

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
«3» *августа* 2017 г.



РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Методические указания к практическим занятиям по
дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение»
для студентов электротехнических направлений подготовки и
специальностей всех форм обучения

Курск 2017

УДК 620.1:621.315

Составители: Н.М. Гайдаш

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Ю.А. Артеменко*

Расчет электрических параметров диэлектриков: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение» для студентов электротехнических направлений подготовки и специальностей всех форм обучения / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Н.М. Гайдаш. - Курск, 2017. 20 с.: ил. 5. - Библиогр.: с. 20.

Содержат рекомендации для подготовки к практическим занятиям по расчету электрических параметров диэлектриков: диэлектрической проницаемости, напряжения теплового пробоя, емкости конденсатора с твердым диэлектриком. Могут быть использованы при подготовке к экзамену по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».

Предназначены для студентов электротехнических направлений подготовки и специальностей.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *3.04.17* Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. *1,0*. Уч.-изд.л. *0,9*. Тираж 30 экз. Заказ *443* Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Практическое занятие 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК МЕТАЛЛОВ

Цель занятия: научиться определять параметры кристаллических решеток: период, координационное число, плотность упаковки.

1. Общие положения

В твердом состоянии металл представляет собой постройку, состоящую из положительно заряженных ионов, омываемых «газом» из свободных коллективизированных электронов. Связь в металле осуществляется электростатическими силами. Между ионами и коллективизированными электронами проводимости возникают электростатические силы притяжения, которые стягивают ионы. Такая связь называется металлической.

Силы связи в металлах определяются силами отталкивания и силами притяжения между ионами и электронами. Атомы (ионы) располагаются на таком расстоянии один от другого, при котором энергия взаимодействия минимальна. Как видно из рис. 1, этому положению соответствует равновесное расстояние a_0 . Сближение атомов (ионов) на расстояние, меньшее a_0 , или удаление их на расстояние, большее a_0 , осуществимо лишь при совершении определенной работы против сил отталкивания и притяжения.

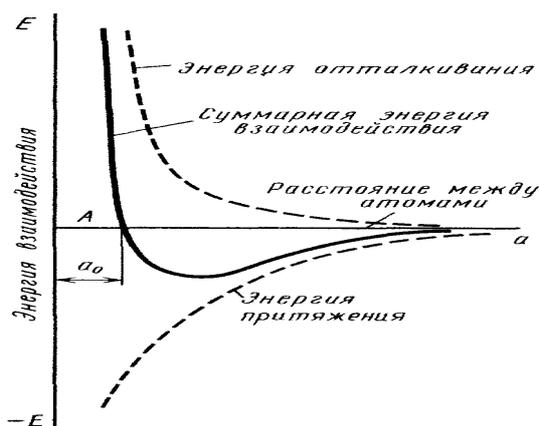


Рисунок 1. Схема энергии взаимодействия двух атомов в зависимости от межатомного расстояния

Поэтому в металле атомы располагаются закономерно, образуя правильную кристаллическую решетку, что соответствует минимальной энергии взаимодействия атомов.

Кристаллическая решетка (рис. 2) состоит из воображаемых линий и плоскостей, проходящих через точки расположения ионов в пространстве (Ионы в узлах кристаллической решетки колеблются с частотой порядка 10^{13} колебаний в секунду. Это движение не прекращается даже при температуре, близкой к абсолютному нулю). Жирными линиями выведен наименьший параллелепипед, последовательным перемещением которого вдоль трех своих осей может быть построен весь кристалл.

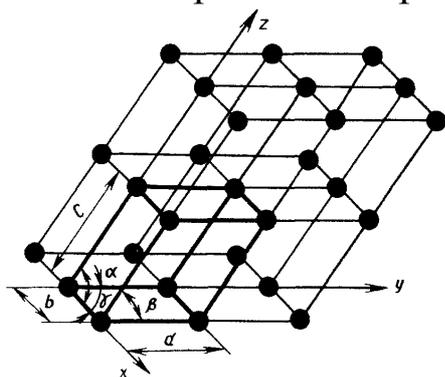


Рисунок 2. Схема кристаллической решетки

Этот наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме, получил название элементарной кристаллической ячейки.

Большинство металлов образует одну из следующих высоко-симметричных решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемно центрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную (рис. 3).

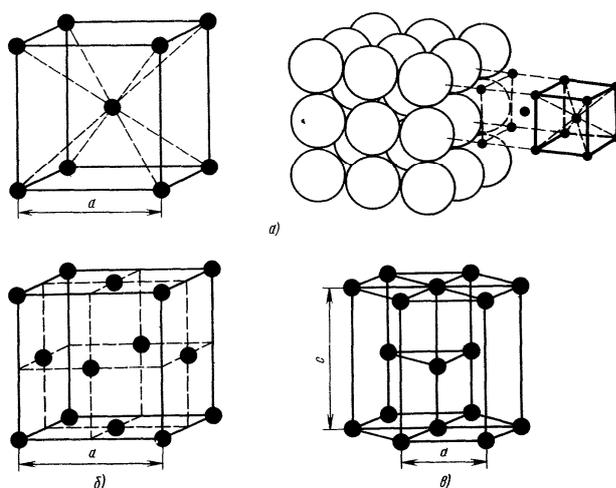


Рисунок 3. Кристаллические решетки металлов: а – объемно-центрированная кубическая (ОЦК); б - гранецентрированная кубическая (ГЦК); в - гексагональная плотноупакованная (ГПУ)

Как видно из рисунка 3, а, в кубической объемно центрированной решетке (ОЦК) атомы расположены в вершинах куба и один атом в центре объема куба. Кубическую объемно центрированную решетку имеют металлы: К, Na, Li, Ti_β, Zr_β, Ta, W, V, Fe_α, Cr, Nb, Ba и др.

В кубической гранецентрированной решетке (ГЦК) атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани (рис. 3, б). Решетку такого типа имеют металлы: Ca_α, Ce, Sr_α, Pb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Fe_γ, Cu, Co_α и др.

В гексагональной решетке (рис. 3, в) атомы расположены в вершинах и центре шестигранных оснований призмы, а три атома - в средней плоскости призмы. Такую упаковку атомов имеют металлы: Mg, Ti_α, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Co_β, Be, Ca_β и др.

Расстояния а, б, с между центрами ближайших атомов в элементарной ячейке (см. рисунок 2) называются периодами решетки. Период решетки выражается в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Периоды решетки для большинства металлов находятся в пределах 0,1 - 0,7 нм.

На одну элементарную ячейку объемно центрированной решетки приходится два атома: один в центре куба и другой вносят атомы, располагающиеся в вершинах куба (каждый атом в вершине куба одновременно принадлежит восьми сопряженным элементарным ячейкам и на данную ячейку приходится лишь $1/8$ массы этого атома, а на всю ячейку $1/8 \times 8 = 1$ атом).

На элементарную ячейку гранецентрированной кубической решетки приходится четыре атома; из них один (по такому же расчету, как и для объемно центрированной кубической решетки) вносят атомы в вершинах куба, а три суммарно ($(1/2) \times 6 = 3$) вносят атомы, находящиеся на середине грани, так как каждый из таких атомов принадлежит двум решеткам.

На элементарную ячейку гексагональной плотноупакованной решетки приходится шесть атомов ($3 + (1/6) \times 12 + (1/2) \times 2 = 6$).

Плотность кристаллической решетки - объема, занятого атомами, которые условно можно рассматривать как жесткие шары (см. рисунок 3, а), характеризуется координационным числом, под которым понимают число атомов, находящихся на равном и наи-

меньшем расстоянии от данного атома. Чем выше координационное число, тем больше плотность упаковки атомов.

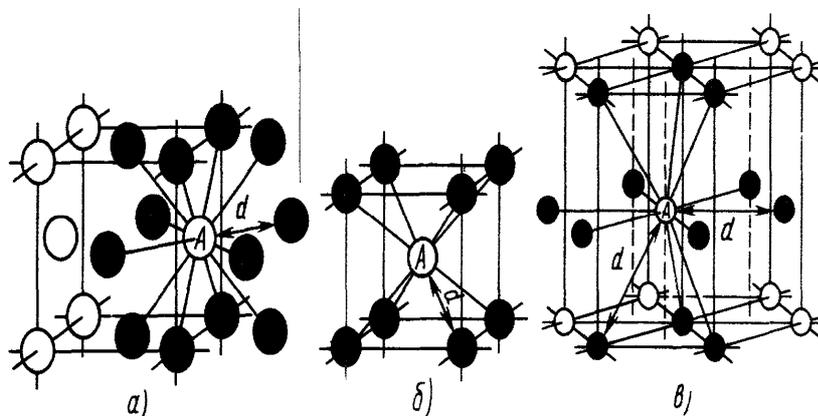


Рисунок 4. Схема, показывающая число атомов, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от данного атома А в разных кристаллических решетках (С. С. Штейнберг): а - К8; б - К12; в - Г12

В элементарной ячейке объемно центрированной кубической решетки наименьшее расстояние между атомами соответствует $d=0,5a\sqrt{3}$. На этом расстоянии от данного атома находятся 8 соседей (рис. 4, а). Следовательно, координационное число для ОЦК решетки соответствует 8 и обозначается К8. Коэффициент компактности ячейки, определяемый как отношение объема, занятого атомами, к объему ячейки составляет для ОЦК решетки 68%.

Для гранецентрированной кубической решетки координационное число равно 12 (К12); каждый атом имеет 12 ближайших соседей на расстоянии $d=0,5a\sqrt{2}$ (рис. 4, б), что соответствует наибольшей плотности упаковки или укладки в виде шаров.

Гексагональная плотноупакованная решетка, для которой $c/a=1,633$, имеет координационное число 12 (Г12), что также соответствует наибольшей плотности упаковки шаров (атомов) (рис. 4, в). У многих металлов, кристаллизующихся в гексагональной системе, отношение c/a находится в пределах 1,57-1,64, т. е. может отклоняться от плотнейшей упаковки, при которой $c/a=1,633$. Если отношение c/a значительно отличается от 1,633 (например, для цинка и кадмия), то координационное число гексагональной решетки соответствует 6.

Гранецентрированная кубическая и гексагональная плотноупакованная ($c/a=1,633$) решетки — наиболее компактные; в них коэффициент компактности равен 74%.

При уменьшении координационного числа в гексагональной решетке с 12 до 6 коэффициент компактности составляет около 50%, а при координационном числе 4 — всего около 25%.

2. Необходимые инструменты и материалы

1. Справочник с рисунками различных видов кристаллических решеток металлов.

2. Миллиметровая бумага, линейка.

3. Порядок выполнения работы

1. Построить кристаллические решетки для металлов: Ta, W, V, Ni, Ag, Au, Mg, Ti_{α} , Cd, Re, Os, Ru, Zn. Определить для каждого вида решетки: период, координационное число.

Практическое занятие 2 ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель занятия:

- изучить методы определения твердости металлов;
- рассчитать число твердости по Бринеллю (размер отпечатка по заданию преподавателя)

1. Общие положения

1.1 Методы измерения твердости металлов

Одним из широко распространенных видов испытания металлов является определение твердости. Твердость металла можно определять прямыми и косвенными методами. Прямые методы испытания на твердость состоят в том, что в образец вдавливают специальный твердый наконечник (из закаленной стали, алмаза или твердого сплава) различной формы (шарик, конус, пирамида). После снятия нагрузки остается отпечаток, величина которого характеризует твердость образца. При косвенных методах оцениваются свойства металла, пропорциональные его твердости. Испытания на твердость могут быть статическими и динамическими. К первому виду относятся испытания методом вдавливания, ко второму — методом ударного вдавливания. В зависимости от характера и способа

приложения нагрузки твердость косвенно характеризует различные механические свойства металлов. Если наконечник вдавливается в образец, то твердость характеризует сопротивление пластической деформации. Если наконечник царапает образец, то твердость характеризует сопротивление разрушению. Твердость, определенная по отскоку наконечника, характеризует упругие свойства металла образца. По значению твердости металла можно составить представление о его свойствах. Например, чем выше твердость, определенная вдавливанием наконечника, тем меньше пластичность металла, и наоборот.

Метод измерения твердости имеет ряд преимуществ перед другими методами механических испытаний металла: простота техники и быстрота испытаний, простота формы и небольшие размеры образцов, возможность проводить испытание непосредственно на изделии без его разрушения.

Твердость определяют на специальных приборах – твердомерах. Твердомеры бывают стационарные и переносные. Принципиальное устройство твердомеров для всех методов испытаний на твердость одинаково.

Основными узлами твердомеров являются станина, рабочий столик, наконечник (узел, состоящий из оправки и индентора), нагружающее устройство, прибор для измерения величины деформации.

Общая схема испытания такова: деталь или образец помещают на рабочем столике, с помощью нагружающего устройства в образец вдавливают индентор и после снятия нагрузки определяют твердость.

В зависимости от цели испытания, свойств испытуемого металла, размеров образца выбирают форму, размер и материал индентора, величину и длительность приложения нагрузки.

Наиболее часто проводят определение твердости следующими методами: измерение твердости по Бринеллю – по ГОСТ 9012-59; измерение твердости по Роквеллу – по ГОСТ 9013-59; измерение твердости по Виккерсу – по ГОСТ 2999-75; измерение твердости методом ударного отпечатка – по ГОСТ 18661-73; измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников – по ГОСТ 9450-76.

Существуют общие требования к подготовке образцов и проведению испытаний:

1. Изготовление образцов и подготовка поверхности должны осуществляться способами, исключающими изменения свойств металла из-за нагрева или наклепа.

2. Поверхность образца должна быть чистой, без окисных пленок, следов ржавчины или окалины, трещин и прочих дефектов.

3. Образцы должны быть определенной толщины. После нанесения отпечатка на обратной стороне образца не должно быть следов деформации.

4. Образец должен лежать на столике жестко и устойчиво. В процессе испытания образец не должен смещаться или прогибаться.

5. Прилагаемая нагрузка должна действовать перпендикулярно к поверхности образца.

6. Нагрузка должна прилагаться и возрастать плавно до заданного значения, а далее поддерживаться постоянной в течение определенного времени.

1.1.1 Измерение твердости по Бринеллю

При определении твердости методом Бринелля в испытуемый образец или изделие вдавливается в течение определенного времени металлический шарик (рисунок 5).

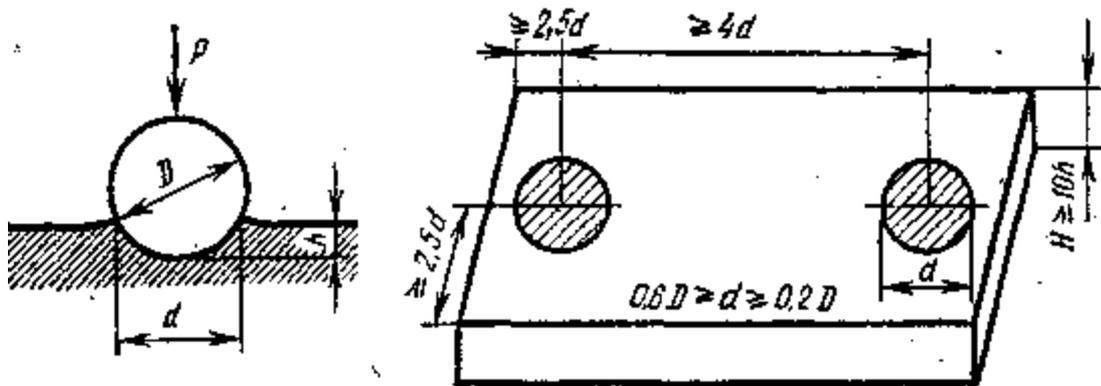


Рисунок 5. Схема расположения отпечатка при определении твердости методом Бринелля

После снятия нагрузки, на поверхности образца остается сферический отпечаток. Величина отпечатка зависит от твердости металла: чем тверже металл, тем меньше будет величина отпечатка.

Число твердости по Бринеллю обозначается HB .

Чтобы определить число твердости HB (Н/мм^2 или кг/мм^2), надо величину приложенной нагрузки P разделить на площадь отпечатка F :

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

где D – диаметр шарика, м (или мм);

d – диаметр отпечатка, м (или мм);

P – нагрузка на шарик, Н (или кг).

Чтобы не производить каждый раз вычисления, при определении числа твердости пользуются специально составленной таблицей (приложение к ГОСТ 9012-59). Зная нагрузку, диаметры шарика и отпечатка, по этой таблице можно определить число твердости HB .

Для испытания применяют шарики из закаленной стали или твердого сплава диаметром 2,5; 5,0 и 10 мм. Диаметр шарика выбирают в зависимости от толщины испытуемого образца и его твердости: чем тоньше и тверже образец, тем меньше должен быть диаметр шарика.

Обычно испытание проводят на специально подготовленной горизонтальной площадке образца. Если поверхность детали криволинейная, то на ней должна быть подготовлена плоскость размером $20 \times 20 \text{ мм}^2$ при диаметре шарика $D = 10,0 \text{ мм}$, $10 \times 10 \text{ мм}^2$ при диаметре шарика $D = 5,0 \text{ мм}$ и $5 \times 5 \text{ мм}^2$ при диаметре шарика $D = 2,5 \text{ мм}$.

Толщина испытуемого образца должна быть не меньше десятикратной глубины отпечатка. Глубину отпечатка определяют пробным испытанием или, если известен уровень твердости, по формуле:

$$H = P/\pi D^2 \cdot HB,$$

где H – глубина отпечатка, D – диаметр шарика, P – нагрузка на шарик, HB – число твердости.

Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее $2,5d$, а между центрами двух соседних отпечатков – не менее $4d$. Для получения правильных результатов диаметр отпечатка d должен находиться в пределах $0,2...0,6$ диаметра шарика D . Диаметр отпечатка d измеряют при помощи лупы или отсчетного микроскопа (рисунок 6) в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют среднее арифметическое из двух определений. Разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 2% от меньшего из них. Размер отпечатка определяют сточностью до 0,05 мм при диаметре шарика 5 и 10 мм и с точностью до 0,01 мм при диаметре шарика 2,5 мм.

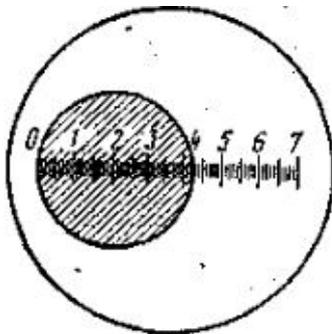


Рисунок 6. Измерение диаметра отпечатка по шкале лупы

В зависимости от твердости металла нагрузка на шарик может изменяться от 15,6 до 3000 кг. Чтобы результаты испытаний были сопоставимы при любом диаметре взятого шарика, между нагрузкой и диаметром шарика должно выдерживаться соотношение: $P = 2,5D^2$, $P = 10D^2$, $P = 30D^2$.

Длительность приложения нагрузки должна быть достаточной для прохождения деформации и возрастать с уменьшением твердости испытуемого металла от 10 до 30 и 60 с.

