся механические характеристики материала, которые получают при испытании стандартных образцов в стандартных условиях. Используя эти данные, их необходимо дополнять знаниями теоретического материаловедения для учета конкретных реальных условий работы детали.

На свойства стали значительное влияние оказывают постоянные (нежелательные) примеси (сера, фосфор, газы), а также технологические добавки (кремний, марганец и др.). Примеси могут попадать в сплав из природных соединений и руд, а также при переработке металлолома. Основным элементом сплава, по отношению к которому все остальные элементы – примеси, является тот, чья атомная решетка определяет кристаллографическое строение всего сплава. Пока содержание элементов в стали таково, что кристаллографическое строение сплава определяется решеткой железа, сплав называется легированной сталью. Когда содержание элементов достигает таких значений, что строение сплава определяется решеткой добавочных элементов, а не железа, то говорят уже о сплаве (титановом, никелевом и др.).

Если сталь имеет в своем составе железо, углерод и некоторое количество постоянных примесей (S, P, Si, Mn, газы), то такую сталь называют ***углеродистой***. Если в процессе выплавки углеродистой стали к ней добавляют легирующие элементы (Cr, Ni, W, Mo и др.), а также Mn и Si в повышенном количестве (более 0,8 – 1,0 %), то такую сталь называют ***легированной***.

Углерод оказывает основное влияние на свойства углеродистой стали, находится в ее составе главным образом в связанном состоянии в виде цементита. В свободном состоянии в виде графита содержится в чугунах. С увеличением содержания углерода в стали повышаются ее твердость и прочность, уменьшаются пластичность и вязкость.

Сера является нежелательной примесью, образует с железом сульфид железа FeS, который находится в стали в виде эвтектики Fe – FeS с температурой плавления 985 °С.

При нагреве стали до температуры 1000 – 1200 °С для горячей обработки давлением эвтектика плавится, сера кристаллизуется на границах зерен, что приводит к нарушению связи между зернами, повышению хрупкости, разрушению при деформации вследствие образования внутренних трещин и надрывов. Это явление называют *красноломкостью*. Содержание серы в стали не должно превышать 0,06 %.

Фосфор растворяется в α- и γ-Fe, искажает кристаллическую решетку и ухудшает пластичность стали. Фосфор вызывает явление *хладноломкости*, является нежелательной примесью, содержание которой в сталях должно быть менее 0,08 %.

Азот, кислород присутствуют в сплавах в составе оксидов, нитридов – хрупких неметаллических соединений (включений), которые создают дефекты кристаллической структуры. Они являются концентраторами напряжений и могут понизить механические свойства (прочность, пластичность).

Водород поглощается сталью в атомарном состоянии. При охлаждении сплава растворимость водорода снижается, он накапливается в микропорах под высоким давлением. Это может привести к образованию в материале внутренних надрывов (флокенов).

Марганец и кремний – полезные примеси. Их добавляют в сталь при выплавке. Марганец существенно снижает красноломкость стали, образует пластичный MnS с температурой плавления 1620 °С. Марганец увеличивает твердость, прочность и износостойкость стали, при его содержании более 1,5 % снижается пластичность стали.

Кремний связывает закись железа (FeO) с образованием силикатов ($FeO \cdot SiO_2$), которые удаляются вместе со шлаками. Кроме того, кремний понижает склонность стали к хладноломкости, способствует получению более однородной структуры, положительно сказывается на упругих характеристиках. Кремний способствует изменению магнитных свойств стали, а при содержании его в количестве 15 – 20 % придает материалу кислотоупорность. Обычное содержание кремния в углеродистой стали – не более 0,4 %, марганца – 0,8 %.

Стали ***классифицируют*** (рис.1.5) по химическому составу, качеству и назначению. По ***назначению*** стали подразделяются на конструкционные, инструментальные, стали с особыми физико-химическими свойствами. По ***химическому составу*** различают стали углеродистые и легированные.

Конструкционные стали применяют для изготовления деталей машин и конструкций; ***инструментальные*** – для режущих, измерительных инструментов, штампов и т.д. К сталям и сплавам ***с особыми свойствами*** относят жаропрочные, коррозионно-стойкие, магнитные и др. Они нашли широкое применение в приборостроении, в том числе в медицинской технике.

По ***качеству*** различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные. При

этом учитываются способ выплавки и содержание серы и фосфора. Стали *обыкновенного* качества имеют повышенное содержание нежелательных примесей – до 0,06 % серы и до 0,08 % фосфора, их механические свойства ниже, чем у сталей других групп. *Качественные* стали содержат серу и фосфор в концентрации менее 0,035 % каждого элемента. *Высококачественные* стали, выплавляемые в электропечах, содержат менее 0,025 % и серы, и фосфора. *Особо высококачественные* стали, подвергнутые электрошлаковому переплаву с вакуумированием, содержат серу и фосфор в концентрации, не превышающей 0,015 %.

.

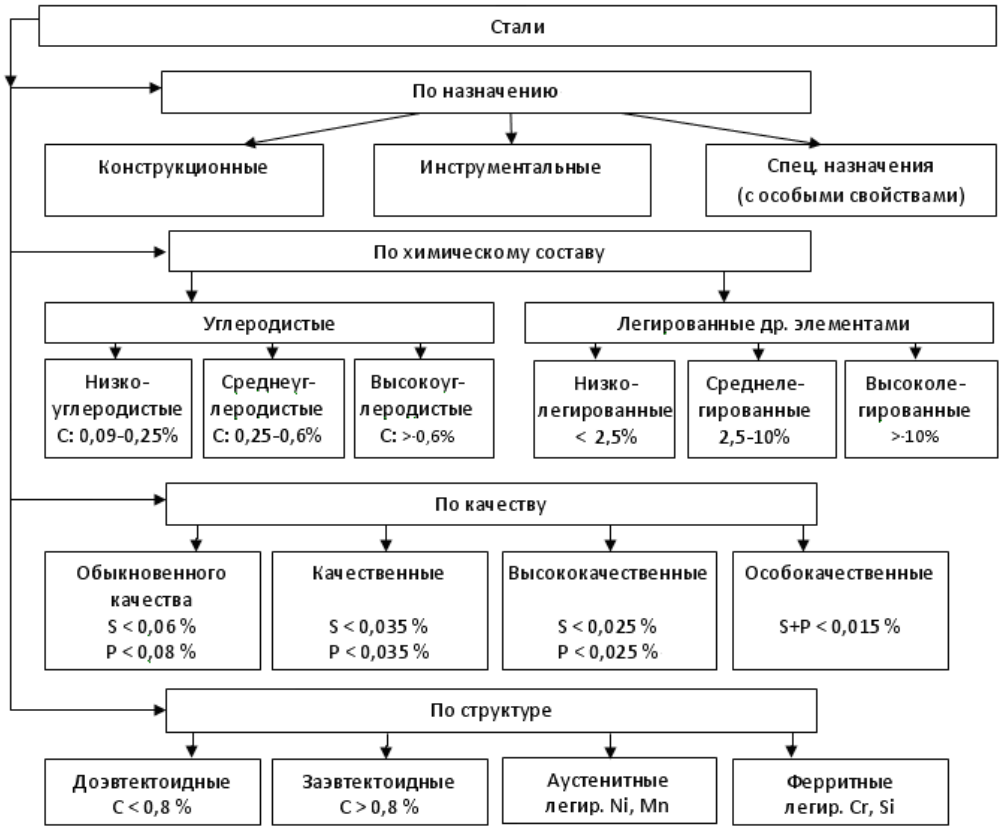


Рис. 1.5. Классификация сталей

Наиболее опасным является хрупкое разрушение деталей механизмов. Хрупкая прочность материала косвенно выражается через температурный порог хладноломкости, однако в справочниках этих данных о материалах обычно не приводится. Поэтому при

конструировании необходимо учитывать, какие факторы влияют на температурный порог хладноломкости материалов

Основными из многочисленных факторов являются: состав и строение материала, характер нагружения, условия работы, конструкция детали (наличие и виды концентраторов напряжения) [5]. Рассмотрим некоторые соображения, которые следует иметь в виду при выборе материала, обеспечивающего необходимую конструктивную прочность детали конструкций.

Строение материала. Металлы с решеткой гранецентрированного куба (ГЦК) имеют низкий порог хладноломкости и поэтому более успешно могут работать в условиях, когда хрупкое разрушение наиболее вероятно (низкие температуры, динамическое действие нагрузок). Металлы с решетками объемно центрированного куба (ОЦК) и гексагональной плотно упакованной (ГПУ) имеют более высокий порог хладноломкости. Так как большинство деталей конструкций изготовляют из углеродистой и легированной сталей, имеющих решетку ОЦК, то необходимо знать, как можно понизить температурный порог хладноломкости этих материалов.