При выборе диаметра шарика D , нагрузки P , продолжительности выдержки под нагрузкой t и минимальной толщины образца руководствуются таблицей 1.

Таблица 1 - Выбор параметров испытания при определении твердости методом Бринелля

Материал	Интервал твердости	Минимальная толщина испытуемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой	Диаметр шарика	Нагрузка P , кг	Выдержка под нагрузкой

	в чис- лах Бри- нелля		кой Р и диа- метром шарика	D, мм		кой, сек
Чер- ные метал- лы	140- 450	от 6 до 3 от 4 до 2 < 2	$P=30D^2$	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	10
	< 140	> 6 от 6 до 3 < 3	$P=10D^2$	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	10
Цвет- ные метал- лы	>130	от 6 до 3 от 4 до 2 < 2	$P=30D^2$	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	30
	35-130	от 9 до 3 от 6 до 3 < 3	$P=10D^2$	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	30
	8-35	> 6 от 6 до 3 < 3	$P=2,5D^2$	10,0 5,0 2,5	250 62,5 15,6	60

Запись результатов испытания проводится следующим образом. Если испытание проводится шариком диаметром $D = 10$ мм под нагрузкой $P = 3000$ кг с выдержкой 10 с, то записывается число твердости с символом *НВ*. Например, твердость стали *НВ 350*. Если условия испытания иные, то это показывается соответствующими индексами. Например, число твердости 230 и испытание проводилось шариком диаметром 5,0 мм при нагрузке 750 кг с выдержкой под нагрузкой 10 с. В этом случае результаты записываются так: *НВ 5/750/10/230*.

Схема прибора для определения твердости по методу Бринелля приведена на рисунке 7.

На подвеску 1 устанавливают набор грузов 13. Сама подвеска создает нагрузку 1875 Н (187,5 кг). В наборе имеются грузы а, б и в, создающие нагрузки 625 Н (62,5 кг), 2500 Н (250 кг), 5000 Н (500 кг) соответственно. В шпинделе 9 закрепляют наконечник с шариком 8. Образец 7 устанавливают на столик 6. Вращением штурвала 5 приводят в движение винт 4 и прижимают образец к шарiku до совпадения указателя 10 с риской, при этом создается

предварительная нагрузка 1000 Н (100 кг). После этого нажатием кнопки включают электродвигатель 2, через эксцентрик 3 и шатун 11 опускается рычаг 12 с нагруженной подвеской 1. При этом нагрузка передается на шарик и последний вдавливается в образец в течение установленного времени, после которого рычаг с грузами поднимается, снимая нагрузку с шарика. Вращением штурвала 5 против часовой стрелки опускается столик 6. Образец снимают и измеряют оставшийся отпечаток.

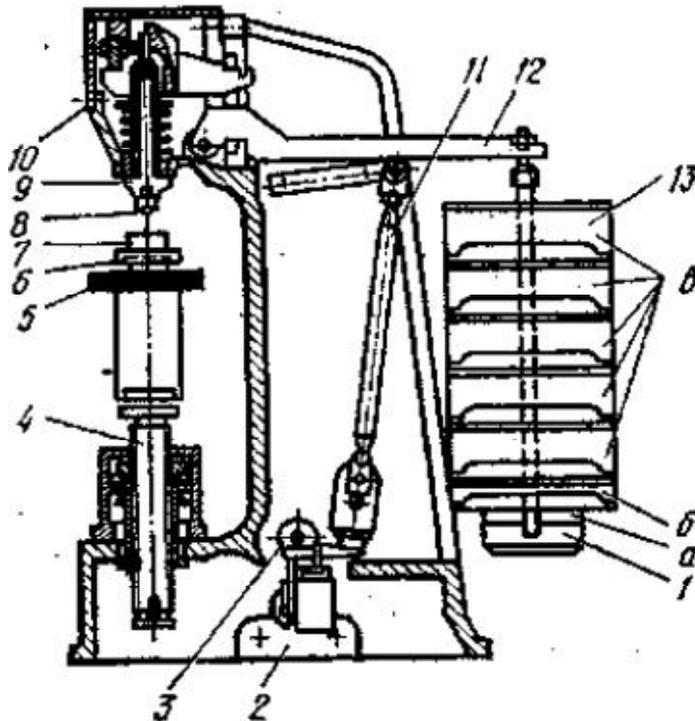


Рисунок 7. Схема прибора ТШ-2

1.1.2 Измерение твердости по Роквеллу

При измерении твердости этим методом алмазный конус или стальной шарик вдавливаются в испытуемый образец под действием общей нагрузки P . Причем сначала прилагается предварительная нагрузка P_0 , а затем основная – P_1 , т.е. $P = P_0 + P_1$. Твердость определяют по глубине отпечатка (рисунок 8).

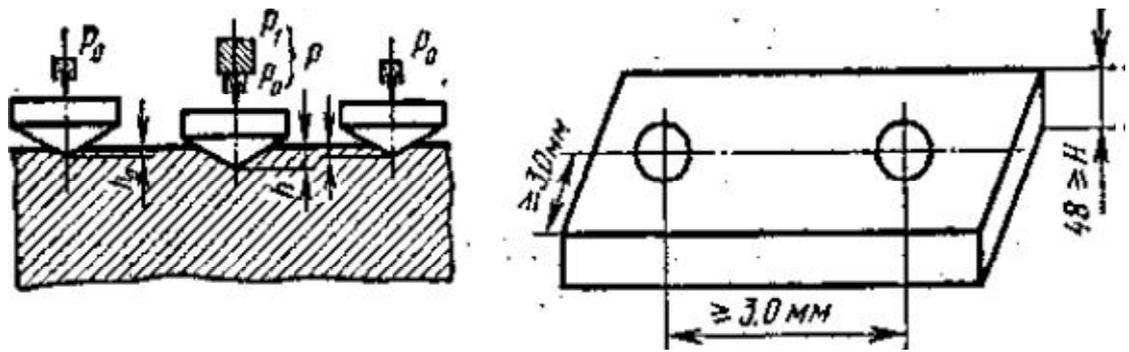


Рисунок 8. Схема испытания на твердость по методу Роквелла

За единицу твердости по Роквеллу принята условная величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. В зависимости от твердости испытуемого образца испытание проводят вдавливанием алмазного конуса или шарика при различной величине основной и общей нагрузки. При испытании твердость можно измерять по трем шкалам: *A*, *B* и *C* (табл. 2).

Таблица 2 - Выбор параметров при определении твердости методом Роквелла

Шкала	Число твердости	Индентор	Нагрузка, кг			Пределы измерения в ед. тверд. по Роквеллу, HR
			P_0	P_1	P	
A	HRA	Стальной конус	10	50	60	70...85
B	HRB	Стальной шарик	10	90	100	25...100
C	HRC	Алмазный конус	10	140	150	20...67

Поверхность для испытания может быть плоской и криволинейной. Радиус кривизны поверхности должен быть не менее 15 мм. Минимальная толщина образца должна быть не меньше восьмикратной глубины внедрения индентора после снятия основной нагрузки P_1 . При измерении твердости расстояние между центрами двух соседних отпечатков или расстояние от центра отпечатка до

края образца должно быть не менее 3,0 мм. На каждом образце проводят не менее трех измерений.

Схема прибора для измерения твердости по методу Роквелла показана на рисунке 9.

В зависимости от твердости испытываемого образца выбирают нагрузку и индентор (см. табл. 2). Нагрузку обеспечивает набор грузов, состоящий из одного постоянного 13 и двух переменных 12 и 11, каждый из которых дает соответственно нагрузку 500 Н (50 кг), 400 Н (40 кг) и 500 Н (50 кг). Твердость образца определяют по шкале индикатора 9.

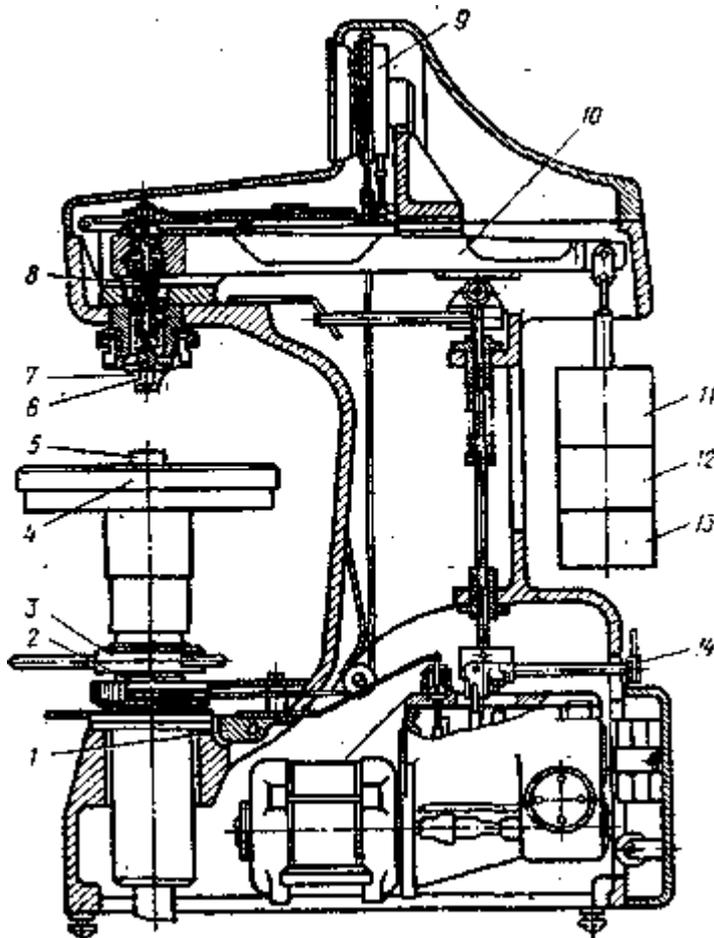


Рисунок 9. Схема прибора ТК-2

При испытании алмазным конусом под нагрузкой 1500 Н (150 кг) отсчет производят по черной шкале *C*, а под нагрузкой 600 Н (60 кг) – по черной шкале *A*; при испытании стальным шариком отсчет производят по красной шкале – *B*. В шпиндель 8 закрепляют оправку с индентором 6. Образец 5 устанавливают на столик 4, и, вращая по часовой стрелке маховик 3, поднимают столик до упора

образца в ограничительный чехол 7 индентора, что создает предварительную нагрузку 100 Н (10 кг). В момент упора образца в ограничительный чехол маленькая стрелка индикатора (рис. 10,а) должна дойти до точки, а большая стрелка установиться около нуля черной шкалы С. Совмещают большую стрелку индикатора с нулем шкалы С, вращая барабан 2. Такое совмещение производится при испытании всеми инденторами с любыми нагрузками. При нажатии на клавишу 1 электродвигатель опускает рычаг 10 с подвеской и грузами – создается общая нагрузка: предварительная + основная. При этом индентор углубляется в образец, а большая стрелка индикатора поворачивается против движения часовой стрелки (рис. 10,б).

Длительность цикла испытания устанавливают рукояткой 14. Нормальный цикл испытания занимает 4 с, а ускоренный – 2 с. После окончания вдавливания основная нагрузка автоматически снимается. При этом большая стрелка индикатора поворачивается по часовой стрелке и указывает на соответствующей шкале число твердости по Роквеллу (рис. 10,в). Вращая маховик 8 против часовой стрелки, опускают стол 4 и освобождают образец 5.

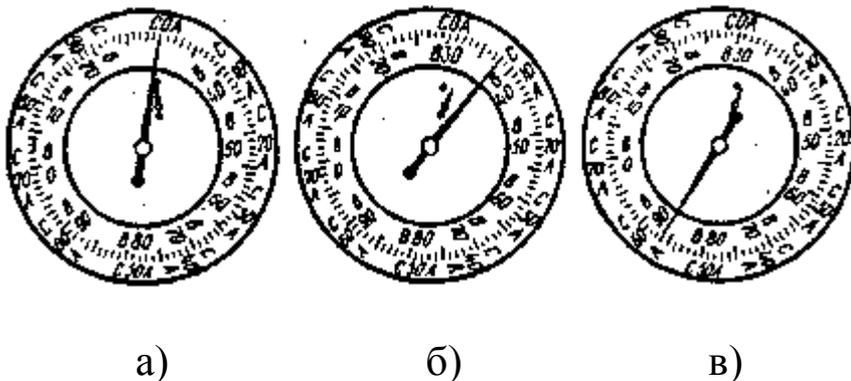


Рисунок 10. Шкала индикатора прибора ТК-2

2. Материалы, применяемые в работе

1. Справочная литература по механическим испытаниям материалов

3. Порядок определения твердости по Бринеллю

1. Пользуясь таблицей 1, определяют нагрузку и диаметр шарика в зависимости от толщины образца.

2. Устанавливают испытуемый образец на столик шлифованной поверхностью кверху. Центр отпечатка должен находиться от края образца на расстоянии не менее диаметра шарика. Каждое последующее испытание надо проводить на расстоянии не менее двух диаметров отпечатка.

3. Доводят образец до соприкосновения с шариком вращением маховика по часовой стрелке до полного упора.

4. Включают электродвигатель нажатием кнопки пускателя мотора и следят за ходом испытания. Нагрузка на образец, выключение мотора и освобождение образца от нагрузки происходят автоматически.

5. Опускают столик с испытуемым образцом вращением маховика против часовой стрелки.

6. Получают на том же образце еще один отпечаток.

7. Диаметры отпечатков измеряют при помощи лупы Бригелля в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берут среднее арифметическое из двух измерений.

8. Результаты замеров заносят в таблицу 3.

Таблица 3- Результаты измерения твердости по Бринеллю

№ образца	Диаметр, мм	Нагрузка, Н	Диаметры отпечатков, мм			НВ
			d ₁	d ₂	d _{ср}	

Твердость по Бринеллю для ряда металлов связана эмпирической зависимостью с пределом прочности при растяжении σ . Для ковальной и катаной углеродистой стали – $\sigma = 0,36 \cdot HB$; для легированных сталей – $\sigma = (0,33 \dots 0,35) \cdot HB$; для стального литья $\sigma = (0,30 \dots 0,40) \cdot HB$.

4. Порядок измерения твердости по Роквеллу

1. По предполагаемой величине твердости образца определить шкалу (A, B или C), по которой следует измерять твердость.

2. Установить необходимую нагрузку и индентор.

3. Довести образец до соприкосновения с наконечником при помощи маховика.

4. Создать предварительную нагрузку в 10 кг, для чего вращением маховика продолжать подъем столика до тех пор, пока ма-

лая стрелка индикатора не окажется против красной точки на шкале, а большая не станет примерно в вертикальное положение.

5. Вращать барабан вместе с циферблатом до тех пор, пока для наконечника (шарика или алмазного конуса) нуль черной шкалы не совпадет с большой стрелкой (вращение барабана передается циферблату индикатора тросиком).

6. Включить основную нагрузку, для чего включить электрический привод, время приложения основной нагрузки 5...7 с (основная нагрузка снимается автоматически).

7. Записать число твердости по Роквеллу (цифру, которую указывает на шкале циферблата большая стрелка). При этом, если ее наконечником является алмазный конус, отсчет делают по черной шкале циферблата, если шарик – по красной.

8. Разгрузить образец полностью, для чего необходимо вращать маховик против часовой стрелки, столик прибора с образцом при этом опускается.

9. Испытание повторить на одном образце не менее трех раз. За число твердости принять среднее из трех последних. Результат первого испытания не учитывать. Полученные значения занести в таблицу 4.

Таблица 4 - Результаты измерения твердости по Роквеллу

№ образца	Материал	Шкала (А,В,С)	Нагрузка, Н	Тип индентора	Твердость, НR	
					Числа твердости	Среднее

1.1.3 Измерение микротвердости на приборе ПМТ-3

Для определения микротвердости используется прибор ПМТ-3, разработанный М.М. Хрущевым и Е.С. Берковичем, испытание на котором основано на методе вдавливания. В качестве индентора в этом методе применяется четырехгранная алмазная пирамида (с углом между противоположными гранями при вершине 136°). Ввиду того, что размеры отпечатка малы, предъявляются очень высо-

кие требования к качеству изготовления и форме индикатора. Такие же высокие требования предъявляются, естественно, и к прибору для измерения микротвердости.

Микротвердость измеряется следующим образом. Под действием постоянной нагрузки пирамида плавно и равномерно вдавливается в материал. Время действия нагрузки обычно выбирают равным 5-10 с. Мерой твердости материала является величина отношения приложенной нагрузки P к площади поверхности отпечатка.

Число твердости (МПа) определяется по формуле:

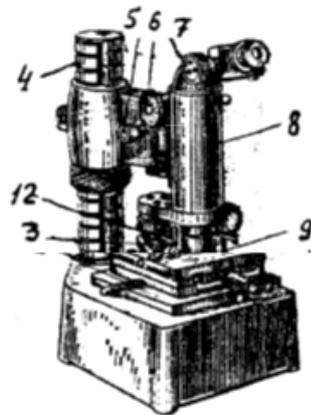
$$H_V = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 1,854 \frac{P}{d^2}$$

где P – нагрузка на пирамиду, Н;

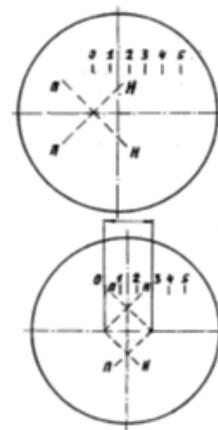
$\alpha = 136^\circ$ – угол между противоположными гранями пирамиды;

d – среднее арифметическое длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мкм (мм).

Прибор ПМТ-3 (рис. 11,а) имеет винт 4, штатив 8 вертикального микроскопа с тубусом, перемещающимся вверх и вниз вращением макрометрического винта 6 и микрометрического винта 5. На верхний конец тубуса насажен окулярный микрометр 7, а в нижнем конце закреплен штوك 2 с алмазной пирамидой, опак-иллюминатор 9 и объектив 10. В опак-иллюминаторе имеется лампочка напряжением 6 В, которая питается от электросети через трансформатор.



а)



б)

Рисунок 11. Микротвердомер ПМТ-3: а – общий вид; б – схема измерений отпечатка

Прибор снабжен двумя объективами для просмотра микрошлифа при увеличениях в 478 и 135 раз. Окуляр увеличивает в 15 раз. Окулярный микрометр имеет неподвижную сетку, отсчетный микрометрический барабанчик и каретку с подвижной сеткой. На неподвижной сетке (Н) длиной 5 мм нанесены штрихи с цифрами и угольник с прямым углом, вершина которого совпадает с цифрой 0 (рис. 11,б). На подвижной сетке (П) нанесены угольник с прямым углом и две риски.

Нагрузка для вдавливания алмазной пирамиды создается грузами 3, устанавливаемыми на нижнем буртике штока 2.