С уменьшением величины зерна порог хладноломкости понижается. Установлено, что увеличение содержания углерода в стали на каждую 0,1 % повышает порог хладноломкости на 20—30 ° С.

Элементы Ti, Nb, V при содержании в стали до 0,1 % измельчают зерно аустенита и содействуют понижению порога хладноломкости; увеличение содержания Mo до 0,4—0,5 % понижает порог хладноломкости на 80—100 ° С; при содержании Ni в стали около 1 % понижается порог хладноломкости на 60—80 ° С; повышение содержания Ni до 3—4 % вызывает менее интенсивное понижение порога хладноломкости. Повышенное количество Ni целесообразно для увеличения прокаливаемости, что повышает конструктивную прочность в деталях крупных сечений. Содержание Cr до 1 % не влияет

на порог хладноломкости, но Cr, повышая прокаливаемость. увеличивает конструктивную прочность. Введение Мп содействует росту зерна аустенита и поэтому, если не принять меры противодействия, может повыситься температурный порог хладноломкости. В сочетании с элементами, предотвращающими рост аустенитного зерна, Мп в количестве до 1 % не влияет на порог хладноломкости; Si до 0,4—0,7 % незначительно (на 20—30 ° С) понижает порог хладноломкости; при большем содержании Si порог хладноломкости повышается. Стали, подвергаемые среднему отпуску, могут иметь 1 —1,8 % Si.

Однако не следует стремиться к использованию чрезмерно легированных сталей, что может привести к понижению хрупкой прочности. Степень легирования должна быть такой, чтобы обеспечить достижение полной прокаливаемости стали по сечению детали.

Учет прокаливаемости при выборе стали. Наивысшими прочностными свойствами обладают детали, имеющие по всему сечению после закалки мартенситную структуру.

Для деталей, работающих в условиях циклического действия нагрузок, следует учесть, что предел выносливости существенно зависит от микроструктуры. Усталостные характеристики значительно снижаются при увеличении в структуре закаленной стали остаточного аустенита выше 10 %. Усталостные характеристики снижаются с уменьшением чистоты поверхности и повышаются при наличии в поверхностных слоях детали остаточных напряжений сжатия, создаваемых наклепом, закалкой и нагревом т. в. ч., химико-термической обработкой.

Часто детали машин и механизмы выходят из строя не из-за их полного разрушения или деформации, а, например, вследствие повышенного износа или местной коррозии. Повышение износостойкости трущихся стальных деталей достигается различными видами химико-термической обработки, благодаря чему достигается

высокая твердость поверхностного слоя деталей. Однако такие виды упрочняющей обработки малопроизводительны и часто связаны с технологическими трудностями. Поэтому в ряде случаев цементацию и закалку деталей из малоуглеродистых сталей заменяют закалкой и низким отпуском деталей из легированных среднеуглеродистых сталей.

Необходимые износостойкость и прочность достигаются структурой мартенсита отпуска и более однородным по углероду составом мартенсита отпуска у легированных сталей.

Углеродистые стали содержат железо, углерод, вредные примеси и технологические добавки. Вредное влияние фосфора проявляется при работе стальных деталей, сера же главным образом затрудняет горячую обработку давлением. На работу деталей она практически не влияет, так как детали из углеродистых сталей при высоких температурах не работают. Отметим, что в конструкционных сталях содержание углерода не превышает 0,65 %, так как при большем содержании углерода детали становятся хрупкими. В инструментальных сталях, наоборот, содержание углерода должно быть выше 0,7 %, так как инструмент в первую очередь должен быть твердым (кроме штампов, деформирующих металл в горячем состоянии).

Легированные стали. Одними из основных задач, которые необходимо решать при конструировании, являются уменьшение габаритов и металлоемкости машин и оборудования, снижение их стоимости. Большое значение имеет применение низколегированных сталей [4,5]. Добавка к стали небольшого количества (до 1—2 %) недорогих легирующих элементов (кремния, марганца и некоторых других) незначительно удорожает сталь, но позволяет уменьшить размеры, увеличить долговечность и надежность деталей машин и инструмента, так как у

легированных сталей повышенная прочность, что в конечном итоге снижает расход металла и дает экономический эффект.

Свойства сталей зависят от их внутреннего строения, а также от влияния легирующих элементов, которое было частично рассмотрено выше. Свойства легированных сталей отличаются от свойств углеродистых при одном и том же содержании углерода: легирующие элементы оказывают влияние на положение критических точек и линий диаграммы железо—цементит. При небольшом содержании легирующих элементов (2—5 %) критические линии диаграммы сдвинуты незначительно, поэтому структура низколегированных сталей, а значит, и их свойства в отожженном состоянии мало отличаются от свойств углеродистой стали.

Все преимущества низколегированных сталей проявляются только после закалки, поэтому эти стали следует применять только для таких деталей, которые по условиям работы должны подвергаться упрочняющей термической обработке. При большом содержании легирующих элементов (до 10—15 %) критические точки A_1 и A_3 значительно повышаются или понижаются, структура таких сталей при комнатной температуре может получиться однофазной — ферритной или аустенитной, в ферритных сталях при повышенном содержании углерода наряду с ферритом могут быть карбиды. Ферритные и аустенитные стали, как правило, обладают какими-либо ярко выраженными физико-химическими свойствами (нержавеющие, немагнитные и др.). Поскольку они однофазны, их нельзя упрочнять закалкой, они обычно упрочняются пластической деформацией (наклепом) [4,5].

Процессы, протекающие при термической обработке легированных сталей, те же, что и у углеродистых, но при назначении режима термической обработки необходимо учитывать

ряд факторов. Легированные стали можно закаливать в масле, расплавленных солях и т.п.; у них меньше критическая скорость закалки (так как почти все легирующие элементы сдвигают кривые изотермического распада аустенита вправо). Это является их большим достоинством, так как при такой же прочности получается повышенная вязкость. Следует помнить, что чем меньше критическая скорость закалки, тем больше прокаливаемость стали, а при одной и той же скорости охлаждения, например, в масле будет больше глубина закаленного слоя. Поэтому у легированных сталей в большом сечении можно получить прочную структуру.

Почти все легирующие элементы понижают мартенситную точку, поэтому после закалки у них получается больше остаточного аустенита, чем содержится в углеродистых. Легированные инструментальные стали и постоянные магниты целесообразно после закалки обрабатывать холодом.

Легирующие элементы оказывают влияние на отпускную хрупкость 1-го и 2-го рода. Для предупреждения отпускной хрупкости 2-го рода стали с вольфрамом или молибденом применяют только для крупных деталей или для деталей, которые во время работы могут периодически нагреваться.

Легирование создает и дугие преимущества легированных сталей перед углеродистыми. Основная цель легирования конструкционных сталей — увеличение их прокаливаемости. Сталь должна обеспечить прокаливаемость в рабочем сечении детали, т.е. в том сечении, на которое действуют нагрузки. Обычно чем больше действующие нагрузки и чем больше сечение детали, тем более легирована сталь.

Как правило, стали, содержащие до 0,25 % углерода, подвергают цементации или нитроцементации с последующей закалкой и низким отпуском. Их так и называют — цементируемые.

Их используют для деталей, которые работают с ударными нагрузками и подвергаются истиранию. Детали из сталей, содержащих 0,35—0,5 % углерода, под действием больших нагрузок, подвергают улучшению, т.е. закалке и высокому отпуску. Такие стали называются улучшаемыми. Если детали подвергаются также истиранию, то проводится поверхностное упрочнение (чаще всего закалка токами высокой частоты). Стали, содержащие 0,55—0,65 % углерода, идут обычно на изготовление пружин и рессор. Их подвергают закалке и среднему отпуску или изотермической закалке.

Основное достоинство ***легированных инструментальных сталей*** — возможность их закалки в масле или расплавленных солях, так как при этом возникают меньшие напряжения и коробления, меньшая хрупкость. Выбор инструментальных сталей делается с учетом термической обработки и в соответствии с областью их применения.

Инструмент из низколегированных сталей не может работать при большой скорости резания, так как при нагреве свыше 200—250 °С резко падает твердость. Сохраняют твердость при нагреве до 500—600 °С только быстрорежущие стали.

Быстрорежущие стали маркируют по основному легирующему элементу — вольфраму. Например, в марке Р18 цифра показывает его процентное содержание. Процесс термической обработки быстрорежущей стали имеет ряд особенностей. Если правильно провести термическую обработку, то во время работы твердость инструмента начинает падать при температурах значительно ниже 600 °С. После высокого отпуска твердость быстрорежущей стали повышается, так как в результате отпуска остаточный аустенит переходит в мартенсит [5].

При выборе стали для режущих инструментов руководствуются следующими соображениями. Инструмент, который при работе не подвергается ударным нагрузкам, можно изготовить из стали с повышенным содержанием углерода. Такие стали после закалки и низкого отпуска имеют максимальную твердость и износостойкость. Если инструмент в процессе работы подвергается действию ударных нагрузок, то выбирают сталь с пониженным содержанием углерода (0,6—0,7 %).

После закалки необходимо несколько повысить температуру отпуска. Очень часто для изготовления инструмента применяется быстрорежущая сталь. Однако при этом необходимо учитывать, что эти стали могут иметь значительную карбидную неоднородность, если заготовки из них не подвергнуты достаточной степени деформации. Карбидная неоднородность повышается также с увеличением содержания углерода и вольфрама в стали. Чем выше карбидная неоднородность, тем ниже прочность инструмента. Меньшей карбидной неоднородностью обладают инструменты, изготовленные из заготовок стали Р18 малых сечений (сталь Р18 имеет высокую стоимость).

Важным технологическим свойством быстрорежущих сталей является шлифуемость, которая сильно ухудшена в сталях, содержащих повышенное количество ванадия (сталь Р9). Более благоприятными эксплуатационными и технологическими свойствами обладает быстрорежущая сталь Р12, Р6М5.

Для изготовления рабочих органов (пуансонов) вырубных штампов небольшого сечения рекомендуется использование сталей с несквозной прокаливаемостью, что обеспечивает повышенную прочность штампа в работе. Пуансоны и матрицы крупных и сложных по форме штампов холодной штамповки изготовляют из высокохромистых сталей типа Х12, которые имеют высокую износостойкость и прокаливаемость. После закалки эти стали имеют повышенное количество остаточного

аустенита, что уменьшает деформацию штампа при закалке и необходимость последующей механической доводки размеров штампа.

Стали для штампов горячего деформирования металлов должны наряду с износостойкостью и прочностью обладать достаточной жаростойкостью. Молотовые штампы, контакт которых с обрабатываемым металлом кратковременный, могут изготовляться из среднеуглеродистых хромоникелевых сталей, дополнительно легированных молибденом или вольфрамом (сталь 5ХНВ). После закалки и отпуска при температуре примерно 500 °С эти стали имеют высокую твердость [4,5].

Для высадочных штампов необходимы стали более высокой теплостойкости, что достигается легированием вольфрамом. Однако среднеуглеродистые стали с повышенным (примерно 8 %) содержанием вольфрама дороги. Поэтому следует выбирать стали с содержанием вольфрама примерно 2 % при дополнительном легировании хромом и кремнием. Эти стали в меньшей степени обладают недостатками, присущими сталям типа 3Х2В8Ф. В последнее время рекомендуются стали 4Х5В2ФС, 4ХВМФ, обеспечивающие повышенную стойкость штампов. Для пресс-форм, предназначенных для литья под давлением, используют стали, аналогичные сталям для штампов горячей штамповки.

При выборе сталей для изготовления измерительного инструмента необходимо иметь в виду, что для таких деталей не допускается изменение размеров с течением времени. Изменение размеров, кроме износа, может происходить из-за перераспределения внутренних напряжений, частичного превращения остаточного аустенита или мартенсита. Исходя из этих соображений, необходимо выбрать марку стали и назначить режим термообработки, чтобы по возможности устранить причины, которые могут вызвать изменение размеров инструмента.

Если, например, требуется обосновать выбор марки стали для измерительного инструмента (калибра), то следует отметить, что калибр непосредственно соприкасается с поверхностью деталей, поэтому он должен быть твердым и износоустойчивым. Инструмент должен сохранять точный профиль и размеры после термической обработки, поэтому сталь должна мало деформироваться при закалке. Кроме того, инструмент должен длительное время сохранять свои размеры, значит, в стали с течением времени не должно происходить естественного старения. Этим требованиям удовлетворяет сталь ХГ, содержащая примерно по 1 % углерода, хрома и марганца. Она мало деформируется при закалке и длительное время сохраняет свои размеры после закалки и низкого отпуска.

Свойства ***нержавеющих сталей*** зависят от содержания углерода и структуры. Однофазные сплавы значительно лучше сопротивляются коррозии, чем многофазные, поэтому чем меньше в стали углерода, тем выше ее коррозионная стойкость. Цель закалки ряда низкоуглеродистых нержавеющих сталей — увеличение коррозионной стойкости, а не прочности. Твердость у них при закалке не увеличивается, так как нет превращений в твердом состоянии, но при нагреве карбиды переходят в твердый раствор, а при резком охлаждении не успевают выделиться и поэтому получается однофазная структура. Прочность сталей типа 08Х18Н10Т достигается нагартовкой, т.е. в результате пластической деформации.

Жаростойкие и жаропрочные стали всегда являются сложнолегированными: содержат много элементов и в большом количестве.

Сплавы железа с углеродом, содержащие > 2,14 % С, называют ***чугунами***. Присутствие эвтектики в структуре чугуна (см. рис.1.1)

обусловливает его использование исключительно в качестве литейного сплава для деталей, применяемых при относительно невысоких напряжениях и малых динамических нагрузках. Преимущества чугуна – высокие литейные свойства и небольшая стоимость (по сравнению со сталью). Температуры плавления чугунов ниже, чем у сталей, что облегчает процесс литья. Например, температура плавления серого чугуна составляет 1100-1250 ^{o}C в зависимости от содержания углерода, что в среднем на 300 ^{o}C ниже, чем температура плавления железа и на 250-300 ^{o}C ниже, чем температура плавления сталей. С повышением содержания углерода температура плавления уменьшается, а жидкотекучесть увеличивается. Ликвация в чугунах также меньше, чем у стали. Кроме того, чугуны, в структуре которых при затвердевании образуется графит (фаза с большим удельным объемом, чем у металлической основы), имеют низкий коэффициент усадки, приближающийся к аналогичной характеристике оловянных бронз.

Чугуны с графитом как мягкой и хрупкой составляющей хорошо обрабатываются резанием (с образованием ломкой стружки) и образуют более чистую поверхность, чем стали (кроме автоматных). Чугуны имеют повышенное содержание углерода (2,2-4 %) и кремния (0,8-2 %) – элементов, способствующих графитизации. Однако в марках чугуна химический состав не указывается, так как (в отличие от большинства других металлических сплавов) этот признак не характеризует в достаточной степени их свойства, а следовательно и область применения. Структура и свойства чугунов зависят главным образом от условий получения отливки (температуры жидкого металла, введения модификаторов и особенно значительно от условий охлаждения при литье). Поэтому при одинаковом химическом составе чугун может иметь сильно отличающиеся структуру и свойства (например, белый и серый чугуны).

Механические свойства чугуна, определяющие область его применения, в значительно большей степени характеризуются его структурой: формой и размерами выделения графита; строением металлической основы.

Углерод в чугуне может находиться в виде цементита или графита или одновременно в виде цементита и графита. Цементит придает излому чугуна специфический светлый блеск. Поэтому чугун, в котором весь углерод находится в виде цементита, называют белым. Графит придает излому чугуна серый цвет, поэтому такой чугун называют серым чугуном. В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкий [2].

Задачи

1.4.1. Какие элементы присутствуют в составе любой стали?

Ответ: l) Fe, C; 2) Fe, C, Mn, S, P, Si; 3) Fe, Mn, P, S, C; 4) Fe, Mn, Si, P, Cr, S, C.

1.4.2. Какие элементы являются важнейшими и определяют основные свойства стали?

Ответ: 1) Fe, C; 2) Fe, C, Si, Mn; 3) Fe, C, P, S; 4) Fe, C, Mn.

1.4.3. Какие примеси в стали являются вредными и в чем заключается их вредное влияние?

Ответ: 1) P — увеличивает хрупкость; 2) S — вызывает красноломкость; 3) Si — повышает хрупкость, уменьшает пластичность; 4) Mn — понижает пластичность.

1.4.4. Каким способом производится основное количество углеродистой стали?

Ответ: 1) в конверторах; 2) в электропечах; 3) в кислых мартеновских печах; 4) в основных мартеновских печах.

1.4.5. Какие стали имеют более высокие прочностные свойства?

Ответ: 1) кипящие; 2) спокойные; 3) полуспокойные.

1.4.6.Какие конструкционные углеродистые стали поставляются металлургическими заводами с гарантированным химическим составом?

Ответ: 1) стали группы А; 2) стали группы Б; 3) стали группы В.