Поверхность измеряемого образца шлифуют и полируют. Лучше всего применять электролитическое полирование, не вызывающее наклепа (упрочнения) в тонком поверхностном слое, а при необходимости образец подвергают травлению реактивами, применяемыми для микроанализа соответствующих сплавов.

Подготовленный таким способом образец (микрошлиф) устанавливают и закрепляют на столе 11 так, чтобы исследуемая поверхность была строго параллельна плоскости столика и обращена вверх. Это достигается установкой нижней части образца в пластинке и выравниванием положения образца ручным прессом.

Испытуемый образец устанавливают на столе под объектив 10, производят наводку на фокус микроскопа винтами 6 и 5. Перемещая столик с микрошлифом в двух перпендикулярных направлениях, выбирают место для определения твердости и размещают его в вершине угла неподвижной сетки (см. рис. 11,б). Затем устанавливают груз 3 на буртике штока 2 и поворачивают ручкой 1 столик против часовой стрелки на 180° от одного упора до другого для подведения выбранного участка под индентор. Поворачивать столик нужно плавно, избегая толчков при подведении его к упору.

Затем медленным (в течение 10-15 с) поворотом ручки 12 против часовой стрелки (приблизительно на 180°) опускают шток с алмазным наконечником так, чтобы алмаз коснулся образца. По окончании выдержки (5-10 с) образца под нагрузкой, поворачивая рукоятку в исходное положение, поднимают оправку с алмазной пирамидой. После того, как алмаз поднят, осторожно поворачивают столик на 180° до упора, возвращая образец в исходное положение под объектив микроскопа для измерения диагонали отпечатка.

При правильной центровке прибора изображение отпечатка окажется в поле зрения микроскопа близко к вершине угла непод-

вижной сетки. Точность совмещения места, намеченного для испытания, с местом фактического вдавливания индентора составляет 3 мкм.

Далее, вращением винтов наводки окулярного микрометра, подводят отпечаток к угольнику неподвижной сетки так, чтобы вершина угольника совпала с левым углом отпечатка. После этого вращением микрометрического барабанчика окуляра подводят вершину угольника подвижной сетки к противоположному углу отпечатка до совмещения пунктирных линий угольника подвижной сетки с гранями правой части отпечатка. При таком положении сеток (см. рис. 11,б) деления микрометрического барабанчика указывают длину диагонали отпечатка. Поворачивая окуляр на 90° , определяют длину второй диагонали и вычисляют среднюю длину диагонали. Указанные измерения полученного отпечатка производят не менее 2-3 раз.

Отсчет десятых долей миллиметра производят по цифрам, видимым в поле зрения, а сотых и тысячных – по барабану окулярного микрометра с ценой деления 0,3 мкм. После чего значение микротвердости определяется по формуле или специальным таблицам. По ГОСТ 9450-76 число микротвердости записывают без единицы измерения, например: для стали У7 микротвердость феррита $H_{\diamond} 2250$.

Практическое занятие 3

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ОЛОВО - ЦИНК» МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Цель занятия: Освоить методику определения критических точек сплавов методом термического анализа и построения диаграммы состояния.

1. Общие положения

Диаграмма состояния сплавов есть графическое изображение фазового и структурного состояния сплавов в зависимости от их состава и температуры.

Наиболее часто для экспериментального построения используют термический метод анализа, заключающийся в построении кривых охлаждения или нагрева в координатах "время - температура" и нахождение на них критических точек, т.е. температур, при которых протекают фазовые превращения.

Любое фазовое превращение, происходящее в металле или сплаве (плавление, кристаллизация, изменение кристаллической решетки в твердом состоянии) сопровождается тепловым эффектом – выделением или поглощением тепла, вследствие чего на кривых охлаждения или нагрева наблюдаются перегибы или горизонтальные площадки. Это и есть критические точки.

Кривые охлаждения (нагрева) строят с помощью термоэлектрического пирометра, состоящего из термопары и высокочувствительного гальванометра. Построение диаграммы состояния для двухкомпонентных сплавов заключается в перенесении значений критических точек с кривых охлаждения на плоскость в координатах "состав - температура" и соединении линиями перенесенных на диаграмму точек, относящихся к одному и тому же превращению.

Для построения диаграммы состояния используют чистые металлы олово и цинк и ряд их сплавов, например, 95% Sn + 5% Zn; 91% Sn + 9% Zn; 85% Sn + 15% Zn. Чем больше взято сплавов, тем точнее получается диаграмма.

Затем для каждого сплава строят кривые охлаждения и определяют на них положение критических точек. На рис. 12, а приведены кривые охлаждения вышеуказанных сплавов. На них точка 1 – критическая точка начала кристаллизации. Она называется точкой ликвидус. Выше точки ликвидус сплав находится в жидком состоянии. Точки 2' и 1' соответствуют окончанию кристаллизации и называются точками солидус. Ниже точки солидус сплав находится в твердом состоянии. Между ликвидусом и солидусом в сплаве имеются и жидкая и твердая (кристаллы Sn или кристаллы Zn) фазы.

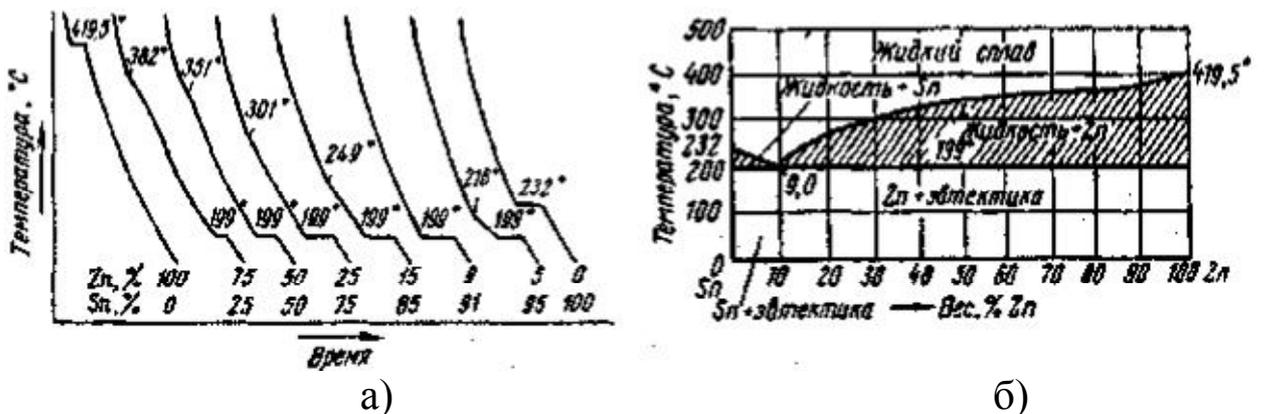


Рисунок 12. Построение диаграммы состояния «олово-цинк»:

а) кривые охлаждения чистого цинка, нескольких сплавов системы «олово-цинк» и чистого олова; б) диаграмма состояния сплавов «олово-цинк»

Найденные значения критических точек всех исследованных сплавов наносят на диаграмму в координатах "концентрация цинка – температура". Точки ликвидус соединяют линией, которая называется линией ликвидус. Точки солидус соединяют другой линией, ее называют линией солидус.

Полученная диаграмма (рис. 12,б) и есть диаграмма состояния сплавов олова с цинком. На ней линия АСВ – линия ликвидус, ДСЕ – линия солидус.

Проанализируем кристаллизацию сплавов с различным содержанием цинка, пользуясь кривыми охлаждения на рис. 12.

Сплав 1 (сплав, содержащий менее 9% Zn). Выше точки 1 сплав находится в жидком состоянии. В интервале температур между точками 1 и 2 из жидкости выделяются и растут кристаллы олова. Вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации охлаждение сплава замедляется и на кривой охлаждения (в точке 1) появляется перегиб. Концентрация цинка в жидкой части сплава из-за выделения из нее олова с понижением температуры увеличивается (меняется по линии АС).

В точке 2 ($\approx 199^\circ\text{C}$) в жидкой части сплава концентрация цинка соответствует точке С диаграммы состояния, т.е. равна 9%. При этой температуре вся жидкость состава точки С кристаллизуется с одновременным образованием очень мелких кристаллов олова и цинка. При этом выделяется значительное количество тепла, вследствие чего температура сохраняется постоянной (горизонтальная площадка 2-2' на кривой охлаждения) пока не закончится кристаллизация.

Структурная составляющая сплава, в которую закристаллизовалась при постоянной температуре (199°C) жидкость состава точки С, представляет собой механическую смесь кристаллов олова и цинка. Такая структура называется *эвтектикой*. Структура сплава 1 в твердом состоянии будет состоять из эвтектики и избыточных крупных кристаллов олова.

Сплав 2 (9% Zn). Этот сплав имеет эвтектический состав, поэтому вся жидкость кристаллизуется при постоянной, эвтектической температуре, равной 199°C . Структура сплавов в твердом состоянии полностью состоит из эвтектики.

Сплав 3 (более 9% Zn). Кристаллизация этого сплава протекает подобно сплаву 1, только избыточными кристаллами будут кристаллы цинка, а состав жидкости в интервале температур между ликвидусом и солидусом меняется по линии ВС и в точке 2 также становится эвтектическим. Структура сплава 3 после затвердевания будет состоять из эвтектики и избыточных кристаллов цинка.

Чистые металлы кристаллизуются при постоянных температурах (олово при 232°C, цинк – 419°C). Сплавы, содержащие менее 9% Zn (на диаграмме состояния – левее точки С), называются *доэвтектическими*, содержащие более 9% Zn (правее точки С) – *заэвтектическими*.

Диаграмма состояния показывает не только критические температуры сплавов, но и фазовый состав, отвечающий их равновесному состоянию (равновесное состояние характеризуется полным завершением превращений в сплавах в условиях очень медленного охлаждения).

При анализе диаграмм состояния пользуются правилом фаз Гиббса, которое выражается формулой: $C = K - \Phi + I$,

где C – число степеней свободы системы;

K – число компонентов (число элементов, образующих сплав);

Φ – число фаз;

I – внешний переменный фактор (температура).

Фазой называется химически однородная часть сплава, отделенная от других его частей поверхностью раздела, при переходе через которую состав и свойства меняются скачкообразно.

Выше линии ликвидус все сплавы находятся в однофазном состоянии (жидком), тогда $C = 2 - 1 + 1 = 2$. При двух степенях свободы в этой области может изменяться и температура и концентрация, при этом сплав остается однофазным. Между ликвидусом и солидусом существуют две фазы – жидкая и кристаллы Sn или Zn, в этом случае $C = 2 - 2 + 1 = 1$. При одной степени свободы, т.е. пока система состоит из двух фаз, независимой является только температура, каждому значению температуры соответствует строго определенный состав фаз. Когда в сплаве имеются три фазы (во время эвтектического превращения), число степеней свободы равно нулю ($C = 2 - 3 + 1 = 0$). В этом состоянии сплав может существовать только в совершенно определенных условиях: при постоянной температуре и определенном составе всех находящихся в равновесии

фаз. Это означает, что эвтектическое превращение начинается и заканчивается при одной и той же постоянной температуре.

2. Необходимые инструменты и материалы

1. Кривые охлаждения чистых металлов (Sn, Zn) и их сплавов.
2. Миллиметровая бумага, линейка.

3. Порядок выполнения задания

1. По кривым охлаждения построить диаграмму состояния сплавов «олово-цинк». В случае рассеяния критических точек, перенесенных с кривых охлаждения на диаграмму состояния, допустимо проведение средних линий.

2. Провести анализ кривых охлаждения и диаграммы состояния с применением правила фаз.

Практическое занятие 4

АНАЛИЗ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ ПО ДИАГРАММЕ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО - ЦЕМЕНТИТ

Цель занятия:

1. Пользуясь диаграммой состояния железо-цементит, научиться определять для сплавов с различным содержанием углерода температуры начала и окончания процесса первичной кристаллизации.

2. Пользуясь диаграммой состояния железоуглеродистых сплавов, научиться определять фазовые превращения происходящие в сталях и чугунах с различным содержанием углерода при охлаждении жидкого раствора до комнатной температуры.

3. Пользуясь диаграммой состояния железо-цементит, научиться определять состав сплава заданной концентрации при конкретной температуре, а также количественное соотношение фаз при этой температуре.

Теоретическая часть

Структурные превращения в сталях происходят в соответствии с диаграммой состояния $Fe-Fe_3C$ (рис. 13), которая показывает превращения, протекающие в железоуглеродистых сплавах при различных температурах в условиях медленного охлаждения.

Под равновесным состоянием сплава понимается состояние, при котором все фазовые превращения в сплаве практически закончились. Равновесное состояние в сталях обычно достигается путем полного отжига, заключающегося в нагреве доэвтектоидных и эвтектоидных сталей (содержание углерода до 0,8% включительно) выше линии GS диаграммы $Fe-Fe_3C$ на 30-50°, длительной выдержки при этой температуре и последующем охлаждении. Заэвтектоидная сталь имеет содержание углерода свыше 0,8% (до 2,14%). В соответствии с диаграммой $Fe-Fe_3C$, структура стали в равновесном состоянии, а следовательно, физико-механические свойства, определяются содержанием углерода.

Углеродистые стали в отожженном состоянии, в зависимости от содержания углерода, в общем случае имеют три структурные составляющие: феррит, цементит и перлит.

Структурной составляющей называют однородную часть структуры, наблюдаемую под микроскопом (оптическим или электронным).

Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов могут быть однофазными (в этом случае фаза и структурная составляющая по названию совпадают) или представлять собой механическую смесь двух фаз (эвтектоид, эвтектика; каждая из этих структурных составляющих состоит из двух фаз).

Фазой называют однородную часть системы (сплава), отделенную от других частей сплава поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или кристаллическая решетка сплава изменяется скачком. Фазы в сплавах определяют (идентифицируют) рентгенографическим анализом. Согласно диаграмме $Fe-Fe_3C$, в равновесных железоуглеродистых сплавах могут содержаться следующие фазы: феррит, аустенит и цементит при температурах выше линии GPSK или феррит и цементит – при температурах ниже линии GPSK, в том числе при комнатной.

Феррит (Ф) – твердый раствор углерода в α -железе (в железе с объемно-центрированной кубической решеткой). В феррите растворяется очень мало углерода: при 727°С до 0,02%, а при комнатной температуре – только до 0,006% С (растворимость углерода в феррите показывает линия PQ на рисунке 13).

Аустенит (А) – твердый раствор углерода в γ -железе (в железе с гранецентрированной кубической решеткой). Растворимость

углерода в аустените высокая: 2,14% С при 1147°C и 0,8% С при 727°C (линия ES на рис. 13).

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом, карбид железа Fe_3C . Содержание углерода в цементите составляет 6,67% по массе, или 7,5% ат.

Решетка цементита состоит из октаэдров. В центре каждого октаэдра расположен атом углерода, который окружают шесть атомов железа. Каждый атом железа принадлежит двум октаэдрам, что соответствует атомному соотношению $Fe:C = 3:1$, или формуле Fe_3C .

Согласно диаграмме $Fe-Fe_3C$ (где железо представлено левой ординатой, цементит – правой), при температурах ниже линии PSK и, следовательно, при комнатной температуре в железоуглеродистых сплавах могут присутствовать следующие структурные составляющие: перлит, ледебурит, цементит первичный, цементит вторичный, цементит третичный, феррит.

Перлит (П) представляет собой эвтектоид (продукт распада аустенита на механическую смесь двух фаз – феррита и цементита). Линия PSK диаграммы (727°C) показывает температуру эвтектоидного превращения, т.е. превращения аустенита, содержащего 0,8% углерода, в перлит.

Ледебурит (Л) – название эвтектики железоуглеродистых сплавов. Он образуется из жидкого раствора, содержащего 4,3% углерода при температуре эвтектического превращения, которая для чистых железоуглеродистых сплавов равна 1147°C (линия EF диаграммы). При температурах между 1147 и 727°C ледебурит состоит из цементита и аустенита. Поскольку при 727°C аустенит превращается в перлит, то ледебурит при температурах ниже 727°C состоит из цементита и перлита. По фазовому составу ледебурит и перлит не отличаются друг от друга – оба состоят из феррита и цементита, при этом цементит, входящий в ледебурит, называют эвтектическим, а входящий в перлит – эвтектоидным. Если цементит представляет собой самостоятельную структурную составляющую, то его называют первичным, вторичным или третичным.

Цементит первичный (Ц_I) – это кристаллы цементита, выделившиеся из жидкого раствора (при температурах в области CDF, т.е. между линиями ликвидус и солидус).

Цементит вторичный (Ц_{II}) – это цементит, выделившийся из аустенита при охлаждении между температурами 1147 и 727°C

(изменение растворимости цементита в аустените в этом же температурном интервале показано линией ES диаграммы).

Цементит третичный (Ц_{III}) – это цементит, выделившийся из феррита при охлаждении ниже 727°C (растворимость цементита в феррите при этих температурах показана линией PQ). Основа разделения по структуре железоуглеродистых сплавов на техническое железо, стали и чугуны заключается в том, что техническое железо не имеет в структуре ни перлита, ни ледебурита; в структуре сталей имеется перлит; чугуны имеют в своей структуре и перлит и ледебурит.

Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода менее 2,14%, т.е. стали, в зависимости от содержания углерода и наблюдаемых структур разделяются на следующие типы:

а) *технически чистое железо* ($\text{C} \leq 0,025\%$). Структура состоит из феррита и цементита третичного. Этот сплав характеризуется низкой твердостью и высокой пластичностью.

б) *доэвтектоидные стали* ($\text{C} = 0,025 \dots 0,8\%$). Структурными составляющими являются феррит и перлит. С увеличением содержания углерода количество зерен перлита увеличивается, твердость и предел прочности возрастают, а пластичность уменьшается.

в) *эвтектоидные стали* ($\text{C} = 0,8\%$), имеющие чисто перлитную структуру (рис. 15). Их твердость и предел прочности выше, чем у доэвтектоидной стали, а пластичность ниже.

г) *заэвтектоидные стали* ($\text{C} = 0,8 \dots 2,14\%$), имеющие структуры перлита и вторичного цементита.

Пользуясь диаграммой состояния железо – углерод, можно определить температуры начала и окончания кристаллизации для железоуглеродистого сплава с любой концентрацией. Для этого находят нужную концентрацию, в этой точке восстанавливают перпендикуляр до пересечения с линиями начала и конца кристаллизации. Из полученных точек проводят горизонтали на ось температур и получают нужные критические точки.

Состав сплава заданной концентрации при любой температуре можно определить по диаграмме состояния (рис. 13). Для этого из заданной точки нужно провести горизонталь.