1.4.7. Какое влияние на свойства стали оказывает рост содержания углерода?

Ответ: 1) повышается пластичность стали; 2) повышается коррозионная стойкость стали; 3) повышаются твердость и хрупкость стали; 4) влияния не оказывает.

1.4.8. Какое влияние на свойства стали оказывает рост содержания примеси серы?

Ответ: 1) повышаются хрупкость и склонность к образованию трещин и надрывов, возникает явление красноломкости; 2) повышается пластичность стали; 3) повышаются прочность и износостойкость стали; 4) влияния не оказывает.

1.4.9. Какое влияние на свойства стали оказывает рост содержания примеси фосфора?

Ответ: 1) повышаются прочность и износостойкость стали;
2) понижается пластичность стали за счет искажения кристаллической решетки, возникает явление хладноломкости; 3) повышается пластичность стали.

1.4.10. Какие постоянные нежелательные примеси оказывают влияние на свойства стали?

Ответ: 1) медь, алюминий, калий, кальций, окись азота; 2) никель, хром, молибден, вольфрам, двуокись углерода; 3) сера, фосфор, азот, кислород, водород.

1.4.11. Какие постоянные примеси – технологические добавки оказывают влияние на свойства стали?

Ответ: 1) двуокись кремния, азот, кислород; 2) кремний и марганец.;3) сера, фосфор, азот, водород.

1.4.12. Каково предельно допустимое содержание примеси серы в стали?

Ответ: 1)1,1 %;.2) 0,06 % 3) 0,1 %.

1.4.13. Каково предельно допустимое содержание примеси фосфора в стали?

Ответ: 1) 1,1 %; 2) 0,1 %; 3) 0,08 %.

1.4.14. Какое влияние на свойства стали оказывает технологическая добавка - примесь марганца?

Ответ: 1) возникает явление красноломкости; 2) повышаются твердость, прочность и износостойкость стали; 3) повышается пластичность стали;

1.4.15. Каково предельно допустимое содержание примеси марганца в стали?

Ответ: 1) 1,1 %; 2) 0,4 %; 3) 0,8 %.

1.4.16. Каково предельно допустимое содержание примеси кремния в стали?

Ответ: 1) 0,4 %.2) 1,0 %.3) 0,01 %.

1.4.17. Какое влияние на свойства стали оказывает технологическая добавка - примесь кремния?

Ответ: 1) повышает хрупкость стали, создает явление хладноломкости; 2) связывает закись железа с образованием силикатов, которые удаляются вместе со шлаками, понижает склонность стали к хладноломкости;3) образует легкоплавкую эвтектику с железом, при кристаллизации осаждается на границах зерен, что приводит к образованию трещин и надрывов при деформациях; 4) влияния не оказывает.

1.4.18. Какое функциональное свойство приобретает сталь при содержании примеси кремния в количестве 15-20 %?

Ответ: 1) повышенную электропроводность; 2) повышенную твердость; 3) повышенную кислотоупорность.

1.4.19. По каким признакам классифицируются стали?

Ответ: 1) по химическому составу, назначению и качеству; 2) по типу кристаллической решетки; 3) по величине магнитной восприимчивости.

1.4.20. Какова классификация сталей по функциональному назначению?

Ответ: 1) сильно-, средне- и слабомагнитные; 2) конструкционные, инструментальные и с особыми физико-химическими свойствами; 3)корозионностойкие , теплостойкие, жаропрочные.

1.4.21. Какова классификация сталей по химическому составу?

Ответ: 1) углеродистые и легированные; 2) легированные и нелегированные; 3) конструкционные, инструментальные и с особыми физико-химическими свойствами.

1.4.22. Какова классификация сталей по качеству?

Ответ: 1) качественные и некачественные; 2) некачественные, среднего качества и высококачественные; 3) обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные.

1.4.23. Какие параметры лежат в основе классификации сталей по качеству?

Ответ: 1) размер и форма зерна поликристаллического материала; 2) способ выплавки; содержание серы и фосфора; 3) особенности процесса химико-термической обработки.

1.4.24. Приведите характеристику сталей обыкновенного качества.

Ответ: 1) допустимо наличие 5 внутренних трещин в объеме 1 $см^3$; 2) механические свойства ниже, чем у сталей других групп качества, допустимо содержание примеси серы до 0,06 %, фосфора – до 0,08 %; 3) механические свойства ниже, чем у сталей других групп по качеству, допустимо содержание примеси серы до 0,6%, фосфора – до 0,8%.

1.4.25. Каково допустимое содержание вредных примесей в качественных сталях?

Ответ: 1) содержание и серы, и фосфора не выше 0,035 %;
2) содержание и серы, и фосфора не выше 0,0035 %; 3) содержание и серы, и фосфора не выше 0,35 %.

1.4.26. Каковы особенности выплавки и допустимое содержание вредных примесей в высококачественных сталях?

Ответ: 1) содержание и серы, и фосфора не выше 0,05 % выплавка в мартеновских печах; 2) содержание и серы, и фосфора не выше 0,035 %, электрошлаковый переплав; 3) содержание и серы, и фосфора не выше 0,025 %, выплавка в электропечах.

1.4.27. Приведите характеристики особо высококачественных сталей.

Ответ: 1) содержание и серы, и фосфора не выше 0,025 %;
2) содержание и серы, и фосфора не выше 0,015 %, электрошлаковый переплав с вакуумированием; 3) содержание и серы, и фосфора не выше 0,025 %, выплавка в электропечах.

1.4.28. На какие группы по содержанию углерода подразделяются углеродистые стали?

Ответ: 1) низкоуглеродистые с содержанием углерода 0,25-0,35 %, среднеуглеродистые с содержанием углерода 0,35-0,80 %, высокоуглеродистые с содержанием углерода 0,80 -2,6 %;
2) низкоуглеродистые с содержанием углерода 0,009-0,25 %, среднеуглеродистые с содержанием углерода 0,25-2,14 %, высокоуглеродистые с содержанием углерода более 2,14 %;
3) низкоуглеродистые с содержанием углерода 0,09-0,25 %, среднеуглеродистые с содержанием углерода 0,25-0,60 %, высокоуглеродистые с содержанием углерода более 0,60 %.

1.4.29. Какие характеристики положены в основу деления на группы А,Б и В углеродистых сталей обыкновенного качества?

Ответ: 1) гарантируемые производителем химический состав и механические свойства; 2) гарантируемый производителем химический состав стали, величина удельного электрического сопротивления, рекомендуемые для изготовления изделия; 3) величина относительного удлинения перед разрывом.

1.4.30. Приведите описание состава, назначения и качества сталей марок Ст0…Ст6.

Ответ: 1) 1. сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы А, содержание углерода понижается от Ст0 к Ст6;
2) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, группы А, содержание углерода повышается от Ст0 к Ст6; 3) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, группы Б, содержание углерода повышается от Ст0 к Ст6.

1.4.31. Приведите описание состава, назначения и качества сталей марок БСт0…БСт6.

Ответ: 1) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы Б, содержание углерода понижается от БСт0 к БСт6;
2) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, группы А, содержание углерода повышается от БСт0 к БСт6; 3) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, группы Б, содержание углерода повышается от БСт0 к БСт6.

1.4.32. Приведите описание состава, назначения и качества сталей марок ВСт0…ВСт6.

Ответ: 1) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы В, содержание углерода понижается от ВСт0 к ВСт6;
2) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, группы В, содержание углерода повышается от ВСт0 к ВСт6; 3) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, группы В, содержание углерода повышается от ВСт0 к ВСт6.

1.4.33. Приведите описание состава, назначения и качества стали марки 05.

Ответ: 1) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы А, с содержанием углерода 0,5 %, высокоуглеродистая, может подвергаться термической обработке; 2) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, с содержанием углерода 0,05 %, среднеуглеродистая, может подвергаться термической обработке; 3) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, с содержанием углерода 0,05 %, низкоуглеродистая, не может подвергаться термической обработке.

1.4.34. Приведите описание состава, назначения и качества стали марки 25.

Ответ: 1) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, с содержанием углерода 0,25 %, низкоуглеродистая; 2) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы А, с содержанием углерода 2,5 %; 3) сталь углеродистая, конструкционная, обыкновенного качества, с содержанием углерода 0,25 %, высокоуглеродистая.

1.4.35. Приведите описание состава, назначения и качества стали марки 55.

Ответ: 1) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, с содержанием углерода 0,55 %, среднеуглеродистая, может подвергаться термической обработке; 2) сталь углеродистая, конструкционная, высококачественная, с содержанием углерода 0,55 % среднеуглеродистая, может подвергаться термической обработке;
3) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, группы В, с содержанием углерода 5,5 %, быстрорежущая.

1.4.36. Приведите описание назначения, состава и качества стали марки 75.

Ответ: 1) сталь углеродистая, конструкционная, качественная, с содержанием углерода 0,75 %, высокоуглеродистая, может подвергаться термической обработке и применяться для изготовления пружин, рессор, замковых шайб и др.; 2) сталь углеродистая, высококачественная, инструментальная с содержанием углерода 7,5 %, не может подвергаться термической обработке, применяется для изготовления малонагруженных деталей и конструкций; 3) такой марки стали не существует.

1.4.37. Приведите описание назначения, состава и качества стали марки 88.

Ответ: 1) сталь углеродистая, высококачественная, инструментальная с содержанием углерода 0,88 % , не может подвергаться термической обработке, применяется для изготовления малонагруженных деталей и конструкций; 2) такой марки стали не существует; 3) сталь углеродистая, инструментальная, обыкновенного качества, с содержанием углерода 8,8 %, быстрорежущая.

1.4.38. Какую из нижеприводимых марок сталей следует использовать для изготовления сварных металлоконструкций, предусматриваемых для работы в условиях Севера?

Ответ: 1) СтЗ; 2) МСтЗ; 3) МСтЗ кп; 4) ВСтЗ.

1.4.39. Какую из нижеприведенных марок сталей следует выбрать для изготовления вала механической обработкой?

Ответ: 1) МСт5; 2) ВСт5; 3) Ст5; 4) МСт4 кп.

1.4.40. Болты изготовляются из прутка путем механической обработки. Какую из приводимых в ответах сталь следует использовать?

Ответ: 1) СтЗ; 2) МСтЗ; 3) ВСтЗ.

1.4.41. Методом глубокой вытяжки из стального листа изготовляют кузова автомашин. Какую сталь можно рекомендовать для этой цели?

Ответ: 1) СтЗ; 2) Ст01 кп; 3) МСтЗ кп; 4) Мст1.

1.4.42. Рекомендуйте материал для изготовления мелких винтов для крепежа электроарматуры при массовом изготовлении на станках-автоматах.

Ответ: 1) Ст1; 2) МСт1; 3) ВСт3; 4) А12.

1.4.43. Какие примеси в составе стали улучшают ее обрабатываемость на металлорежущих станках?

Ответ: 1) С и Mn; 2) Mn и Si; 3) S и P; 4) P.

1.4.44. Какими способами изготовляют стальные детали?

Ответ: 1) литьем; 2) обработкой давлением; 3) механической обработкой; 4) ковкой.

1.4.45. Что ограничивает производство литых стальных деталей?

Ответ: 1) низкая жидкотекучесть; 2) большой пригар; 3) большая линейная и объемная усадка.

1.4.46. В виде каких основных фаз находятся легирующие элементы в стали?

Ответ: 1) в виде химических соединений, окислов, сульфидов, твердого раствора; 2) в виде твердого раствора; 3) в виде карбидов.

1.4.47. Какие из приводимых элементов образуют с железом только твердые растворы?

Ответ: 1) Си, Ni; 2) Cr, Mn, Si; 3) Si, Al, Co; 4) Mo, Cr, W.

1.4.48. В какой фазе железа преимущественно растворяется Сг и Ni (решетки ОЦК И ГЦК соответственно)?

Ответ: 1) Ni — в Fe, Cr — в Fe; 2) Cr и Ni — в Fe; 3) Ni — в Fe-, Cr образует карбиды.

1.4.49. Какие фазы легирующих элементов особенно сильно упрочняют сплавы железа?

Ответ: 1) твердые растворы; 2) карбиды; 3) фазы внедрения.

1.4.50. Каково основное назначение элементов типа Ti, Nb, V в легированных конструкционных сталях?

Ответ: 1) упрочняют сталь; 2) измельчают зерно стали;

3) повышают конструктивную прочность.

1.4.51. В каких фазах стали при нормальной температуре находятся Si, Ni, Cr, Ti при одновременном легировании ими малоуглеродистой конструкционной стали?

Ответ: 1) Si, Ni — в феррите, Cr, Ti — в аустените: 2) Si, Ni, Cr — в феррите, Ti — в карбидной фазе; 3) Si, Ni — в феррите, Cr, Ti — в карбидной фазе.

1.4.52. Как влияют большинство легирующих элементов на температуру перлитного превращения и содержание углерода в перлите?

Ответ: 1) повышают температуру; 2) повышают температуру перлитного превращения и понижают количество углерода в перлите; 3) понижают температуру перлитного превращения и содержание углерода в перлите.

1.4.53. В каком состоянии рационально использование легированных сталей?

Ответ: 1) в отожженном; 2) в закаленном; 3) в закаленном и отпущенном.

1.4.54. Какими основными качествами должен обладать инструмент?

Ответ: 1) высокой твердостью; 2) высокой износостойкостью и прочностью; 3) высокой теплостойкостью; 4) высокой прочностью и вязкостью.

1.4.55. Наличие каких элементов в составе инструментальных сталей обеспечивает высокую твердость инструмента после закалки.

Ответ: 1) карбидообразующих элементов; 2) легирующих элементов; 3) углерода.

1.4.56. В состав многих легированных инструментальных сталей входят в незначительных количествах хром, марганец, вольфрам, кремний. Какое основное назначение этих элементов?

Ответ: 1) улучшают прокаливаемость стали; 2) повышают теплостойкость стали; 3) повышают износостойкость инструмента; 4) улучшают технологические свойства стали.

1.4.57. Какие имеются группы инструментальных сталей по теплостойкости?

Ответ: 1) нетеплостойкие; 2) полутеплостойкие; 3) теплостойкие; 4) высокотеплостойкие.

1.4.58. Что понимают под теплостойкостью стали?

Ответ: 1) температуру отпуска стали; 2) температуру нагрева стали при закалке; 3) температуру нагрева, при которой твердость закаленной стали начинает резко понижаться; 4) температуру нагрева, при которой начинается снижение прочности инструмента.

1.4.59. К какой группе по теплостойкости относятся низколегированные инструментальные стали?

Ответ: 1) теплостойких; 2) полутеплостойких; 3) нетеплостойких.

1.4.60. Какие инструменты требуют сплошной прокаливаемости?

Ответ: 1) напильники; 2) лерки; измерительный инструмент; 3) молотковые штампы; 4) все инструменты; 5) режущие инструменты.

1.4.61. Какой заключительной механической обработке после термообработки подвергается большинство инструментов?

Ответ: 1) токарной обработке; 2) шлифовке; 3) поверхностному упрочнению; 4) доводке.

1.4.62. Какие дефекты могут иметься при шлифовании инструмента?

Ответ: 1) снижение твердости поверхностного слоя от разогрева поверхностных слоев при шлифовании; 2) образование шлифовочных трещин; 3) недостаточная чистота поверхности после шлифования; 4) коробление изделия.

1.4.63. Какая фаза в структуре термически обработанной инструментальной стали содействует образованию шлифовочных трещин?

Ответ: 1) мартенсит; 2) остаточный аустенит; 3) троостит; 4) мартенсит отпуска.

1.4.64. Инструмент изготовлен из стали У7, ХВГ и Р18. В какой стали наиболее вероятно образование шлифовочных трещин?

Ответ: 1) в стали У7; 2) в стали ХВГ; 3) в стали Р18.

1.4.65. Какую сталь можно рекомендовать для изготовления пресс-форм для литья под давлением алюминиевых сплавов. По каким причинам?

Ответ: 1) сталь 3Х2В8Ф — имеет повышенную теплостойкость; 2) сталь 4Х5В2ФС — имеет достаточную теплостойкость и высокую разгаростойкость; она дешевле стали 3Х2В8Ф; 3) сталь Р18 — имеет высокую теплостойкость после термообработки.

1.4.66. Ниже приводятся материалы и способ их термообработки для изготовления крупных шаблонов. Какому материалу и какой обработке следует отдать предпочтение?

Ответ: 1) сталь У7, закалка + очень длительный низкий отпуск; 2) сталь Х12Ф1, закалка + низкий отпуск; 3) сталь 38ХМЮА, отжиг + низкотемпературное азотирование; 4) сталь 55, закалка с нагревом т. в. ч.+ длительный низкий отпуск.

1.4.67. Перечислите основные требования, предъявляемые к сталям для изготовления измерительных инструментов.

Ответ: 1) максимальные жаропрочность и кислотоупорность; 2) минимальное содержание углерода; 3) максимальные твердость и износостойкость.

1.4.68. Какие основные классы чугунов используются в качестве конструкционного материала?