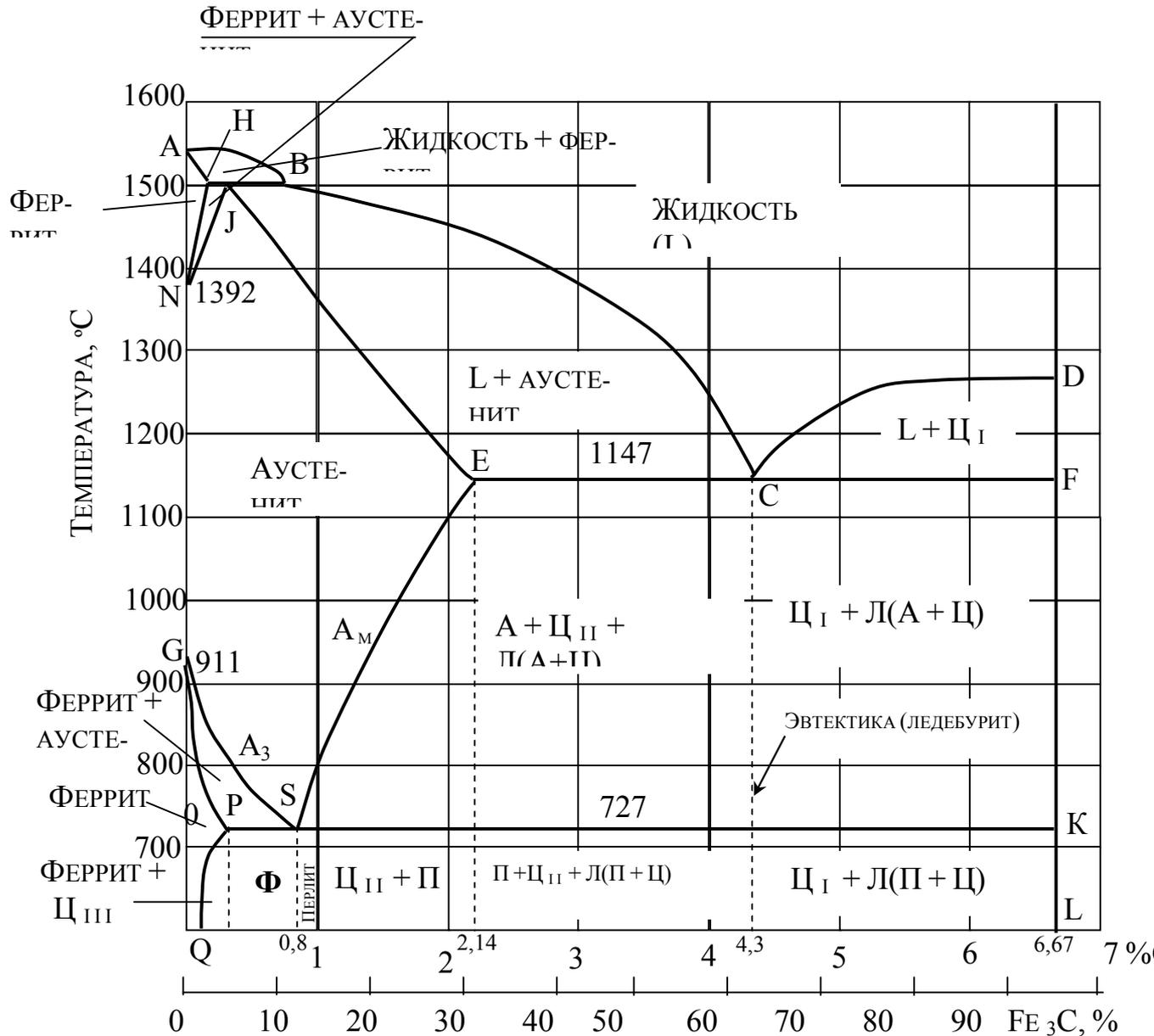


Рисунок 13. Диаграмма состояния железо-цементит

Зоны, в которые она попадает, укажут на структурные составляющие сплава.

Эвтектическому сплаву, получившему название ледебурит, соответствует на диаграмме точка С. Ледебурит является механической смесью аустенита и цементита.

Сплавы с содержанием углерода менее 4,3 % называются доэвтектическими, сплавы, у которых углерода более 4,3 %, - заэвтектическими. После окончания кристаллизации при температуре 1130 °С доэвтектические чугуны будут состоять из аустенита, цементита

и ледебурита. Заэвтектические чугуны будут состоять из первичного цементита и ледебурита.

В сталях с содержанием углерода 0,8% распад аустенита происходит при постоянной и притом самой низкой температуре 727 °С – точка S. При этом в условиях медленного охлаждения образуется механическая смесь феррита и цементита, которая называется перлитом.

Задания для практического занятия

Задание 1. Охарактеризуйте сплав с содержанием углерода 3 % при температурах 1350 и 1100 °С.

Задание 2. Пользуясь диаграммой состояния железо-цементит, определите для сплавов с содержанием углерода 0,4; 0,8; 1,3; 2,5 и 4,8 % температуры начала и окончания процесса первичной кристаллизации. Укажите состав этих сплавов между линиями ликвидуса и солидуса и после окончания кристаллизации. Какие из этих сплавов являются сталями, какие – чугунами?

Задание 3. Пользуясь диаграммой состояния железоуглеродистых сплавов, укажите, какие превращения происходят в сталях с содержанием углерода 0,45; 0,8 и 1,2 % углерода при охлаждении жидкого раствора до комнатной температуры. Для каждого превращения укажите примерные температуры.

Задание 4. Для чугунов с содержанием углерода 2,8; 4,3 и 5 % опишите все превращения с указанием соответствующих температур (начиная от жидкого раствора до комнатной температуры).

Практическое занятие 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ ПО ИХ МАРКЕ

Цель занятия: закрепить знания по маркировке сталей и чугунов, навыков определения механических свойств по марке с использованием справочной литературы.

Общие сведения, классификация и маркировка углеродистых сталей

Углеродистую сталь классифицируют по различным ее признакам. Например, по химическому составу, в зависимости от степени раскисления, по структуре, качеству и назначению.

По химическому составу различают стали углеродистые и легированные.

В зависимости от степени раскисления стали делят на кипящую, спокойную и полуспокойную. Кипящая сталь раскислена не полностью (только ферромарганцем), поэтому она при заливке в изложницу и при кристаллизации продолжает «кипеть». В результате свободного кипения из нее более полно выходят НМВ. Эта сталь отличается повышенной пластичностью, хорошо штампуется, сваривается и поэтому применяется в основном для изготовления деталей методом штамповки из листов с последующей сваркой.

Спокойная сталь полностью раскислена ферромарганцем, ферросилицием и алюминием (путем их последовательного введения); в изложнице застывает спокойно; имеет более однородный состав. Из нее изготавливают рельсы, колеса, оси, листовые рессоры, пружины, а также другие детали подвижного состава, испытывающие большие нагрузки. Такую сталь используют также для изготовления металлических пролетов мостов.

Полуспокойную сталь раскисляют в меньшей степени, чем спокойную. По свойствам она занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной.

По содержанию углерода стали подразделяют на низкоуглеродистые, среднеуглеродистые и высокоуглеродистые.

Низкоуглеродистые стали содержат углерода до 0,25 %; очень пластичны, но сравнительно малопрочны, используются для изготовления малонагруженных деталей и конструкций, в том числе сварных.

Среднеуглеродистые стали содержат углерода от 0,3 до 0,6 % и сочетают в себе достаточно высокий комплекс вязкостно-прочностных свойств. Считаются основным конструкционным материалом в общем и транспортном машиностроении. Эти стали чувствительны к росту зерна при нагреве; закаливаются в воде.

Высокоуглеродистые стали содержат углерода от 0,7 до 1,3 %; обладают очень высокой твердостью и низкими пластичностью, вязкостью и свариваемостью; используются при изготовлении мерительного, режущего и ударно-штампового инструмента, а также деталей с высокой износостойкостью. При нагреве эти стали чувствительны к росту зерна, склонны к образованию трещин при закалке в воде; в небольших сечениях (до 20 мм) закаливаются в масле.

По назначению углеродистые стали делят на конструкционные и инструментальные.

Конструкционные углеродистые стали используют в машиностроении и строительном деле. В зависимости от величины и характера нагрузки, прикладываемой к изделиям, выполненным из них, они делятся на стали обыкновенного качества и качественные.

В сталях обыкновенного качества допускается большее содержание S, P, HMB, газов и других примесей, чем в сталях качественных.

Стали обыкновенного качества в свою очередь подразделяют на три группы, свойства которых гарантируются ГОСТ 380—71 — стали группы А, группы Б и группы В.

У сталей группы А гарантируются только механические свойства. Химический состав не гарантируется. Поэтому стали этой группы можно подвергать только механической обработке; нагревать и сваривать их нельзя. Маркируются они следующим образом: СтО, Ст1 ... Ст6. Номер марки характеризует механические свойства. Гарантируемый предел прочности на разрыв σ_b находится в пределах 300—625 МПа, а относительное удлинение перед разрывом $\delta = 22—14$ %. Из этих сталей изготавливают детали для подвижного состава без термической обработки.

Стали группы Б (БСтО, БСт1 ... БСт6) выпускаются с гарантируемым химическим составом, поэтому их можно нагревать (например, дляковки), а затем с помощью термообработки исправлять нарушенную структуру и придавать необходимые механические свойства.

Стали группы В (ВСтО, ВСт1 ... ВСт6), идущие на изготовление сварных конструкций, различаются по механическим свойствам и химическому составу. К маркировке недораскисленных («кипящих») сталей прибавляют буквы кп, например, Ст1кп, БСт1кп (остальные обозначения характеризуют механические свойства).

Конструкционные углеродистые качественные стали получают при более строгом соблюдении технологии выплавки и содержание в них вредных примесей (серы и фосфора) не должно превышать 0,03 % каждого.

Их маркировка состоит из двузначного числа, указывающего на содержание углерода в сотых долях процента: 05, 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 и 85. Кроме того, выплавляют сталь марки 58 (55пп) пониженной прокаливаемости, а также

сталь с повышенным содержанием марганца (около 1 %) — 60Г, 65Г и 70Г.

Из-за высокой хрупкости конструкционные углеродистые стали содержат углерода не более 0,85 %. Буква А, стоящая в конце марки, свидетельствует об улучшенном металлургическом качестве: более полном раскислении, мелком наследственном зерне, более точном химическом составе и меньшем содержании S и P (менее 0,02 % каждого). Качественные стали имеют $\sigma_{\text{в}} = 340\text{—}800$ МПа, $\delta = 31\text{—}8\%$, $\psi = 55\text{—}30$ %. Из этих сталей изготавливают детали ответственного назначения. Низкоуглеродистые стали могут выплавляться и как «кипящие»: 10кп, 15кп, 20кп.

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

Марки качественных сталей: У7, У8, У9, У10, У11, У12 и У13. Марки высококачественных сталей: У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А и У13А. В маркировке буква У означает, что сталь углеродистая, число указывает среднее содержание углерода в десятых долях процента, буква А — улучшенное металлургическое качество (пониженное содержание S и P). Эти стали используют для изготовления мерительного, режущего и ударно-штампового инструмента.

Существует также группа углеродистых сталей специального назначения, в которой важное место занимают стали мостостроения, рельсовая, осевая, бандажная и колесная.

Сталь для мостостроения выпускают двух марок: М16С — для сварных мостовых конструкций и СтЗ — для клепаных мостов. Сталь М16С имеет большую степень раскисления, следовательно, лучшую свариваемость, чем СтЗ. Стали этих марок при температуре -20 °С должны иметь удельную ударную вязкость $\alpha_{\text{н}}$ не ниже 4 кгс·м/см²; выпускаются в виде листов, широких полос и сортового проката.

Сталь рельсовая — спокойная, полностью раскисленная; выпускают марки: М75 (0,67 - 0,80 % С) и М76 (0,69 - 0,82 % С). Рельсовая сталь М75 маркируется как сталь Р50, а М76 — как Р65. Эти стали обеспечивают высокую прочность и износостойкость в месте контакта рельса и колеса локомотива и вагона, имеют плотную

макроструктуру, без пороков усадочного характера, низкое содержание НМВ и других дефектов; предел прочности на разрыв σ_B не менее 80 кгс/мм² (для Р50) и 84 кгс/мм² (для Р65) и относительное удлинение перед разрывом δ — не менее 4 %.

Сопротивление на ударные нагрузки у рельсов определяют методом копра следующим образом. На опоры, расстояние между которыми 1 м, укладывают рельс головкой кверху и ударяют один раз грузом 1000 кгс с высоты 6,1 м (для Р50) и 7,3 м (для Р65). После испытания металл не должен содержать трещин или других признаков разрушения. Для повышения износостойкости часть рельсов подвергают термическому упрочнению объемной закалкой в масле; твердость у таких сталей НВ = 360—370 кгс/мм².

Сталь для осей локомотивов и вагонов имеет состав, близкий к стали углеродистой конструкционной качественной марки 40, и применяется в нормализованном состоянии; $\sigma_B > 56$ кгс/мм², $\alpha_n > 3$ кг·см/см². Подступичная часть и шейки осей упрочняют накаткой (наклепом).

Сталь для цельнотянутых колес близка по составу к стали марок 55 и 60. Колеса подвергают закалке с отпуском на твердость не ниже НВ = 235 кгс/мм². При этом достигается $\sigma_B = 820—102$ кгс/мм². Колеса проходят испытания на удар; завод-поставщик гарантирует качество стали в течение всего срока эксплуатации колес.

Общие сведения, классификация и маркировка легированных сталей

Легированные стали используют для изготовления тяжелонагруженных деталей ответственного назначения, так как они обладают значительно более высокими механическими характеристиками. При легировании у стали можно получать заданные свойства, в том числе отсутствующие у углеродистых сталей (например, коррозионную стойкость, жаропрочность).

Большинство марок легированных сталей приобретает высокие механические характеристики только после соответствующей термической обработки, которая приводит к фазовым превращениям и, кроме того, делает структуру сталей более мелкозернистой.

Легированные стали обладают более глубокой прокаливаемостью деталей тех же размеров, чем из углеродистых сталей. Многие их марки прокаливаются насквозь даже при больших сече-

ниях деталей. Чем больше в стали легирующих элементов (до определенной концентрации), тем выше ее прокаливаемость.

Большинство легирующих элементов снижают температуру мартенситного превращения и улучшают качество остаточного аустенита в структуре.

В зависимости от суммарного содержания легирующих элементов стали делят на низколегированные (содержание легирующих элементов до 2,5 %), среднелегированные (от 2,5 до 10 %) и высоколегированные (свыше 10 %).

В легированных сталях Fe должно быть не менее 50 %, при меньшем количестве Fe получаются сплавы с особыми свойствами. Стали считаются легированными, если они содержат Si более 0,8 % и Mn более 1 %.

По назначению легированные стали делят на конструкционные, инструментальные, стали и сплавы с особыми свойствами. В конструкционные легированные стали для улучшения их служебных свойств вводят такие химические элементы, как Cr, Ni, W, V, B и другие, а также Mn и Si в количествах, превышающих их обычное содержание в углеродистых сталях.

ГОСТом предусмотрены следующие буквенные обозначения легирующих элементов, входящих в состав сталей: марганец Mn — Г, кремний Si — С, хром Cr — Х, никель Ni — Н, молибден Mo — М, вольфрам W — В, ванадий V — Ф, алюминий Al — Ю, титан Ti — Т, бор В — Р, медь Cu — Д, ниобий Nb — Б. Эти буквы, сочетаясь с цифрами, указывают на состав легированной стали, например: 45Х, 12ХНЗА, ХВ5, 9ХС. Цифры, стоящие перед буквами, указывают на содержание углерода в сотых долях процента, если две цифры, и в десятых долях процента, если одна цифра. Отсутствие впереди букв цифр означает, что сталь содержит углерода 1 % и больше. Цифры, стоящие за буквами, указывают на среднее содержание данного легирующего элемента в процентах. Отсутствие за буквой цифры означает, что данного элемента содержится до 1 %. Стоящая в конце маркировки буква А свидетельствует о высококачественной стали, с пониженным содержанием S и P (менее 0,02 % каждого). Например, марка 12Х2Н4А обозначает, что это хромоникелевая высококачественная сталь с содержанием углерода 0,12 %, Cr — 2 %, Ni — 4 %, а в стали марки ХВ5 содержится углерода — 1 %, Cr — до 1 % и W — 5 %. Из 90 стандартных марок конструкционных легированных сталей большинство являются средне-

углеродистыми (0,25—0,45 % углерода). Используют их после улучшения свойств путем закалки и отпуска, поэтому называют улучшенными.

Наиболее распространенными среди них (среднеуглеродистых, улучшенных) являются стали: хромистые (30Х, 38Х, 40Х, 45Х, 50Х), марганцевые (30Г, 35Г, 40Г, 45Г, 35Г2, 40Г2), кремнистые (55С2, 60С2), хромоникелевые (30ХНЗА, 40ХН, 45ХН), хромкремнистые (33ХС, 38ХС), хромомарганцевые (35ХГ2, 4ХГ), хромомарганцевокремнистые (30ХГС, 30ХГСА, 35ХГСА). Эти стали используют в производстве нагруженных и сильнонагруженных деталей машин. Например, венцы тяговых зубчатых передач локомотивов изготавливают из стали марок 30ХНЗА и 45ХН с последующей поверхностной закалкой током высокой частоты. Листовые рессоры и пружины локомотивов и вагонов изготавливают из кремнистой стали 55С2 и 60С2 с последующей закалкой и отпуском.

Конструкционные легированные стали в сравнении с углеродистыми обладают более высокими вязкостно-прочностными свойствами. Это объясняется тем, что: 1) все они (кроме марганцевых сталей) имеют мелкозернистую структуру; 2) глубже прокаливаются; 3) закаливаются не в воде, а в масле (а некоторые на воздухе), благодаря чему у них образуются очень малые закалочные напряжения, и поэтому они имеют более высокие пластичность и вязкость; 4) при их отпуске требуется более высокая температура и время выдержки, чем для углеродистых сталей, вследствие чего в них полнее снимаются закалочные напряжения и вязкость оказывается выше. Кроме того, Ni и Сг, растворяясь в феррите соответственно до 5 и 3 %, повышают его прочность и вязкость, что значительно улучшает механические свойства сталей.

Инструментальные легированные стали применяют для изготовления мерительного, режущего и ударно-штамповочного инструментов. Эти стали должны быть твердыми и износостойкими, сохранять геометрические размеры в течение длительного времени. Указанные свойства достигаются в результате относительно высокого содержания углерода (0,8—1,0%) и при наличии карбидообразующих элементов, главным образом Сг. Образующаяся у них после закалки и низкого отпуска структура (мартенсит отпуска с равномерно распределенными карбидами) обеспечивает высокие режущие свойства инструмента.

Наиболее часто для изготовления режущего инструмента используют следующие марки легированной инструментальной стали: Х (для резцов), 9ХС и ХВСГ (для сверл, разверток, метчиков, плашек, фрез). В маркировке этих сталей содержание углерода указывается в десятых долях процента. Отсутствие цифры указывает на содержание углерода в количестве около 1 %. Отсутствие цифры после символов таких элементов, как Сг, Si, W, означает, что их содержание может достигать до 1,5 %.