Ответ: 1) белые; 2) серые, высокопрочные; 3) ковкие.

1.4.69. Из каких фаз в железоуглеродистых сплавах может образовываться графит в структуре чугунов?

Ответ: 1) из жидкой фазы; 2) из аустенита; 3) из цементита.

1.4.70. Какие факторы главным образом влияют на интенсивность графитообразования в чугуне?

Ответ: 1) количество C, Mn, Si в сплаве; 2) скорость охлаждения; 3) содержание углерода и кремния в чугуне.

1.4.71. Какова форма графитовых включений в белых чугунах?

Ответ: 1) пластическая; 2) хлопьевидная; 3) шаровидная; 4) в этих чугунах нет графита.

1.4.72. В одной и той же отливке в участках, имеющих разную толщину, обнаружена различная структура — от белого чугуна в тонких частях до ферритного серого в массивных частях. Чем это обусловлено?

Ответ: 1) разным составом металла в различных частях отливки; 2) различным составом чугуна и разной скоростью охлаждения различных частей отливки; 3) различной скоростью охлаждения разных частей отливки.

1.4.73. Какая структура металлической основы серого чугуна обеспечивает оптимальные механические свойства отливок?

Ответ: 1) ферритная; 2) ферритно-перлитная; 3) перлитная.

1.4.74. Изменение количества каких составляющих в химическом составе обычных серых чугунов влияет на получение чугуна с требуемой структурой и с нужным комплексом механических свойств?

Ответ: 1) Mn; 2) Si; 3) Si + C; 4) C.

1.4.75. Можно ли влиять на свойства серого чугуна путем изменения величины и количества графитовых включений? Если можно, то как называется такой процесс?

Ответ: 1) можно, графитизацией; 2) нельзя; 3) можно, модифицированием; 4) можно, отжигом.

1.4.76. Сколько имеется связанного углерода в перлитном сером чугуне?

Ответ: 1) 0 %; 2) 2,14 %; 3) 0,8 %: 4) 4,3 %.

1.4.77.Можно ли по микроструктуре чугуна определить: является чугун серым, ковким или высокопрочным? По какому признаку?

Ответ: 1) можно — по количеству графита; 2) нельзя; 3) можно — по характеру металлической основы; 4) можно — по форме графитовых включений.

1.4.78. Какая структура серого чугуна обладает наиболее низкими механическими свойствами?

Ответ: 1) перлитная; 2) феррито-перлитная; 3) ферритная.

1.4.79. По каким показателям чугуны имеют преимущества перед сталью?

Ответ: 1) по прочности; 2) по циклической вязкости и меньшей чувствительностью к дефектам поверхности деталей; 3) по стоимости.

1.4.80. Какие чугуны образуются при модифицировании жидкого чугуна магнием или церием?

Ответ: 1) ковкие; 2) белые; 3) высокопрочные; 4) серые.

1.4.81. Чем объясняются высокая прочность и значительная пластичность высокопрочных чугунов?

Ответ: 1) более качественной структурой металлической основы; 2) химическим составом металла; 3) количеством графита в структуре; 4) формой графитовых включений.

1.4.82. Чем объясняется прочность и пластичность высокопрочных чугунов?

Ответ: 1) формой графитовых включений; 2) количеством графита в структуре; 3) характером металлической основы; 4) химическим составом.

1.4.83. Какой материал следует использовать для изготовления заднего моста автомобиля?

Ответ: 1) стальные поковки; 2) стальное литье; 3) серый чугун; 4) ковкий чугун.

1.4.84. Какой материал следует использовать для изготовления блока цилиндров грузовой автомашины?

Ответ: 1) стальное литье; 2) ковкий чугун; 3) серый чугун; 4) высокопрочный чугун.

1.4.85. Какие материалы обладают наилучшими литейными свойствами?

Ответ: 1) сталь; 2) высокопрочный чугун; 3) ковкий чугун; 4) серый чугун.

1.4.86. Какой из литейных сплавов является наиболее дешевым?

Ответ: 1) серый чугун; 2) ковкий чугун; 3) сталь; 4) высокопрочный чугун.

1.4.87. Какой материал обычно используют для изготовления коленчатых валов?

Ответ: 1) сталь; 2) ковкий чугун; 3) высокопрочный чугун; 4) серый чугун.

2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К металлам относятся вещества, обладающие высокими теплопроводностью и электрической проводимостью, ковкостью, блеском и другими характерными свойствами, которые обусловлены наличием в их кристаллической решетке большого числа свободных электронов.

Единственными объективными критериями, позволяющими отнести материал к металлам, считаются наличие электропроводности при T = 0 К и положительный температурный коэффициент удельного сопротивления. Указанными выше свойствами обладают свыше 80 простых веществ (элементов) и множество металлических сплавов.

Высокая электропроводность металлов связана с тем, что в них имеется большое количество носителей тока — *электронов*

проводимости, образующихся из валентных электронов атомов металла, которые не принадлежат определённому атому. Электрический ток в металле возникает под действием внешнего электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов. Движущиеся под действием поля электроны рассеиваются на неоднородностях и дефектах ионной решётки, а также на нарушениях периодической структуры, связанной с тепловыми колебаниями ионов. При этом электроны теряют импульс, а энергия их движения преобразуются во внутреннюю энергию кристаллической решётки, что и приводит к нагреванию проводника при прохождении по нему электрического тока.

Сопротивление проводника при прочих равных условиях зависит от его геометрии и от *удельного электрического сопротивления* материала, из которого он состоит. Сопротивление однородного проводника постоянного сечения зависит от свойств вещества проводника, его длины, сечения и вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \tag{2.1}$$

где ρ — *удельное сопротивление* вещества проводника, Ом·м, l — длина проводника, м, а S — площадь сечения, м².

Удельное сопротивление — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади сечения.

В соответствии с квантово–механическими представлениями причиной наличия электрического сопротивления твердых тел является не столкновение свободных электронов с атомами решетки (как в классической теории Друде), а рассеяние их, как указано выше, на дефектах решетки, вызывающих нарушение периодичности потенциала [1,2,8]. Идеально правильная, бездефектная неподвижная решетка не способна рассеивать свободные носители заряда и поэтому должна обладать нулевым сопротивлением.

Подвижность μ и длина свободного пробега λ электронов в твердом теле зависят от структуры материала. Чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления ρ. Примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ. С позиций квантовой механики рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона; нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн де Бройля. В металлическом проводнике, где длина волны электрона порядка 5 Å, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов и длину свободного пробега и, следовательно, приводят к росту ρ. Величину, обратную удельному сопротивлению, называют **удельной проводимостью** вещества и обозначают σ:

$$\sigma = e\, n\, \mu, \qquad (2.2)$$

где e - заряд электрона, n – концентрация.

Так как в металлах концентрация электронного газа практически не зависит от температуры (T), то зависимость удельного сопротивления ρ (и обратной величины удельной электропроводности σ) от температуры полностью определяется температурной зависимостью подвижности (μ) и пропорциональной ей длины свободного пробега электронов (λ).

Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. уменьшается среднестатистическая длина свободного пробега λ, уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 2.1).

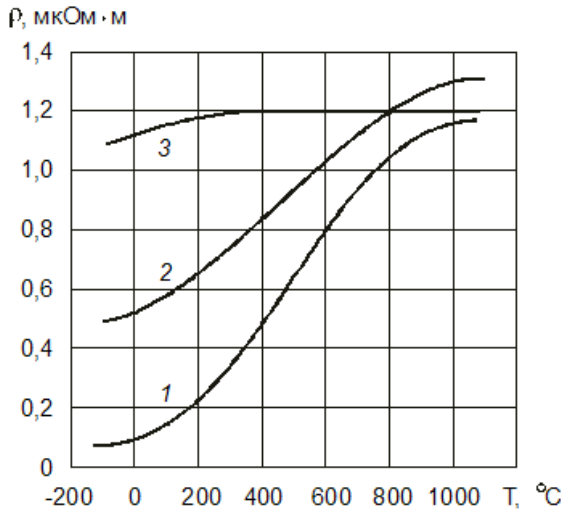


Рис. 2.1. Зависимость удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры: 1 – железо; 2 – электротехническая сталь с содержанием 4 % Si; 3 – сплав Fe-Ni-Cr

Сопротивление металлов снижается при понижении температуры; при температурах порядка нескольких кельвинов сопротивление ряда металлов и сплавов стремится или становится равным нулю (эффект сверхпроводимости).

Удельное сопротивление сплавов. Как указывалось, примеси и нарушения правильной структуры металлов ведут к увеличению их удельного сопротивления. Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют твердый раствор, т.е. создают при отвердевании совместную кристаллизацию, и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого.

Зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих твердый раствор с неограниченной растворимостью компонентов, от процентного содержания каждого из них представлена на рис. 2.2 (кривая а). Кривая имеет максимум, соответствующий некоторому соотношению содержания компонентов в сплаве; при уменьшении содержания каждого из них ρ падает, приближаясь к

соответствующим значениям ρ чистых металлов. Обычно наблюдается определенная закономерность и в изменении $TK\rho$ (TK – температурный коэффициент): относительно высокими значениями ТКρ обладают чистые металлы, а у сплавов TKρ меньше и даже может приобретать небольшие по абсолютной величине отрицательные значения (рис.2.2, кривая б). Это объясняется тем, что у сплавов изменение ρ вызывается не только изменением подвижности носителей заряда, но в некоторых случаях и возрастанием концентрации носителей при повышении температуры.

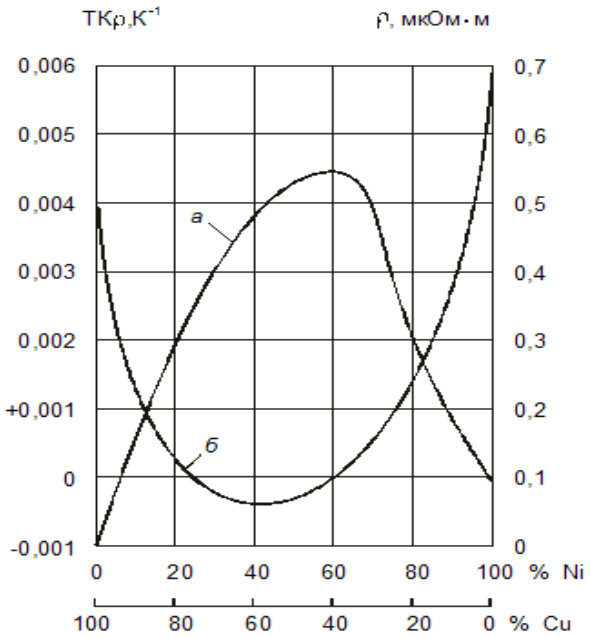


Рис.2.2. Зависимость ρ (а) и $TK\rho$ (б) сплавов системы Cu-Ni от состава (в процентах по массе)

Задачи

2.1. Удельное сопротивление серебра при комнатной температуре равно 0,015 мкОм · м, а температурный коэффициент удельного сопротивления составляет $4{,}1 \cdot 10^{-3}$ $К^{-1}$. Определить, как и во сколько раз изменится длина свободного пробега электронов при нагревании проводника от 300 до 1000 К.

2.2. Удельное сопротивление чистой меди возрастает на 10^{-8} Ом·м при добавлении 1 ат. % одновалентной примеси в твердом растворе. Предполагая распределение примесей случайным и считая, что они представляют собой сферические рассеивающие центры с эффективным диаметром в несколько ангстрем, оценить из этих данных длину свободного пробега электронов и найти приближенно сечение рассеяния примесей.

2.3. В медном проводнике под действием электрической поля проходит электрический ток плотностью 1 А/мм^2. Определить скорость дрейфа и отношение ее к средней суммарной скорости движения электронов при температуре 300 К.

2.4. По проводнику с площадью сечения 30 мм^2 течет ток. Средняя скорость дрейфа свободных электронов 0,28 мм/с, а их концентрация $7{,}9 \cdot 10^{27}$ м$^{-3}$. Найти силу и плотность тока в проводнике.

2.5. По проводнику сопротивлением 10 Ом за 1 мин прошел электрический заряд 50 Кл. Найти напряжение, приложенное к концам проводника.

2.6. По проводнику с площадью поперечного сечения 1 мм^2 течет ток силой 5 А. Найти среднюю скорость направленного движения электронов, если в 1 см^3 металла содержится $4 \cdot 10^{22}$ свободных электронов.

2.7. Определить время, в течение которого электрон пройдет расстояние 1 км по медному проводу, если удельное сопротивление меди 0,017 мкОм·м, а разность потенциалов на концах проводника U=220 В. За какое время электрон пролетит это же расстояние, двигаясь без соударений, при той же разности потенциалов? Каково время передачи сигнала?

2.8. При включении в электрическую цепь проводника диаметром 0,5 мм и длиной 43 мм разность потенциалов на концах проводника

составила 2,4 В при токе 2 А. Определить удельное сопротивление материала проводника.

2.9. Медный провод длиной 1м имеет поперечное сечение 0,1 мм^2. Сопротивление провода при комнатной температуре равно 0,172 Ом. Определить удельное объемное сопротивление меди.

2.10. По никелиновому проводнику с поперечным сечением 1 мм^2 течет ток силой 0,5 А. Приложенное напряжение составляет 2 В. Определить массу проводника.

2.11. Из никелевой ленты шириной 1 см и толщиной 1 мм необходимо изготовить шунт сопротивлением 0,4 Ом. Какой длины должна быть никелевая лента, если удельное сопротивление никеля 0,068 мкОм·м?

2.12. Пленочный резистор состоит из трех участков, имеющих различные сопротивления квадрата пленки R_1 = 10 Ом; R_2 = 20 Ом; R_3=30 Ом (рис. 2.3). Определить сопротивление резистора.

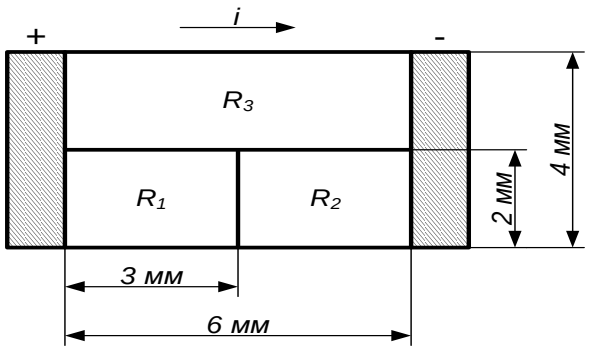


Рис.2.3. К задаче 2.12

2.13. Проволочный резистор марки ПЭТВ создан намоткой нихромового провода Х15Н60 с удельным сопротивлением ρ= 1,1 мкОм·м. Диаметр намотки составляет 1 см, длина провода – 5 см. Определить сопротивление резистора.

2.14. Углеродистый резистор и проволочный резистор, изготовленный из нихрома, имеют одинаковое номинальное сопротивление $R_{ном}$ = 100 Ом. Резисторы соединены параллельно и включены под напряжение U=50 В. Одинаковая ли мощность будет выделяться на этих резисторах?

2.15. Удельное сопротивление ρ_1 алюминиевого провода при Т=300 К составляет $2\cdot10^{-8}$ Ом·м. Найти ρ_2 при Т=700 К, если $TK\rho$ алюминия равен $4{,}2\cdot10^{-3}К^{-1}$.

2.16. Определить сопротивление нихромового провода длиной 10 м и сечением 0,1 мм^2 при комнатной температуре T_1=300 К, а также при T_2= 500 К, если при T_1 удельное объемное сопротивление ρ_1= $1{,}1\cdot10^{-6}$ Ом·м., $TK\rho$= 10^{-4} К$^{-1}$, TKl= 10^{-5} К$^{-1}$.

2.17.Удельное объемное сопротивление медного провода при комнатной температуре T_1=300 К равно ρ_1= $1{,}8\cdot10^{-8}$ Ом·м. Найти ρ_2 при Т=700 К, если $TK\rho$ меди равен $4{,}3\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

2.18. Вычислить сопротивление алюминиевого провода длиной 10 м и сечением 0,1 мм^2 при температуре T_1=300 К и его ρ_2 при Т=500 К, если известно, что ρ_1 алюминиевого провода при Т=300 К составляет $2\cdot10^{-8}$ Ом·м , а $TK\rho$ алюминия равен $4{,}3\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

2.19. Определить TKR медного провода, если его $TK\rho$ равен $4{,}3\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$, а TKl=$1{,}6\cdot10^{-5}$ К$^{-1}$.

2.20. Определить температуру нити лампочки, если при включении в сеть напряжением 220 В по ней течет ток силой 0,68 А. Сопротивление вольфрамовой нити при 300 К равно 36 Ом, а температурный коэффициент сопротивления вольфрама составляет $5{,}1\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

2.21. Вольфрамовая нить электрической лампы при температуре 2600 К имеет сопротивление 260 Ом. Чему равно ее сопротивление при комнатной температуре? Температурный коэффициент сопротивления вольфрама составляет $5{,}1\cdot10^{-3}$ К$^{-1}$.