Высоколегированные инструментальные стали, содержащие до 1 % углерода и до 25 % W, Сг, V, способны сохранять высокую твердость и резать металл при разогреве режущей кромки инструмента до 580—650 °С. Благодаря этим качествам они обеспечивают высокую скорость (до 50 м/мин) резания при точении, сверлении, фрезеровании и называются быстрорежущими сталями. Маркировка быстрорежущей стали следующая: буквой Р обозначают быстрорежущую сталь; цифры за этой буквой указывают на содержание W в процентах; содержание V и Сг маркой не указывается. Например, в стали марки Р18 содержится углерода 0,75 %, W — 18 %, V — 1,2 % и Сг — 4 %; в стали марки Р18К5Ф2 — углерода 0,9 %, W - 18 %, Со - 5 %, V - 2 % и Сг - 4 %.

Еще более высокой твердостью и режущей способностью обладают твердосплавные (металлокерамические) пластины, которыми оснащают режущий инструмент. Они превосходят быстрорежущую сталь по скорости резания и теплостойкости, которая достигает 900-1000°С. Пластины получают методом спекания при температуре 1500°С. Изготавливают их из порошков карбидов вольфрама, титана, тантала и кобальта; кобальт используют в качестве пластичной связки. Изготавливаемые металлокерамические сплавы можно разбить на три группы: 1) группа ВК (от ВК2 до ВК30) — содержит карбид вольфрама (В) и кобальт (К), количество которого указано в процентах (остальное содержание WC в процентах), например, сплав ВК15 содержит К — 15 % и WC — 85 %; 2) группа ТК — это вольфрамтитановые твердые сплавы (от Т5К12 до Т30К4); например сплав Т30К4 содержит TiC — 30 %, К — 4 %, остальное карбид вольфрама (WC — 66 %). 3) группа ТТК, например ТТ7К12 — сплав, содержащий карбиды титана и тантала 7 % (4 % TiC + 3 % TaC), 12 % кобальта и 81 % WC.

Коррозионностойкими (нержавеющими) называют стали стойкие к действию химической и электрохимической коррозии, т.

е. обладающие стойкостью к разрушающему воздействию атмосферных условий, речной и морской воды, растворов солей, кислот и щелочей. Основным легирующим элементом всех марок нержавеющей стали является Cr. На металлическом изделии при содержании Cr не менее 12 % образуется тонкая сплошная плотная пленка окисла хрома Cr_2O_3 , которая и предохраняет сталь от коррозии. При меньшем содержании Cr образуется несплошная пленка Cr_2O_3 .

Стойкость к коррозии хромистых сталей повышается при введении в их состав Ni. Поэтому различают нержавеющие стали хромистые и хромоникелевые. Например, хромистые стали 0X13, 12X13, 40X13 и хромоникелевые стали X18H10, OX18H10, OOX18H10. В маркировке «O» указывает, что содержание углерода не должно превышать 0,08 %, «OO» — не более 0,04 %, 12 и 40 — содержание углерода 0,12 и 0,4 %, соответственно, хрома в сталях — 13 %; в хромоникелевых сталях — хрома 18 % и никеля 10 %. Из указанных хромистых сталей делают лопатки паровых турбин, хирургический инструмент, предметы домашнего обихода. Стали марок X17, OX17T, X28 используют для изготовления оборудования предприятий химической и пищевой промышленности. Хромоникелевые стали марок OX18H10 и OX18H9 применяют для изготовления деталей сваркой; они работают в особо агрессивной среде. Для защиты металла от коррозии (кроме выше указанных сплавов) используют также оксидирование и фосфатирование, цинкование, хромирование, кадмирование и др.

Необходимые инструменты и материалы

1. Справочная литература.

Порядок проведения занятия

Определить вид стали, чугуна по классификации.

Расшифровать указанные марки стали, чугуна; определить механические свойства стали, чугуна.

Привести примеры применения данных марок стали и чугуна для изготовления деталей, агрегатов и узлов электроэнергетического оборудования.

Ответить на вопросы.

Практическое занятие 6 ВЫБОР РЕЖИМОВ ЗАКАЛКИ И ОТПУСКА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель занятия: научиться назначать режимы закалки и отпуска углеродистой стали, используя диаграмму состояния «железо-цементит»

Краткие теоретические сведения

При термической обработке в сплаве (стали) должны произойти необратимые изменения структуры.

Все виды термообработки разделены на группы. Первая группа: отжиг – термическая операция, заключающаяся в нагреве стали, находящейся в неравновесном состоянии и переводе ее в более равновесное состояние.

Вторая группа: закалка – нагрев стали до температуры выше 727°C и последующее быстрое охлаждением с целью перевода в неравновесное состояние.

Третья группа: отпуск – термическая операция нагрева закалённой стали до температур ниже фазовых превращений для перевода его в более равновесное состояние.

Все эти превращения в группах связаны с диаграммой состояния железо-цементит. Для сталей эта часть диаграммы состояния Fe–Ц с концентрацией углерода до точки $E(2,14\% \text{ C})$, называется «стальной» участок диаграммы (рис. 14).

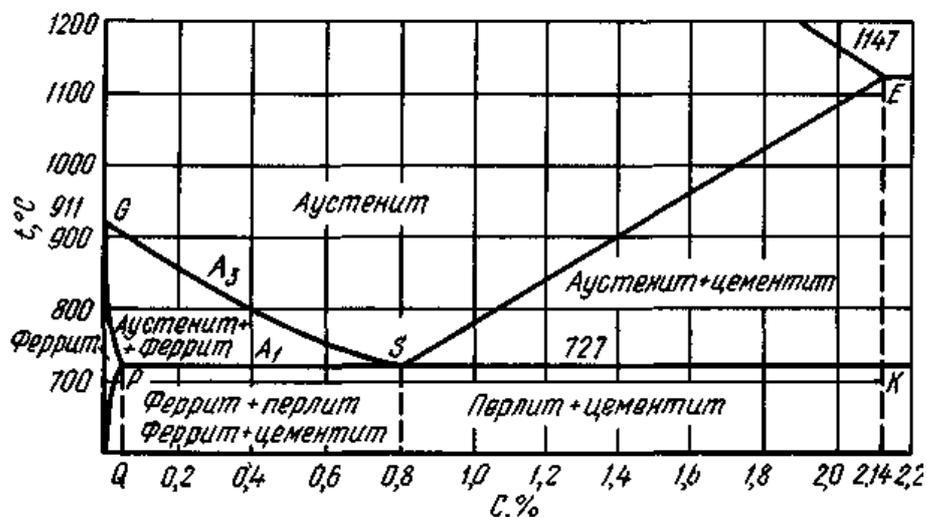


Рисунок 14. «Стальной» участок диаграммы железо-цементит

Приведём общепринятые обозначения на диаграмме. Температуры (точки) в которых происходят фазовые превращения, называются критическими. В теории термической обработки эти точки обозначаются буквой *A*.

Нижняя критическая точка, лежащая на линии *PSK*, обозначается буквой *A₁* и соответствует превращению аустенит ↔ перлит.

Верхняя критическая точка *A₃* лежит на линии *GSE* и соответствует началу выпадения феррита в доэвтектоидной стали (*GS*) или цементита вторичного (*SE*) в заэвтектоидных сталях из аустенита при охлаждении или концу их растворения при нагреве.

При охлаждении эти точки обозначают *Ar₁*, при нагревании *Ac₁* и *Ar₃* и *Ac₃*, соответственно.

Отжиг – операция термической обработки, заключающаяся в нагреве выше *Ac₃* с последующим медленным охлаждением. Такой отжиг называют полным. Если нагрев проводится в интервале температур *Ac₁ – Ac₃*, такой отжиг называется неполным. При отжиге структура сталей – равновесная $\Phi + \Pi$, Π , $\Pi + \Psi$ (после охлаждения). Медленное охлаждение проводят вместе с печью. Цель отжига – понизить твердость детали для дальнейшей обработки резанием.

Если охлаждение сталей проводить на воздухе, то такая обработка будет называться нормализацией.

Закалка – нагрев выше температур *Ac₃* с последующим быстрым охлаждением. Нагрев в интервале температур *Ac₁ - Ac₃* и последующее быстрое охлаждение называется неполной закалкой. Быстрое охлаждение проводят в воде или масле. Цель закалки – получение высокой твердости и заданных механических свойств. Способность стали принимать закалку возрастает с увеличением содержания в ней углерода. При содержании углерода 0,2% сталь практически не закаливается.

Отпуск – нагрев закалённой стали ниже *Ac₁* с последующим охлаждением с заданной температурой (обычно охлаждают на воздухе). При отпуске мартенсит закалки превращается в более равновесную структуру – ферритокарбидную смесь. Цель отпуска – уменьшить остаточные закалочные напряжения, понизить твердость и как результат - получить необходимые механические свойства.

Виды отпуска: низкий отпуск – температура нагрева до 250°C. Применяется для инструментальных сталей.

Средний отпуск – температура нагрева 350-450°C. Применяется для рессорно-пружинной стали.

Высокий отпуск – температура нагрева 450-650°C. Применяется для изделий из конструкционной стали.

Необходимые инструмент и материалы

1. Диаграмма состояния системы «железо-цементит».
2. Карандаш, линейка
3. Марочник сталей

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретическую часть, кратко записать определения закалки и отпуска, как способов термообработки, цель и технологию проведения.

2. Назначить режимы закалки и отпуска, используя диаграмму «железо-цементит» и марочник сталей (марку стали указывает преподаватель).

3. Построить график термообработки в произвольном масштабе.

Практическое занятие 7

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Цель занятия: научиться выбирать упрочняющую химико-термическую обработку (ХТО) стальных изделий для конкретных условий эксплуатации.

Общие положения

Химико-термическая обработка по сравнению с поверхностной закалкой, например высокочастотной, обладает некоторыми особенностями и преимуществами (уступая поверхностной закалке в производительности):

1. Независимость от внешней формы изделия. С одинаковым успехом можно обрабатывать и сложные, и простые по форме изделия, получая по всей поверхности упрочненный слой одинаковой толщины. При поверхностной же закалке внешняя форма изделия имеет большое значение, у многих деталей машин внешняя форма

такова, что исключает возможность применения поверхностной закалки.

2. Большое различие между свойствами сердцевины и поверхности, чем при поверхностной закалке. При химико-термической обработке разница в свойствах определяется различием в строении и в составе, а при поверхностной закалке - только различием в строении.

3. Последствия перегрева поверхности могут быть устранены последующей термической обработкой, тогда как при поверхностной закалке перегрев не может быть устранен, так как она является последней операцией.

Обычно при химико-термической обработке деталь помещают в среду, богатую элементом, который диффундирует в металл.

В случае, газового окружения (наиболее частный случай) при химико-термической обработке происходят три элементарных процесса.

Первый процесс - диссоциация. Протекает в газовой среде и состоит в распаде молекул и образовании активных атомов диффундирующего элемента.

Степень распада молекул газа (%) называется степенью диссоциации.

Второй процесс - абсорбция. Происходит на границе газ-металл и состоит в поглощении (растворении) поверхностью свободных атомов. Этот процесс возможен только в том случае, если диффундирующий элемент В способен растворяться в основном металле А.

Проникновение насыщающего элемента вглубь - диффузия. Она характеризует третий процесс.

В результате образуется диффузионный слой, на поверхности которого концентрация диффундирующего элемента наибольшая; по мере удаления от поверхности концентрация падает, глубина проникновения будет представлять собой толщину слоя.

Цементация стали

Процесс цементации известен с давних пор. До середины прошлого века сталь умели получать только методом сквозной цементации железа; в последнее время этот старый процесс, широко применяющийся и в настоящее время, подвергся научной разработке.

При цементации происходит поверхностное насыщение стали углеродом, в результате чего получается высокоуглеродистый поверхностный слой. Так как для цементации берут низкоуглеродистую сталь, то сердцевина остается мягкой и вязкой, несмотря на то, что после цементации сталь подвергается закалке.

Различают два вида цементации: твердую и газовую.

При твердой цементации детали запаковывают в ящик, наполненный карбюризатором — науглероживающим веществом. Карбюризатором является древесный уголь с различными добавками. В ящике, в промежутках между кусочками угля, имеется воздух, кислород которого при температуре процесса (900-950 °С) соединяется с углеродом, образуя окись углерода СО (образуется именно СО, а не СО₂, из-за недостатка кислорода).

Однако при температурах процесса окись углерода неустойчива и при контакте с железной поверхностью разлагается с образованием атомарного углерода, который поглощается поверхностью.

Таким образом, и при твердой цементации процесс протекает с образованием газовой фазы, т. е. цементация осуществляется газом, образовавшимся в ящике из карбюризатора.

Процесс твердой цементации - продолжительная операция и занимает в зависимости от требуемой глубины цементации часто не один десяток часов. Даже для образования слоя малой глубины, например в 1 мм, продолжительность цементации составляет несколько часов. Такая большая продолжительность процесса объясняется главным образом малой скоростью прогрева ящика, наполненного нетеплопроводным карбюризатором.

Увеличение скорости цементации достигается применением цементации в газовых средах.

При газовой цементации герметически закрытая камера печи наполнена цементирующим газом. Время на прогрев ящика и карбюризатора при этом способе цементации не затрачивается, и скорость цементации (получение заданной глубины слоя) возрастет.

Сейчас газовая цементация является для массового производства основным процессом цементации, и только для мелкосерийного или единичного производства экономически целесообразен более простой способ твердой цементации.

Газовая цементация осуществляется в стационарных или методических (непрерывно действующих) конвейерных печах. Це-

ментирующий газ приготавливают отдельно и подают в цементационную реторту.

Цементирующими газами являются окись углерода и газообразные углеводороды. Разложение этих соединений приводит к образованию активного атомарного углерода.

Наибольшее распространение в качестве газовых карбюризаторов получили предельные углеводороды - метан, пропан, бутан и др., а из них - метан в виде естественного газа (92—96 % CH_4).

Цементацию ниже критической точки A_{c1} не проводят, так как α -железо почти не растворяет углерод и при цементации ниже A_{c1} образуется лишь поверхностная корочка цементита очень небольшой толщины.

Практически цементацию проводят при 900-930°C, но имеется тенденция повысить температуру цементации до 950-970 °C и выше.

Поверхностная зона, в которой углерода больше 0,8-0,9 %, имеет структуру перлит + цементит; это так называемая заэвтектоидная зона; затем следует зона с содержанием углерода около 0,8 % - это эвтектоидная зона и, наконец, доэвтектоидная зона, содержащая углерода менее 0,7 %, плавно переходящая в структуру сердцевины.

Цементацию рекомендуется проводить так, чтобы содержание углерода в наружном слое не превышало 1,1-1,2 %. Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств вторичного цементита, сообщающего слою повышенную хрупкость.

Нормальная структура заэвтектоидной зоны - пластинчатый перлит, окаймленный тонкой сеткой вторичного цементита.

Задача цементации - получить высокую поверхностную твердость и износостойчивость при вязкой сердцевине - не решается одной цементацией. Цементацией достигается лишь выгодное распределение углерода по сечению. Окончательно формирует свойства цементованной детали последующая закалка, при которой на поверхности получается высокоуглеродистый мартенсит, а в сердцевине сохраняется низкая твердость и высокая вязкость.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретическую часть, кратко записать определения цементации, азотирования, борирования, цианирования, цель и технологию проведения.

2. Назначить ХТО, используя при этом определенную вами марку стали (химсостав стали указывает преподаватель), описать технологию проведения, структуру и свойства.

Примеры контрольных заданий

Вариант 1

Пресс-форма для литья алюминиевых сплавов под давлением содержит около 0,4 % С; 0,3 % Мо; 1 % Si; 2,5 % W, 1 % V. Запишите марку стали, назовите режим ее термической обработки, структуру и свойства. Рекомендуйте режим упрочняющей ХТО, повышающей в 1,5...2 раза эксплуатационную стойкость пресс-формы.

Вариант 2

Инструмент (зубило и топор) изготовлен из стали У7 и должен иметь микроструктуру троостита, достаточно высокую твердость рабочей части, мягкую нерабочую часть. Приведите режим и технологию упрочняющей термической обработки, обеспечивающие указанные требования.

Вариант 3

Станочный копир, для которого необходимы высокая твердость, износостойкость и повышенное сопротивление усталости, изготовили из стали, содержащей около 0,38 % С; 1,5 % Cr; 0,9 % Al и 0,2 % Мо. Определите марку стали, предложите и опишите технологию упрочнения копира, обеспечивающую высокую твердость поверхностного слоя (не менее НВ 700).

Практическое занятие 8

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ СВОЙСТВ

Цель занятия: сформировать практический опыт по выбору материалов для металлических опор воздушных линий электропередачи.

Общие положения

Опора воздушной линии электропередачи (опора ЛЭП) - сооружение для удержания проводов и при наличии грозозащитных тросов воздушной линии электропередачи и оптоволоконных ли-

ний связи на заданном расстоянии от поверхности земли и друг от друга.

Опоры ЛЭП предназначены для сооружений линий электропередач при расчётной температуре наружного воздуха до -65°C и являются одним из главных конструктивных элементов ЛЭП, отвечающим за крепление и подвеску электрических проводов на определённом уровне.

В зависимости от способа подвески проводов опоры делятся на две основные группы:

- опоры промежуточные, на которых провода закрепляются в поддерживающих зажимах;
- опоры анкерного типа, служащие для тяжения проводов; на этих опорах провода закрепляются в натяжных зажимах.

Эти виды опор делятся на типы, имеющие специальное назначение:

- промежуточные прямые опоры устанавливаются на прямых участках линии. На промежуточных опорах с подвесными изоляторами провода закрепляются в поддерживающих гирляндах, висящих вертикально; на опорах со штыревыми изоляторами крепление проводов производится проволоочной вязкой. В обоих случаях промежуточные опоры воспринимают горизонтальные нагрузки от давления ветра на провода и на опору и вертикальные - от веса проводов, изоляторов и собственного веса опоры;

- промежуточные угловые опоры устанавливаются на углах поворота линии с подвеской проводов в поддерживающих гирляндах. Помимо нагрузок, действующих на промежуточные прямые опоры, промежуточные и анкерно-угловые опоры воспринимают также нагрузки от поперечных составляющих тяжения проводов и тросов. При углах поворота линии электропередачи более 20° вес промежуточных угловых опор значительно возрастает. При больших углах поворота устанавливаются анкерно-угловые опоры.

При установке анкерных опор на прямых участках трассы и подвеске проводов с обеих сторон от опоры с одинаковыми тяжениями горизонтальные продольные нагрузки от проводов уравниваются и анкерная опора работает так же, как и промежуточная, то есть воспринимает только горизонтальные поперечные и вертикальные нагрузки. В случае необходимости провода с одной и с другой стороны от опоры можно натягивать с различным тяжением проводов. В этом случае, кроме горизонтальных поперечных и

вертикальных нагрузок, на опору будет воздействовать горизонтальная продольная нагрузка.

При установке анкерных опор на углах анкерно-угловые опоры воспринимают нагрузку также от поперечных составляющих натяжения проводов и тросов.

Концевые опоры устанавливаются на концах линии. От этих опор отходят провода, подвешиваемые на порталах подстанций.

Помимо перечисленных типов опор, на линиях применяются также специальные опоры: транспозиционные, служащие для изменения порядка расположения проводов на опорах; ответвительные - для выполнения ответвлений от основной линии; опоры больших переходов через реки и водные пространства и т. д.

На линиях электропередач применяются деревянные, стальные и железобетонные опоры. Разработаны также опытные конструкции из алюминиевых сплавов и композитных материалов.

Сталь является основным материалом, из которого изготавливаются металлические опоры и различные детали (траверсы, тросостойки, оттяжки) опор. Достоинством стальных опор по сравнению с железобетонными является их высокая прочность при малой массе. Возможность повторного использования в течение всего периода эксплуатации.

По конструктивному решению ствола стальные опоры могут быть отнесены к трем основным схемам - башенным (одно- или многостоечным), порталным или вантовым, по способу закрепления на фундаментах - к свободно стоящим опорам и опорам на оттяжках, по способу соединения элементов разделяются на сварные и болтовые. Также стальные опоры делятся на опоры гибкой конструкции и опоры жёсткой конструкции.

Металлические опоры изготавливаются как из стального уголкового проката (применяется равнобокий уголок), так из гнутого стального профиля постоянного и переменного сечения (это сочетает в себе преимущества конструкций стальных многогранных опор ЛЭП и стальных решетчатых опор башенного типа), кроме того высокие переходные опоры могут быть изготовлены из стальных труб.

В РФ насчитывается несколько основных центров производства стальных конструкций опор ЛЭП - центральный, уральский и сибирский.

Металлические опоры - выполняют из стали специальных марок. Отдельные элементы соединяют сваркой или болтами. Как правило, для предотвращения окисления и коррозии поверхность металлических опор оцинковывают (в том числе методом газотермического напыления) или периодически окрашивают специальными красками.

Открытое акционерное общество «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы» (ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС») разработало стандарт организации: СТО 34.01-2.2-008-2016 «ОПОРЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕШЁТЧАТЫЕ».

Стандарт утвержден и введен в действие Распоряжением ПАО «Россети» от 07.04.2016 № 154р.

Требования настоящего стандарта предназначены для использования в рамках регламентированной процедуры допуска к применению на объектах ПАО «Россети» опор ВЛ напряжением 35 – 750 кВ, контроля качества, в том числе при строительном контроле и приёмке поставляемых конструкций на строящихся (реконструируемых) объектах единой национальной электрической сети (ЕНЭС).

Требования настоящего стандарта устанавливают требования к изготовлению, качеству, приемке и поставке потребителю опор ВЛ металлических решетчатых.

Требования настоящего стандарта распространяются на опоры ВЛ и порталы открытых распределительных устройств (ОРУ), изготавливаемые из конструкционных углеродистых и низколегированных сталей, предназначенные для восприятия постоянных и временных нагрузок и эксплуатации в неагрессивных, слабоагрессивных и среднеагрессивных средах по СНиП 2.03.11 в районах с расчетной температурой наружного воздуха минус 65°С и выше в соответствии с требованиями проектной документации.

На строящихся (реконструируемых) ВЛ напряжением 35 – 750 кВ допускается применение опор ВЛ и решетчатых металлоконструкций ОРУ, только в случае соответствия их характеристик настоящим техническим требованиям.

Основные технические требования включают:

- требования к номинальным параметрам;
- требования к конструкции;
- требования к материалам;

- требования к изготовлению;
- требования по надежности.

Рассмотрим требования к материалам.

Для опор ВЛ и конструкций ОРУ выбор марки и категории стали должен производиться в зависимости от района эксплуатации. Марки сталей должны соответствовать указанным в рабочих чертежах. Марки сталей должны соответствовать указанным в проектах, рабочих чертежах и подтверждаться сертификатами. (СП16.13330.2011, «СНиП II-23-81»).

Прочностные характеристики металлопроката в зависимости от марки стали: - предел текучести, Н/мм² ; - временное сопротивление, Н/мм² должны соответствовать данным в таблице ГОСТ 27772-88, п.2.19, табл.3.

Для сборки конструкций опор должны применяться крепежные изделия в соответствии с требованиями документации на опору (металлоконструкцию): СП16.13330.2011, «СНиП II-23-81*. Стальные конструкции» п. 16.2.

Болты, гайки и шайбы, применяемые для сборки оцинкованных конструкций должны быть оцинкованы.

Антикоррозионное покрытие крепежных изделий:

- горячее цинкование, толщина покрытия, мкм - 42
- термодиффузионное цинкование, толщина покрытия, мкм – 21.

2. Необходимые инструменты и материалы

1. СТО 34.01-2.2-008-2016 Опоры воздушных линий электропередачи металлические решётчатые.

2. ГОСТ 27772-88 Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.

3. ГОСТ Р ИСО 898-1-2011 Механические свойства крепежных изделий из углеродистых и легированных сталей. Часть 1. Болты, винты и шпильки установленных классов прочности с крупным и мелким шагом резьбы.

4. ГОСТ 9.307-89 ЕСЗКС. Покрытия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля.

5. ГОСТ Р 9.316-2006 ЕСЗКС. Покрытия термодиффузионные— цинковые. Общие требования и методы контроля.

Практическое занятие 9 ИЗУЧЕНИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ МАРОК СПЛАВОВ ЦВЕТ- НЫХ МЕТАЛЛОВ

Цель занятия: развитие умений классифицировать, расшифровывать обозначения и характеризовать область применения сплавов цветных металлов.

Теоретическая часть

Классифицировать сплав – значит отнести его к соответствующему классу материалов по следующим признакам:

- химическому составу;
- структуре;
- назначению.

Расшифровывая марку сплава, необходимо дать его полное название и раскрыть содержание всех букв и цифр марки. Следует иметь в виду, что в ряде сплавов содержание компонентов прямо не указано в марке, но следует из принципов маркировки данного материала и должно быть отражено при расшифровке.

Характеризуя область применения сплава, можно сослаться на круг наиболее распространенных изделий из данного сплава.

Сплавы на основе меди. Медные сплавы обладают высокими механическими свойствами, хорошо сопротивляются износу и коррозии. По составу легирования различают латуни, бронзы и медно-никелевые сплавы.

Маркировка имеет следующий вид. Первые буквы в марке означают: Л - латунь и Бр. - бронза. Буквы, следующие за буквой Л в латуни или Бр. в бронзе, означают: А - алюминий, Б - бериллий, Ж - железо, К - кремний, Мц - марганец, Н - никель, О - олово, С - свинец, Ц - цинк, Ф - фосфор.

Цифры, помещенные после буквы, указывают среднее процентное содержание элементов. Порядок расположения цифр, принятый для латуней, отличается от порядка, принятого для бронз.

В марках латуни первые две цифры (после буквы) указывают содержание основного компонента - меди. Остальные цифры, отделяемые друг от друга через тире, указывают среднее содержание легирующих элементов. Эти цифры расположены в том же порядке, как и буквы, указывающие присутствие в сплаве того или иного элемента, содержание цинка – последнее. Например: латунь ЛМцЖ55-3-1: медь- 55 %, марганец – 3 %, железо – 1 %, цинк – остальное.

В марках бронзы (как и в сталях) содержание основного компонента - меди - не указывается, а определяется по разности. Цифры после букв, отделяемые друг от друга через тире, указывают среднее содержание легирующих элементов; цифры расположенные в том же порядке, как и буквы, указывающие на легирование бронзы тем или иным компонентом. Например: бронза БрОЦС4-4-2,5: олово – 4%, цинк – 4%, свинец – 2,5 %, остальное – медь.

Сплавы на основе алюминия. Для алюминиевых сплавов характерна относительно большая удельная прочность. Литейные сплавы имеют хорошие литейные свойства, хорошо обрабатываются резанием. Маркируют буквами АЛ, затем цифрами, указывающими порядковый номер сплава. Деформируемые сплавы обладают удовлетворительной пластичностью, высокой коррозионной стойкостью, в основном применяются для сварных и клепаных соединений элементов конструкций, испытывающих небольшие нагрузки, но требующих высокого сопротивления коррозии.

Марки дюралюминиевых сплавов начинаются с буквы Д, за которой стоит цифра, обозначающая условный порядковый номер сплава.

Антифрикционные сплавы. Такие сплавы применяют для заливки подшипников скольжения. Применяются сплавы на основе олова или свинца (баббиты), меди, алюминия, цинка. Баббиты обозначаются буквой Б, далее ставится цифра, показывающая процентное содержание олова, или буква, характеризующая специальный элемент, входящий в сплав. Например: Б88 – сплав содержит 88 % олова, БТ – сплав содержит теллур.

Задания для работы

Задание 1. Из перечисленных ниже марок оловянистых бронз укажите сначала литейные, а затем деформируемые бронзы: БрОЦ4-3, БрОЦС4-4-4, БрО10, БрОНС11-4-3, БрОФ10-1, БрОФ4-0,25, БрОЦС5-5-5, БрОФ6,5-0,4. Для ответа необходимо учитывать влияние олова на механические свойства оловянистых бронз.

Задание 2. Какой химический состав имеют следующие материалы: БрАЖ9-4, БрКМц3-1, БрБ2, БрМц5, БрС30, Л96, ЛС80-3, ЛЖМц59-1-1, ЛА77-2.

Задание 3. Из перечисленных марок металлических материалов выберите марки антифрикционных сплавов: БрС30, АК4, ШХ6, У7, Б83, БСт5, БрОЦС5-5-5, АСЧБ16, ШХ15, БСт6, Т15К6, ВТ14.

Задание 4. Какие из указанных марок литейных алюминиевых сплавов наиболее пригодны для производства отливок и почему: АЛ7, АЛ2, АЛ4, АЛ8, АЛ23, АЛ9, АЛ19?

Задание 5. Каков химический состав и назначение следующих марок латуней: Л68, ЛС59-1, ЛКС80-3-3, ЛАЖ60-1-1?

Практическое занятие 10 ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ. РАСЧЕТ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Цель занятия: изучить методы расчета емкости конденсатора.

Перед изучением данного раздела необходимо повторить по учебнику физики определения основных электрических величин: ЭДС E , напряжения U , потенциала ϕ , тока I , сопротивления R , проводимости G .

Необходимо выписать и усвоить основные законы цепей постоянного тока: Ома, Джоуля-Ленца и другие.

Закон Джоуля-Ленца: для пассивных участков цепи постоянного тока $W = U I t$, где W – потребляемая энергия; U – напряжение на пассивном участке; I – ток; t – время.

Мощность $P = W / t = U I = I^2 R = U^2 / R$. Мощность, вырабатываемая источником ЭДС, $P_{\text{ист}} = E I$. Если ЭДС E и ток I имеют разные знаки, то мощность источника отрицательна. Это означает, что данный источник не генерирует, а потребляет энергию, например, аккумулятор на зарядке.

Относительная диэлектрическая проницаемость, или диэлектрическая проницаемость ϵ_r – один из важнейших макроскопических электрических параметров диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость ϵ количественно характеризует способность диэлектрика поляризоваться, а также оценивает степень его полярности; ϵ является константой диэлектрического материала при определенной температуре и частоте электрического напряжения и показывает во сколько раз заряд конденсатора с данным диэлектриком больше заряда конденсатора тех же размеров и при таком же напряжении с вакуумом.

Диэлектрическая проницаемость определяет величину электрической емкости изделия (конденсатора, изоляции кабеля и т.д.). Для плоского конденсатора электрическая емкость C , выражается формулой:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S/d \quad (1.1)$$

где S – площадь одной пластины конденсатора, m^2 , d – толщина диэлектрика, m , ε - диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика, $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Из формулы (1.1) видно, что чем больше величина ε используемого диэлектрика, тем больше электрическая емкость конденсатора при тех же габаритах.

В свою очередь, электрическая емкость C является коэффициентом пропорциональности между зарядом Q_k , накопленным конденсатором, и приложенным к нему электрическим напряжением U :

$$Q_k = CU = U\varepsilon_0 \varepsilon S/d \quad (1.2)$$

Из формулы (1.2) следует, что электрический заряд Q_k , накопленный конденсатором, пропорционален величине ε диэлектрика. Зная Q_k и геометрические размеры конденсатора, можно определить ε диэлектрического материала.

Значение диэлектрической проницаемости материала основания учитывается при разработке печатных плат, поскольку оно влияет на значение статической ёмкости проводящего рисунка слоев питания и волновое сопротивление проводников (линий передачи сигналов) на плате.

Пример: Во сколько раз изменится емкость конденсатора, если в качестве диэлектрика между пластинами вместо бумаги, пропитанной парафином, использовать листовую слюду такой же толщины?

Решение: Согласно формуле для емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d},$$

эта величина прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости материала, находящегося между обкладками. Диэлектрическая проницаемость бумаги, пропитанной парафином $\varepsilon_{r(b)} = 2,2$, а листовой слюды $\varepsilon_{r(c)} = 6,0$. Поэтому при замене бумаги на слюду емкость конденсатора изменится в $\varepsilon_{r(c)}/\varepsilon_{r(b)} = 6/2,2 = 2,7$ раз.

Ответ: увеличится в 2,7 раза.

Пример: Площадь обкладок плоского конденсатора 10 см^2 , материал диэлектрика – рутиловая керамика, толщина диэлектрика 5 мм. Найти емкость конденсатора.

Решение:

Определим емкость плоского конденсатора по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d}$$

Подставим значение ε_0 , ε , S , d из условия задачи, получим

$$C = \frac{8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 3000 \cdot 10 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 53160 \cdot 10^{-13} \text{ Ф} = 5,3 \text{ нФ}$$

Практическое занятие 11

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Цель занятия: изучить методы определения температурного коэффициента диэлектрической проницаемости.

Основные теоретические положения

Диэлектрические материалы являются основными видами электротехнических материалов, с которыми придется встретиться на практике энергетикам. Эти материалы служат в качестве изоляции токоведущих частей электрооборудования.

Они включают в себя такие разнообразные типы электрической изоляции как: воздух в линиях электропередач и электроаппаратах; нефтяные и искусственные масла в трансформаторах, кабелях и конденсаторах; твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий (ВЛ), конденсаторах, установочных изделиях и корпусах аппаратов и т.п. При этом физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид и тип используемых электротехнических материалов.

Диэлектрики практически не содержат свободных зарядов, однако любое вещество состоит из электрически заряженных частиц, которые находятся в связанном состоянии. При помещении в электрическое поле они смещаются на небольшие расстояния, что в свою очередь приводит к возникновению своего собственного

электрического поля вещества направленного против внешнего электрического поля.

Таким образом, результирующее поле оказывается ослабленным. Величину, во сколько раз ослабляется электрическое поле в веществе по сравнению с полем в вакууме, называют диэлектрической проницаемостью материала. Процесс смещения связанных зарядов, приводящий к возникновению собственного поля вещества называют поляризацией.

Разная физическая природа связанных зарядов определяет существенные отличия процессов поляризации для различных веществ.

О явлениях, обусловленных поляризацией диэлектрика, можно судить по значению диэлектрической проницаемости, а также угла диэлектрических потерь, если поляризация диэлектрика сопровождается рассеянием энергии, вызывающим нагрев диэлектрика.

В нагреве технического диэлектрика могут участвовать содержащиеся в нем немногочисленные свободные заряды, обуславливающие возникновение под воздействием электрического напряжения малого сквозного тока, проходящего через толщу диэлектрика и по его поверхности.

Практически все свойства материалов зависят от температуры. Обычно это учитывается введением температурного коэффициента.

Строго математически для какого-либо свойства x он вводится выражением:

$$TKx = \frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{dT}$$

где x - любая характеристика материала.

Нередко для оценки зависимости диэлектрической проницаемости диэлектриков от температуры указывается температурный коэффициент диэлектрической проницаемости:

$$TK\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dT} \quad (2.1)$$

Температурные коэффициенты имеют единицу измерения град⁻¹. Если температура рассчитывается по Кельвину, то размерность записывают как К⁻¹.

Газообразные вещества характеризуются весьма малой плотностью вследствие больших расстояний между молекулами. Поэто-

му поляризация всех газов незначительная, и относительная диэлектрическая проницаемость их близка к единице.

Поляризация газа может быть чисто электронной или же дипольной, если молекулы газа полярны. Но даже и для полярных газов основное значение имеет электронная поляризация. Относительная диэлектрическая проницаемость газов тем выше, чем больше радиус молекулы. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и давления определяется изменением числа молекул в единице объема газа. Это число пропорционально давлению и обратно пропорционально абсолютной температуре.

При повышении влажности воздуха при нормальных температуре и давлении относительная диэлектрическая проницаемость незначительно увеличивается. При повышенной температуре это увеличение становится более заметным.

Жидкие диэлектрики могут быть построены из неполярных или полярных молекул. Значение относительной диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей невелико и обычно не превышает значения 2,5. Например, для трансформаторного масла $\varepsilon = 2,1 - 2,4$.

Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от температуры для неполярной жидкости связана с уменьшением числа молекул в единице объема. Значение ε для полярных жидкостей лежит в пределах от 3,5 до 20. Например, совол имеет значение $\varepsilon = 5$.

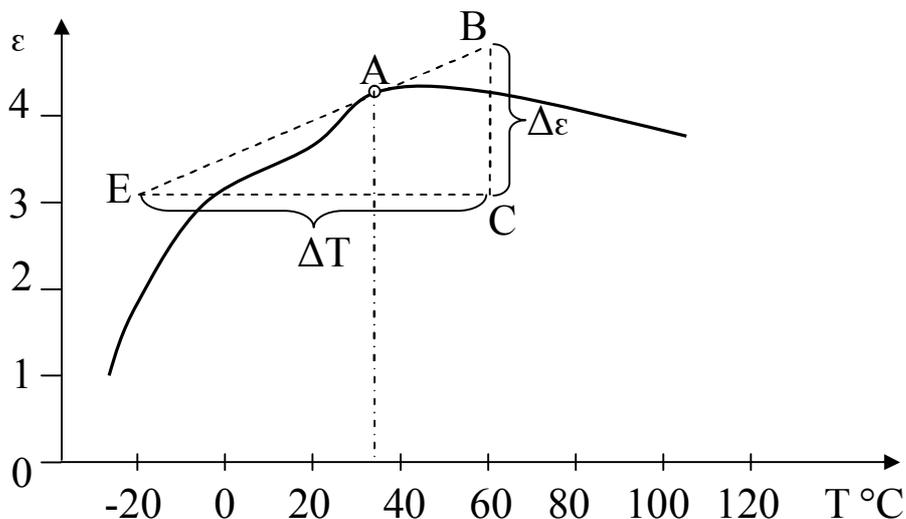


Рисунок 15

Зависимость ε от температуры часто имеет нелинейный характер, в этом случае TK_ε находят для различных температурных интервалов. Значение TK_ε определяют методом графического дифференцирования кривой зависимости ε от T (см. рисунок 15). Для этого в точке A , соответствующей заданной температуре проводят касательную EB к кривой и строят на ней, как на гипотенузе, прямоугольный треугольник CBE произвольных размеров. Значение TK_ε в точке A находят как отношение катетов треугольника с учетом масштабов ε и T , деленное на значение ε в точке A .