2.22. Какова классификация материалов приборостроения по электрическим свойствам?

Ответ: 1) сильнопроводящие и слабопроводящие;

2) проводники, полупроводники, диэлектрики; 3) металлы, сплавы и непроводники.

2.23. Какова физическая природа расщепления энергетических уровней атомов в энергетические зоны при образовании твердого тела?

Ответ: 1) выполнение принципа Паули и снятие вырождения путем расщепления дискретных энергетических уровней изолированного атома в зоны при сближении атомов и образовании твердого тела;
2) корпускулярно-волновой дуализм микрочастиц; 3) слабое потенциальное взаимодействие между атомами.

2.24. Процессы возникновения свободных электронов в твердом теле обусловлены взаимодействием между:

Ответ: 1) валентной и запрещенной энергетическими зонами;
2) валентной зоной и зоной проводимости; 3) запрещенной зоной и зоной проводимости.

2.25. При увеличении частоты внешнего электрического поля свойства материалов:

Ответ: 1) не изменяются; 2) изменяются в сторону усиления проводящих свойств; 3) изменяются в сторону усиления диэлектрических свойств.

2.26. Какой тип химической связи характерен для металлов?

Ответ: 1) ковалентная; 2) металлическая; 3) ионная.

2.27. Какой тип структуры наиболее характерен для металлов и сплавов?

Ответ: 1) стеклообразный; 2) монокристаллический;
3) поликристаллический.

2.28. Каковы основные области применения металлов и сплавов в электронике и приборостроении?

Ответ: 1) изоляция компонентов; 2) создание электронно-дырочных переходов; 3) коммутация, создание резистивных элементов, изготовление деталей, конструкций, машин.

2.29. Каковы основные отличия проводниковых материалов от непроводниковых?

Ответ: 1) наличие электропроводности при температуре абсолютного нуля и увеличение удельного сопротивления с ростом температуры;
2) высокие плотность и температура плавления; 3) отсутствие электропроводности при температуре абсолютного нуля и снижение удельного сопротивления с ростом температуры.

2.30. Чем отличаются зонные энергетические диаграммы проводника, полупроводника и диэлектрика?

Ответ: 1) шириной разрешенных энергетических зон;
2) наличием примесных уровней в запрещенной зоне;
3) отсутствием запрещенной зоны у проводников; меньшей 3 эВ запрещенной зоной у полупроводников и большей 3 эВ запрещенной зоной у диэлектриков.

2.31. От чего зависят ширина разрешенной зоны и число энергетических уровней в ней?

Ответ: 1) от расстояния между атомами в твердом теле;
2) от концентрации атомов в твердом теле; 3) от величины энергии химической связи и концентрации атомов в твердом теле.

2.32. Как изменяется концентрация свободных электронов в металле при повышении температуры?

Ответ: 1) увеличивается; 2) уменьшается; 3) не изменяется.

2.33. Справедливо ли утверждение, что при высоких температурах (выше характеристической температуры Дебая) молярная теплоемкость металлов незначительно отличается от молярной теплоемкости кристаллических диэлектриков?

Ответ: 1) нет, отличается значительно; 2) справедливо; 3) не всегда, зависит от вида металла.

2.34. Почему удельное сопротивление металлов увеличивается с повышением температуры?

Ответ: 1) растет концентрация свободных электронов;
2) уменьшается концентрация свободных электронов;

3) уменьшаются длина свободного пробега и подвижность свободных электронов.

2.35. Как меняется средняя длина свободного пробега электронов в идеально чистом металле при увеличении температуры (от абсолютного нуля)?

Ответ: 1) не изменяется; 2) не изменяется, затем уменьшается; 3) вначале увеличивается, затем уменьшается.

2.36. Почему металлические сплавы типа твердых растворов обладают более высоким удельным сопротивлением, чем чистые компоненты, образующие сплав?

Ответ: 1) в чистых компонентах концентрация электронов проводимости выше; 2) в чистых компонентах подвижность носителей заряда выше, поскольку атомы каждого компонента в сплавах типа твердых растворов по отношению к другому являются дефектами структуры и снижают подвижность; 3) из-за влияния высокой температуры при сплавлении чистых веществ.

2.37. Почему при термической закалке удельное сопротивление металлов возрастает, а при термическом отжиге - уменьшается?

Ответ: 1) при закалке уменьшается концентрация дефектов структуры (подвижность носителей заряда растет), а при отжиге увеличивается (подвижность носителей заряда снижается); 2) при закалке возникают дополнительные дефекты структуры (подвижность носителей снижается), а при отжиге дефекты устраняются, структура становится более однородной (подвижность носителей растет); 3) при закалке снижается концентрация электронов проводимости, а при отжиге – увеличивается.

2.38. Какими преимуществами и недостатками по сравнению с медью обладает алюминий как проводниковый материал.

Ответ: 1) более низкая стоимость и более высокое удельное сопротивление; 2) более высокая стоимость и более высокая рабочая

температура; 3) более низкая стоимость и более низкое удельное сопротивление.

2.39. Назовите неметаллические проводниковые материалы.

Ответ: 1) окисел бария; 2) полоний; 3) графит.

2.40. Каким образом обеспечиваются прочность и формоустойчивость вольфрамовых нитей и спиралей при высоких температурах эксплуатации?

Ответ: 1) созданием окислительной среды в баллоне;
2) отсутствием кислорода в баллоне с целью предотвращения окисления; 3) покрытием медью.

2.41. При каких условиях может быть нарушено состояние сверхпроводимости проводника?

Ответ: 1) при повышении температуры выше критической; 2) при воздействии электромагнитного поля с частотой выше критического значения; 3) при превышении напряженности постоянного магнитного поля критического значения.

ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ

Постоянная Планка $h = 6{,}623 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Приведенная постоянная Планка $\hbar = h/2\pi = 1{,}054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

Постоянная Больцмана $k = 1{,}380 \cdot 10^{-23}$ Дж/град $= 8{,}63 \cdot 10^{-5}$ эВ/град

Тепловая энергия при $T = 300$ К $kT = 0{,}0256$ эВ

Газовая постоянная $R = 8{,}31$ Дж/моль·град

Скорость света $c = 3 \cdot 10^{8}$ м/с

Число Авогадро $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ молекул/моль

Масса покоя электрона $m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг

Масса протона $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ кг

Заряд электрона $e = -1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вихров С.П., Холомина Т.А. Свойства и применение металлов и полупроводников. учеб. пособие. – Рязань: РГРТА, 2004. – 84 с.

2. Вихров С.П., Холомина Т.А. Металлы и сплавы: свойства и применение: учеб. пособие. – Рязань: РГРТА, 2013. – 96 с.

3. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2004. – 519 с.

4. Мозберг Р.К. Материаловедение. Пособие для самостоятельной работы и контроля текущей успеваемости : учеб. пособие для вузов. – М. : Высш. шк., 1976. – 126 с.

5. Марцинковская Е.С. Контрольные задания по технологии металлов и конструкционным материалам. – М.: Высш шк., 1989. – 79 с.

6. Технология металлов и конструкционных материалов / Б.А. Кузьмин, Ю.Е. Абраменко, В.К. Ефремов и др.; под ред. Б.А. Кузьмина. - М.: Машиностроение, 1981. - 351 с.

7. Материаловедение. учеб. пособие/ сост. С.П.Вихров, Т.А.Холомина; под ред. Ю.М.Солдака. - Рязань: РГРТУ, 2006. - 160 с.

8. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения: пер. с англ. К.М. Зотовой, Д.О.Чаркина; под ред. В.П.Зломанова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 400 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ…….. .. 3
1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ
1.1. Диаграммы состояния сплавов…….. 4
Задачи…… 8
1.2. Сплав железо - углерод…….. 14
Задачи…… 18
1.3. Термическая и химико-термическая обработки стали….. 21
Задачи…….. 28
1.4. Выбор конструкционного материала для конкретного назначения……..... 43
Задачи…….. 57
2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ..... 71
Задачи……. 75
ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ 82
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК…….. 83

Х о л о м и н а Татьяна Андреевна

З у б к о в Михаил Владимирович

Свойства и применение металлов и сплавов

Редактор Р.К.Мангутова

Корректор С.В.Макушина

Подписано в печать 30.06.14. Формат бумаги 60х84 1/16.

Бумага газетная. Печать трафаретная. Усл печ. л. 5,25.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Оператор ЭДО ООО "Компания "Тензор"

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

ПОДПИСАНО **ФГБОУ ВО "РГРТУ", РГРТУ,** Литвинов Владимир Георгиевич, Заведующий кафедрой МНЭЛ **06.11.26** 14:18 (MSK) Простая подпись