Пример

Определить методом графического дифференцирования кривой зависимости ε от T температурный коэффициент диэлектрической проницаемости диэлектрика при температуре 33°C .

Решение (см. рисунок 1).

1. Проведем к данной кривой касательную EB произвольных размеров в точке A , соответствующей температуре 33°C .

2. Построим на касательной прямоугольный треугольник EBC .

3. Определим значение TK_ε :

$$TK_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} = \frac{1}{4,3} \cdot \frac{1,7}{40} = 0,0098 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Практическое занятие 12

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СМЕСЕЙ

Цель занятия: научиться определять диэлектрическую проницаемость смесей.

На практике часто используются неоднородные композиционные диэлектрики, представляющие собой смеси двух или более различных веществ-компонентов. К таким материалам относятся многие пластические массы, состоящие из связующего и наполнителей, керамические, волокнистые, пропитанные и непропитанные пористые материалы и т.п.

Для расчета эффективной диэлектрической проницаемости ε^* смеси предположим, что отдельные компоненты не вступают друг с другом в химические реакции, т. е. смесь чисто физическая. Будем считать, что плоский конденсатор состоит из параллельно

или последовательно соединенных однородных диэлектриков, как показано на рисунке 16.

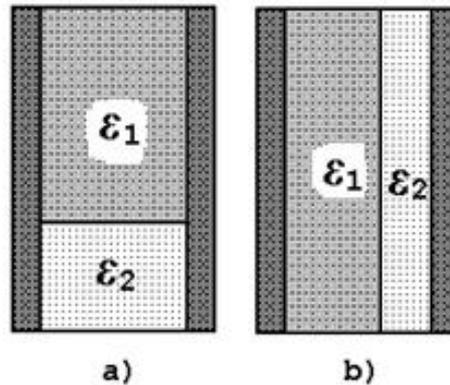


Рисунок 16

Обозначая через Θ_1 и Θ_2 доли объемного содержания (объемные концентрации) первого и второго компонента для рассмотренного случая будем иметь для параллельного соединения

$$\epsilon^* = \epsilon_1 \cdot \theta_1 + \epsilon_2 \cdot \theta_2 \quad (3.1)$$

для последовательного соединения

$$\frac{1}{\epsilon^*} = \frac{\theta_1}{\epsilon_1} + \frac{\theta_2}{\epsilon_2} \quad (3.2)$$

Если оба компонента распределены хаотически (что наблюдается, например, в керамике и бумаге):

$$\ln(\epsilon^*) = \theta_1 \ln \epsilon_1 + \theta_2 \ln \epsilon_2 \quad (3.3)$$

где ϵ^* - диэлектрическая проницаемость смеси;
 ϵ_1 - диэлектрическая проницаемость первого компонента;
 ϵ_2 - диэлектрическая проницаемость второго компонента.
 Θ_1, Θ_2 - объемные концентрации компонентов; $\Theta_1 + \Theta_2 = 1$

Пример

Рассчитать диэлектрическую проницаемость композитного диэлектрика конденсатора, состоящего из смеси: 40% рутила и 60%

из ультрафарфора. Расчет провести для параллельного и последовательного расположения.

Для определения ε^* при параллельном расположении компонентов воспользуемся формулой (3.1):

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 \cdot \theta_1 + \varepsilon_2 \cdot \theta_2$$

где $\varepsilon_1 = 9000$ – диэлектрическая проницаемость рутила

$\varepsilon_2 = 8$ – диэлектрическая проницаемость второго компонента.

$\theta_1 = 0,4$ – объемная доля рутила; $\theta_2 = 0,6$ – объемная доля ультрафарфора

$$\varepsilon^* = \varepsilon_1 \cdot \theta_1 + \varepsilon_2 \cdot \theta_2 = 9000 \cdot 0,4 + 8 \cdot 0,6 = 3604,8$$

Для определения ε^* при последовательном расположении компонентов воспользуемся формулой (3.2):

$$\frac{1}{\varepsilon^*} = \frac{\theta_1}{\varepsilon_1} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_2} = \frac{0,4}{9000} + \frac{0,6}{8} = 0,075044$$

Ответ: $\varepsilon^* = 13,3$

Практическое занятие 13

ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель занятия: а) изучить влияние внешних факторов на поверхностную электропроводность твердых диэлектриков;

б) изучить способы повышения удельного поверхностного сопротивления твердых диэлектриков;

в) приобрести навык при расчете удельных поверхностных сопротивлений различных твердых электроизоляционных материалов.

Теоретическая часть

Поверхностная электропроводность обусловлена присутствием влаги или загрязнений на поверхности диэлектрика. Вода отличается значительной удельной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы была обнаружена заметная проводимость, определяемая в основном толщиной этого слоя. Однако, поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, поверхностную электропроводность обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика.

Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому относительная влажность является важнейшим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости диэлектрика. Особенно резкое уменьшение удельного поверхностного сопротивления наблюдается при относительной влажности, превышающей 70-80 %.

Удельная поверхностная проводимость тем ниже, чем меньше полярность вещества, чем чище поверхность диэлектрика и чем лучше она отполирована. Наиболее высокими значениями удельного поверхностного сопротивления обладают неполярные диэлектрики, поверхность которых не смачивается водой. Полярные диэлектрики характеризуются более низкими значениями ρ_s , заметно уменьшающимися во влажной среде. Особенно резкое понижение удельного поверхностного сопротивления можно наблюдать у полярных диэлектриков, частично растворимых в воде, у которых на поверхности образуется пленка электролита. Кроме того, к поверхности полярных диэлектриков легко прилипают различные загрязнения, также приводящие к снижению ρ_s . Низкие значения удельного поверхностного сопротивления имеют и объемно-пористые материалы, так как процесс поглощения влаги толщиной материала стимулирует также и образование поверхностных пленок воды.

Стремясь повысить удельное поверхностное сопротивление, применяют разнообразные приемы очистки поверхности: промывку (водой, растворителями), прокаливание при температуре 600-700 °С.

Наиболее эффективной является очистка продолжительным кипячением в дистиллированной воде. Покрытие керамики и стекла кремнийорганическими лаками значительно повышает удельное поверхностное сопротивление изделий во влажной среде.

В итоге можно сделать следующие выводы. Зависимость удельной поверхностной проводимости от влажности обуславливается наличием на поверхности диэлектрика диссоциирующих на ионы веществ. Вода, адсорбируемая поверхностью, способствует их появлению. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то путем их удаления можно получать высокие значения удельного поверхностного сопротивления при любой влажности воздуха. Если вещества, диссоциирующие на ионы, являются составной частью материала, то удельное поверхностное сопротив-

ление будет сильно снижаться при увеличении влажности. В таблице 7 приведены значения удельного поверхностного сопротивления ρ_s некоторых технических твердых диэлектриков.

Таблица 7

Диэлектрик	ϵ_r , при частоте 10^6 Гц и 20°C	Краевой угол смачивания, градус	ρ_s , Ом, при относительной влажности воздуха $\Phi_{\text{в}}$, %	
			0	98
Политетрафторэтилен	2,05	113	$5 \cdot 10^{17}$	$5 \cdot 10^{17}$
Парафин	2,25	105	$6 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^{16}$
Полистирол	2,5	98	$5 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{15}$
Полиметилметакрилат	3,0	73	$5 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{15}$
Аминопласт	5,6	65	$6 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$
Гетинакс	7,5	86	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{11}$
Ультрафарфор	8,2	50	$1 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{13}$
Стекло С87-1	7,2	29	$5 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{10}$

Необходимые инструменты и материалы

1. Справочная литература

Порядок выполнения задания

1. Провести расчет удельного поверхностного сопротивления ρ_s технических твердых диэлектриков (исходные данные – выдает преподаватель); сравнить полученные значения ρ_s с табличными.

Практическое занятие 14

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Цель занятия: приобрести опыт в расчете тангенса угла диэлектрических потерь различных диэлектриков

Теоретическая часть

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Диэлектрические потери в диэлектрике можно характеризовать рассеиваемой мощностью, которая определяется по формуле

$$P = U^2 \cdot \omega C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (4.1)$$

где ω – угловая частота ($\omega = 2\pi f$);

C – емкость диэлектрика;

U – напряжение, прикладываемое к диэлектрику;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

На рисунке 17 приведена схема замещения и векторная диаграмма диэлектрика с потерями.

Углом диэлектрических потерь называют угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи.

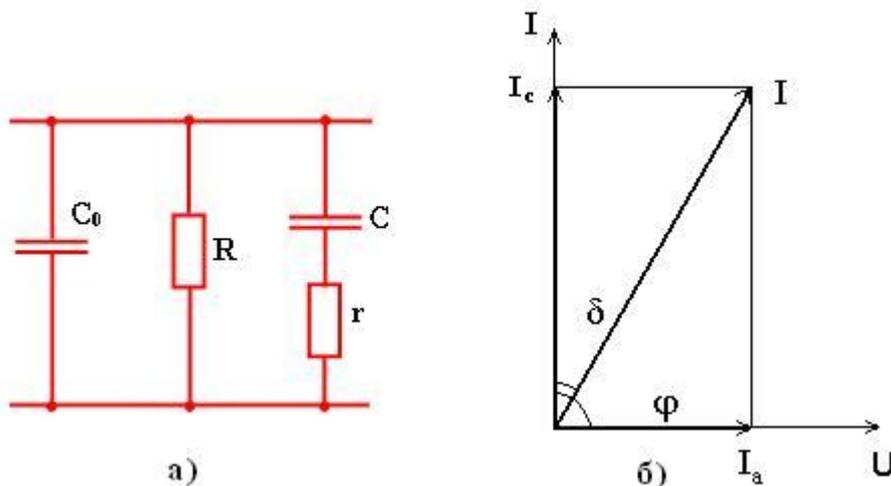


Рисунок 17. Схема замещения а) и векторная диаграмма б) диэлектрика с потерями

Виды диэлектрических потерь.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

- 1) потери, обусловленные поляризацией;
- 2) потери, обусловленные сквозной электропроводностью;
- 3) ионизационные потери;
- 4) потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией.

Из всех видов поляризации с потерями наиболее часто в диэлектриках встречаются дипольная и ионно-релаксационная. У них есть общие закономерности:

а) $\operatorname{tg} \delta$ при определенной частоте f_1 имеет максимум;

б) у $\operatorname{tg} \delta$ наблюдается также максимум при некоторой температуре t_1 , характерной для данного диэлектрика.

В схеме замещения эти виды потерь хорошо описываются цепочкой из емкости C и сопротивления r (рис. 17,а).

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, в схеме замещения хорошо описываются сопротивлением R (рис. 17,а). Они не зависят от частоты:

$$P = U^2/R. \quad (4.2)$$

Так как сопротивление R зависит от температуры, то и потери от нее также зависят. Они возрастают с температурой по экспоненциальному закону:

$$P = A \cdot e^{-\frac{b}{T}} \quad (4.3)$$

где A и b – постоянные материала.

Тангенс δ в этом случае может быть вычислен по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{f \cdot \rho \cdot \varepsilon} \quad (4.4)$$

где f – частота напряжения, Гц;

ρ – удельное сопротивление, Ом·м;

Пример

Определить тангенс угла диэлектрических потерь для воздуха при частоте 50 Гц.

В слабых электрических полях диэлектрические потери в газообразных диэлектриках вызваны только удельной электропроводностью. Поэтому для расчета $\operatorname{tg} \delta$ можно воспользоваться формулой (4.4). Так как у воздуха $\rho = 10^{17}$ Ом·м, $\varepsilon = 1$, то $\operatorname{tg} \delta$ на частоте 50 Гц будет равен $\sim 10^{-8}$:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{f \cdot \rho \cdot \varepsilon} = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{50 \cdot 10^{17} \cdot 1} = 0,036 \cdot 10^{-7}$$

Тангенс угла диэлектрических потерь воздуха имеют самое низкое значение и практически не зависят ни от температуры, ни от частоты напряжения. Однако в сильных полях (при $U > U_{и}$) потери могут значительно (на несколько десятичных порядков) возрасти в результате поглощения энергии, идущей на ионизацию молекул воздуха — на возникновение чр (см. рис. 18).

Ионизационные диэлектрические потери

Эти потери свойственны газообразным диэлектрикам. Они появляются, если напряжение, приложенное к диэлектрику, превысит критическое значение $U_{кр}$, при котором начинаются ионизационные процессы. До напряжения $U_{кр}$ диэлектрические потери практически равны нулю, а затем они резко увеличиваются, и их можно оценить по приближенной формуле

$$P = A \cdot f \cdot (U - U_{кр})^3 \quad (4.5)$$

где A — постоянный коэффициент;

f — частота поля;

U — величина приложенного напряжения;

$U_{кр}$ — величина напряжения при котором начинаются ионизационные процессы.

Ионизационные потери возникают также в жидких и твердых диэлектриках в газовых пузырьках и включениях.

Величина $U_{и}$ является важной характеристикой высоковольтных электротехнических изделий, позволяющая судить о расслоении изоляции, появлении пор и микротрещин и, следовательно, снижении ее электрической прочности и качества в целом. Эта величина позволяет установить максимально допустимое рабочее напряжение высоковольтного электротехнического изделия. Эксплуатация изделий при $U \geq U_{и}$ приводит к ускоренному старению изоляции под действием чр, зажигаемых в ее порах, снижению надежности работы и сокращению срока службы электроустановки. Величину $U_{и}$ можно найти из кривой ионизации (см. рис. 18), для чего $\text{tg}\delta$ измеряют в интервале напряжения, установленном ГОСТом или ТУ для данного изделия. При испытании некоторых видов электрооборудования $\text{tg}\delta$ изоляции измеряют в интервале напряжения $(0,5—1,5) U_{раб}$ и строят зависимость $\text{tg}\delta = \varphi(U)$. В случае увеличения в изоляции газовых включений, чр и, следовательно, $\text{tg}\delta$ нач-

нут возрастать при более низком напряжении. Следует, однако, иметь в виду, что такая оценка $U_{и}$ обычно является завышенной, иногда в 1,5—2,0 раза.

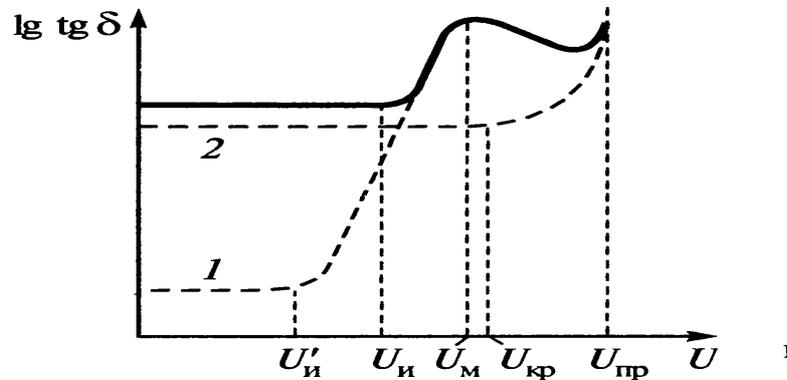


Рисунок 18. Зависимость $\text{tg}\delta$ от напряжения U для изоляции с воздушными включениями

При $U < U_{и}$ (область слабых полей) газ во включениях не ионизирует, и $\text{tg}\delta$ определяется только потерями самого твердого (жидкого) диэлектрика, поэтому $\text{tg}\delta$ от величины приложенного напряжения не зависит, так как от U не зависят деформационные и релаксационные виды поляризации и удельная электропроводность.

При $U \geq U_{и}$ (область сильных полей) в газовых включениях изоляции возникают частичные электрические разряды (чр), приводящие к увеличению рассеянной мощности приложенного электрического поля и соответственно к росту $\text{tg}\delta$ (рис. 18). График зависимости $\text{tg}\delta$ изоляции от величины приложенного напряжения называют кривой ионизации, а $U_{и}$ — порогом ионизации. Как видно из рис. 18, фактический порог ионизации $U_{и}$ наступает при более низком напряжении, чем он фиксируется на кривой $\text{tg}\delta(U)$ в точке $U_{и}$. С дальнейшим увеличением напряжения $\text{tg}\delta$ растет, так как в этот процесс вовлекаются новые газовые включения. В начале чр возникают в крупных газовых включениях, затем по мере роста напряжения чр образуются в более мелких включениях. При $U_{м} \approx 2 U_{и}$ $\text{tg}\delta$ достигает максимума; это означает, что газ ионизирован полностью во всех включениях и, следовательно, энергии на ионизацию новых включений не требуется, поэтому с дальнейшим ростом напряжения U мощность диэлектрических потерь P остается

постоянной, а $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается (см. формулу (4.1)). Однако в сильных полях собственная электропроводность твердого диэлектрика начинает нелинейно возрастать, следовательно, нелинейно начнет возрастать $\operatorname{tg}\delta$ и при $U = U_{\text{пр}}$ наступает пробой (см. рис. 18, кр. 2). Чем выше $U_{\text{и}}$ и меньше приращение $\operatorname{tg}\delta$ (более пологий подъем $\operatorname{tg}\delta$ от $U_{\text{и}}$ до $U_{\text{м}}$), тем лучше качество высоковольтной изоляции. Последнее достигается путем уменьшения пористости (количества, а главное – размера пор) высоковольтной изоляции.

Под действием частичных электрических разрядов, зажигаемых в газовых включениях твердой изоляции и газовых пузырьках жидких диэлектриков, идет постепенное ее разрушение.

Диэлектрические потери, отнесенные к единице объема диэлектрика, называют удельными потерями. Их можно рассчитать по формуле:

$$\rho = E^2 \omega \varepsilon_r \varepsilon_0 \operatorname{tg}\delta, \quad (4.6)$$

где: E — напряженность электрического поля,
 ω — круговая частота.

Абсолютную диэлектрическую проницаемость ε_a представляют в виде произведения $\varepsilon_a = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$ относительной диэлектрической проницаемости среды ε_r (от англ. *relative* — относительный; ε_r для краткости часто называют просто диэлектрической проницаемостью и обозначают ε) и электрической постоянной ε_0 .

Из приведенного выражения следует, что потери в веществе определяются произведением диэлектрической проницаемости ε на $\operatorname{tg}\delta$. Это произведение иногда называют коэффициентом диэлектрических потерь. Чтобы представлять степень нагрева того или иного вещества в электрическом поле, необходимо знать его ε и $\operatorname{tg}\delta$. Указанные параметры некоторых веществ приведены в таблице 8.

Из выражений (4.1 и 4.6) ясно, что диэлектрические потери имеют важное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных, высокочастотных устройствах, поскольку значение диэлектрических потерь пропорционально квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте.

Материалы, предназначенные для применения в указанных условиях, должны отличаться малыми значениями угла потерь и диэлектрической проницаемости, так как в противном случае мощ-

ность, рассеиваемая в диэлектрике, может достигнуть недопустимо больших значений.

Большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению.

Таблица 8

Диэлектрик	ε	$\operatorname{tg}\delta$
Винипласт	4,0	0,02
Вода вблизи точки замерзания	87,8	—
Вода вблизи точки кипения	55,6	—
Вода при $t=20^{\circ}\text{C}$	81	0,11
Гетинакс	7,5	0,015
Капрон	4,5	0,06—0,1
Картофель	38	0,3
Касторовое масло	4,0	0,02
Кварц плавленный	3,8	$1 \cdot 10^{-4}$
Льняное масло	3,3	—
Метиловый спирт	32,6	—
Мороженая говядина при $t = -15^{\circ}\text{C}$	5,0	0,15
Мороженая свинина при $t = -15^{\circ}\text{C}$	6,8	1,2
Нейлон	4,6	0,04
Пластмассы Э1 -340-02, Э2-330-02, Э8-361-63, Э9-342-73, Э10-342-63, Э11-342-63, Э15-121-02	7,5 — 9,5	0,08
Пластмассы Э3-340-65, Э4-100-30, Э5-101-30, Э6-014-30	6—8	0,01 — 0,012
Плексиглас	2,61	$8,4 \cdot 10^{-3}$
Поджаренная говядина при $t=24^{\circ}\text{C}$	28	0,2
Поджаренная свинина при $t=35^{\circ}\text{C}$	23	2,4
Полистирол	2,55	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Полиэтилен	2,26	$0,4 \cdot 10^{-3}$
Сапфир	11	$0,26 \cdot 10^{-4}$
Слюда	5,4	$0,3 \cdot 10^{-3}$

Стекло С5-1	3,8	$1 \cdot 10^{-4}$
Стекло С63-1	12	$131 \cdot 10^{-4}$
Текстолит	3,67	$6,0 \cdot 10^{-2}$
Трансформаторное масло	2,2	0,001
Фреон 215	2,76	6,0
Фторопласт-4 (тефлон)	2,0	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Эбонит	2,67	$6,0 \cdot 10^{-3}$
Электрофарфор	5—8	0,025
Эпоксидный компаунд Д1	4	0,02
Этиловый спирт	24,3	—

Необходимые инструменты и материалы

1. Справочная литература

Порядок выполнения задания

1. Провести расчет $\text{tg}\delta$ технических твердых диэлектриков (исходные данные – выдает преподаватель); сравнить полученные значения $\text{tg}\delta$ с табличными.

Практическое занятие 15

ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ТЕПЛОМ ПРОБОЕ

Цель занятия: изучить явление электрического пробоя диэлектриков; рассчитать напряжение электротеплового пробоя заданных технических диэлектриков.

Перед изучением данного раздела необходимо повторить следующие темы: диэлектрическая проницаемость диэлектриков, диэлектрические потери диэлектриков, тепловые свойства диэлектриков.

Теоретическая часть

Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепловой энергии, выделяющейся в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превышает то количество энергии, которое может

рассеиваться в данных условиях; при этом нарушается тепловое равновесие, а процесс приобретает лавинообразный характер.

Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих расплавлению, обугливанию и пр. Электрическая прочность при тепловом пробое является характеристикой не только материала, но и изделия из него, тогда как электрическая прочность при электрическом пробое служит характеристикой самого материала. Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды и др. Кроме того, «электротепловое пробивное напряжение» зависит от нагревостойкости материала; органические диэлектрики (например, полистирол) имеют более низкие значения электротепловых пробивных напряжений, чем неорганические (кварц, керамика), при прочих равных условиях вследствие их малой нагревостойкости.

Типичными признаками теплового пробоя является экспоненциальное уменьшение пробивного напряжения с ростом температуры окружающей среды, а также снижение электрической прочности с увеличением времени выдержки диэлектрика в электрическом поле.

Рассмотрим методику упрощенного расчета пробивного напряжения при тепловом пробое. Пусть пластинка однородного диэлектрика, обладающего потерями, находится между двумя электродами, как показано на рисунке 19, а. К электродам от достаточно мощного источника переменного тока прикладывается напряжение, которое можно увеличивать до пробоя образца.

Упрощенным расчетом пробивного напряжения при электротепловом пробое диэлектрической конструкции является графоаналитический метод. Этот метод позволяет оценить значения $U_{пр}$ и $U_{раб}$ и, главное, наглядно демонстрирует причины, приводящие к электротепловому пробое.

Процесс тепловыделения характеризуется мощностью P , Вт, рассеиваемой в диэлектрике, и выражается уравнением электрических потерь:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta \quad (5.1)$$

Процесс теплоотдачи характеризуется мощностью P_t , Вт, отводимой от диэлектрика, и выражается с помощью формулы Ньютона:

$$P_T = \sigma \cdot S(T - T_0), \quad (5.2)$$

где σ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

S – площадь поверхности диэлектрика, м²;

T – температура поверхности диэлектрика, К (считается, что температура по всему объему, находящегося в поле между электродами (краевым эффектом пренебрегаем) диэлектрика и на его поверхности одинакова и равна T);

T_0 – температура окружающей среды, К.

В случае теплового равновесия: $P = P_T$ имеем

$$U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = \sigma \cdot S(T - T_0) \quad (5.3)$$

Для наглядности дальнейших рассуждений воспользуемся графическим построением зависимости P и P_T от температуры см. рис. 19

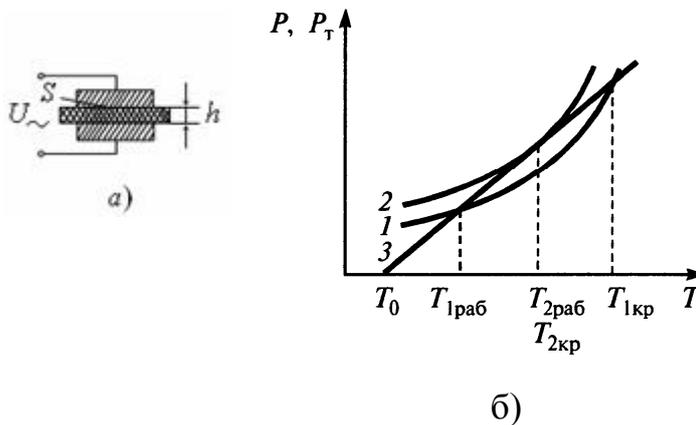


Рисунок 19. Температурные зависимости мощности тепловыделения P (кривые 1 и 2) и мощности теплоотдачи P_T с поверхности детали (образца) (прямая 3)

На диэлектрическую конструкцию подадим напряжение U_1 . В диэлектрике возникнут процессы тепловыделения (кривая 1) и теплоотдачи (прямая 3). Кривая 1 пересекает прямую 3 в двух точках, соответствующих $T_{1раб}$ и $T_{1кр}$. За счет тепла, выделяемого в результате диэлектрических потерь, материал конструкции нагреется до некоторой температуры, равной $T_{1раб}$, при которой наступит состояние устойчивого теплового равновесия между тепловыделением и теплоотдачей ($P = P_T$). Однако под действием кратковременных перенапряжений, потерь в магнитопроводах и проводниках, посторонних случайных источников тепла диэлектрик может нагреться до температуры, превышающей $T_{1раб}$. Если эта температура станет равной или большей $T_{1кр}$, то выделяемая мощность превысит

мощность отводимого тепла; наступит тепловое разрушение – электротепловой пробой. Следовательно, максимально допустимая температура нагрева диэлектрика за счет посторонних источников тепла должна быть ниже $T_{1кр}$. В данных условиях напряжение U_1 будет не опасным для нормальной работы электрической конструкции.

Повысим напряжение до значения U_2 . Мощность тепловыделения в данном случае будет характеризоваться кривой 2, а значение $T_{2раб}$ в результате сильно возросших электрических потерь станет равным $T_{2кр}$. В этом случае становится неустойчивым тепловое равновесие между P и P_T поэтому температура диэлектрика начнет безгранично возрастать вплоть до температуры его теплового разрушения. Наступит электротепловой пробой.

Согласно условию теплового равновесия (кривые 1, 3) между процессами тепловыделения и теплоотдачи ($P = P_T$) из выражения (5.3) находим рабочее напряжение детали:

$$U_{раб} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot S \cdot (T_{раб1} - T_0)}{\omega \cdot C \cdot tg \delta_1}} \quad (5.4)$$

где $tg \delta_1$ соответствует температуре $T_{раб1}$.

В случае нарушения теплового равновесия (кривые 2,3) между тепловыделением и теплоотдачей ($P > P_T$) из выражения (5.3) находим напряжение электротеплового пробоя:

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot S \cdot (T_{кр2} - T_0)}{\omega \cdot C \cdot tg \delta_2}} \quad (5.5)$$

где $tg \delta_2$ соответствует температуре $T_{кр2}$.

Из выражений (5.4) и (5.5) видно, что чем больше частота напряжения ω , полярность диэлектрика ε и его $tg \delta$ и чем выше температура окружающей среды T_0 , тем ниже $U_{раб}$ и $U_{пр}$. Чем больше σ и S , тем выше $U_{раб}$ и $U_{пр}$. Кроме указанных характеристик, напряжение электротеплового пробоя $U_{пр}$ зависит также от нагревостойкости материала. При прочих равных условиях у диэлектриков с более высокой нагревостойкостью $U_{пр}$ выше.

Расчеты по формуле (5.5) не дают точных значений $U_{пр}$, так как электротепловой пробой более сложное явление, чем было рассмотрено выше. Графоаналитический метод расчета $U_{раб}$ и $U_{пр}$ не учитывает многих факторов, влияющих на процессы тепловыделения и теплоотдачи, имеющих место в реальных условиях. Напри-

мер, температура имеет перепад по толщине диэлектрика в результате его низкой теплопроводности. Поэтому средний слой оказывается нагретым до более высокой температуры, чем слой, прилегающий к токонесущему проводу и соприкасающийся с воздухом. Сопротивление среднего слоя снижается, что приводит к искажению электрического поля и повышению градиента напряжения в поверхностных слоях. В результате электротепловой пробой происходит при меньшем значении напряжения, чем при полученном из метода упрощенного расчета (5.5).

Необходимые инструменты и материалы

1. Справочная литература

Порядок выполнения задания

1. Провести расчет напряжения электротеплового пробоя технических твердых диэлектриков (исходные данные – выдает преподаватель); сравнить полученные значения $U_{пр}$ с табличными.

Практическое занятие 16

КЛАССЫ НАГРЕВОСТОЙКОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель занятия: изучить тепловые свойства твердых диэлектрических материалов; закрепить опыт по выбору электроизоляционных материалов для различных температурных условий эксплуатации

Теоретическая часть

В процессе эксплуатации диэлектрические материалы подвергаются кратковременному или длительному воздействию высокой или низкой температуры. Нередко происходит резкая смена температуры (термоудары). При охлаждении электрические свойства материалов улучшаются. Механические свойства ниже некоторого значения температуры, называемой температурой хрупкости $T_{хр}$ ухудшаются; наступает хрупкое разрушение.

К важнейшим тепловым свойствам диэлектрических материалов относят нагревостойкость, холодостойкость, теплопроводность и тепловое расширение.

Нагревостойкостью материала называют его способность без недопустимого ухудшения эксплуатационно-технических характеристик выдерживать кратковременное и длительное воздействие

высоких температур, а также термоудары. Нагревостойкость материала можно оценить также с помощью таких его свойств, как стойкость к тепловому старению, искро- и дугостойкость, а у жидких диэлектриков - температура вспышки и температура воспламенения.

Таким образом, нагревостойкость — это максимально допустимая температура, при которой может работать диэлектрик без ухудшения своих эксплуатационно-технических характеристик в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, и является его нагревостойкостью.

Возможность повышения рабочей температуры диэлектрика имеет важное практическое значение. Увеличивая нагревостойкость изоляции электрических машин и аппаратов, можно повышать их мощность или же снижать габариты и массу. Однако при достаточно высокой температуре многие органические диэлектрики размягчаются, расплавляются. Поэтому их нагревостойкость определяется температурой появления необратимой деформации (т. е. размягчения или плавления). У неорганических диэлектриков при нагревании обычно наблюдается резкое ухудшение электрических свойств. Поэтому нагревостойкость неорганических диэлектриков определяется, как правило, по температуре начала резкого роста $\tan \delta$ или γ .

Известным методом оценки нагревостойкости твердых органических диэлектриков по температуре начала их размягчения является «тепlostойкость по Мартенсу». В соответствии с этим методом нагревостойкость характеризуется температурой, при которой изгибающее напряжение в 5 МПа вызывает заметную необратимую деформацию. Скорость нагревания ~ 1 К/мин. Нагревостойкость полистирола, определенная этим методом, равна примерно 80-90 °С, а гетинакса 150-180 °С.

Ухудшение свойств материала при длительном воздействии повышенной температуры за счет медленно протекающих химических процессов термоокислительной деструкции (разрушения) или структурирования («сшивания» молекул) называется тепловым старением изоляции.

В результате теплового старения у лаковых пленок, резины повышаются твердость, хрупкость, образуются трещины или, наоборот, они размягчаются, появляется липкость. Тепловое старение

ускоряется под действием озона, окислов азота, ультрафиолетовых лучей, электрических разрядов, увеличения давления воздуха и т. п.

Для оценки стойкости электрической изоляции электротехнических изделий к воздействию температуры Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации принят новый межгосударственный стандарт (ГОСТ 8865-93), которым введены классы нагревостойкости. Для каждого класса определена максимальная рабочая температура, до которой (включительно) можно эксплуатировать электротехнические изделия длительно (в течение ряда лет) в нормальных эксплуатационных условиях.

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
Максимальная рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	200	220	250

При указанных температурах наилучшим образом обеспечиваются технико-экономические показатели работы электрооборудования. В особых случаях (электрооборудование с коротким сроком службы) возможно некоторое повышение рабочей температуры материала по сравнению с приведенной выше.

Использование буквенных обозначений класса нагревостойкости необязательно. Повышение температуры выше 250°C производится на интервал в 25°C с присвоением соответствующего класса.

К классу Y (максимальная рабочая температура 90°C) относятся материалы на основе целлюлозы и шелка - бумага, картон, пряжа, ткани, лента и т. п.

К классу A ($T_{\text{макс раб}} = 105$ °C) принадлежат те же материалы, что и к классу Y, только пропитанные лаками или погруженные в масло (для защиты от кислорода воздуха), а также эфиры целлюлозы, полиамидные смолы (пленки), древеснослоистые пластики и т. п.

К классу E ($T_{\text{макс раб}} = 120$ °C) относятся пластмассы с органическим наполнителем и терморезактивным связующим, типа фенолоформальдегидной смолы (гетинакс, текстолит), а также эпоксидные смолы без наполнителя.

Таким образом, к классам Y, A, E относятся в основном чисто органические диэлектрики.

К классу B ($T_{\text{макс раб}} = 130$ °C) принадлежат щепаная слюда, асбест, стекловолокно в сочетании с органическими связующими.

К классу F ($T_{\text{макс раб}} = 155 \text{ }^\circ\text{C}$) относятся те же материалы, что и к классу В, но в качестве связующего использованы органические вещества повышенной нагревостойкости: кремнийорганические, эпоксидные и терморезистивные смолы.

К классу Н ($T_{\text{макс раб}} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$) принадлежат материалы, у которых в качестве связующего использована кремнийорганическая смола особо высокой нагревостойкости.

К классам 200, 220 и 250 относятся неорганические диэлектрики, например слюда, кварц, асбест, бесщелочные стекла, оксид алюминия, для склеивания или пропитки которых не используют органические вещества. Из органических материалов к этому классу относятся политетрафторэтилен и полиимиды.

Необходимые инструменты и материалы

1. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ: СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ. Оценка нагревостойкости и классификация. ГОСТ 8865-93.

2. Справочная литература

Порядок выполнения задания

1. Изучить все положения ГОСТа 8865-93.
2. Ответить на вопросы.

Практическое занятие 17 ВЛАЖНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель занятия: изучить влажностные свойства твердых диэлектрических материалов; закрепить опыт по выбору способов снижения влагопроницаемости и гигроскопичности электроизоляционных материалов.

Теоретическая часть

Диэлектрические материалы в большей или меньшей степени способны поглощать влагу из окружающей среды, а также пропускать ее через себя, т. е. они в определенной мере гигроскопичны и влагопроницаемы. Количество поглощенной влаги из атмосферного воздуха зависит не только от природы самого диэлектрика, но также и от концентрации водяных паров в воздухе.

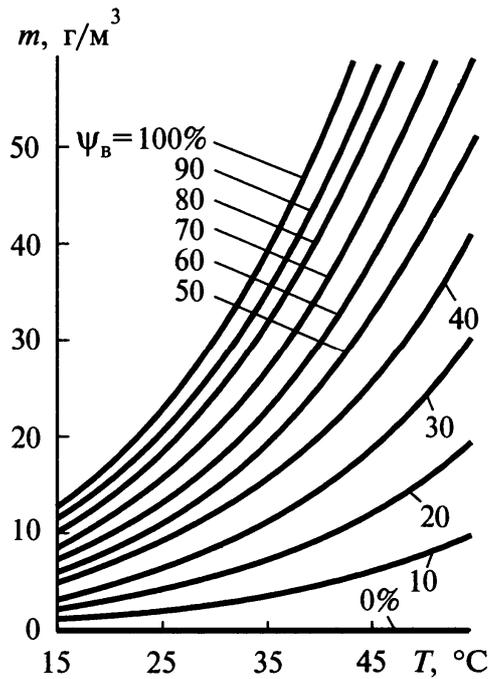


Рисунок 20. Абсолютная влажность воздуха m при нормальном атмосферном давлении и различных значениях относительной влажности ψ_v в функции температуры T

В атмосферном воздухе всегда присутствует то или иное количество водяных паров, содержание которых можно оценить по абсолютной влажности - по массе m водяных паров, находящихся в единице объема воздуха, или по относительной влажности ψ_v , измеряемой в процентах:

$$\psi_v = (m/m_n)100 \%,$$

где m — абсолютная влажность воздуха, г/м^3 ; m_n - абсолютная влажность воздуха при насыщении (при тех же значениях температуры и давления, что и m), г/м^3 .

На практике содержание водяных паров в воздухе, т. е. влажность воздуха, обычно оценивают относительной влажностью ψ_v , так как экспериментально определить ее проще, чем абсолютную влажность m . Относительную влажность воздуха ψ_v измеряют с помощью специальных приборов: гигрометров, психрометров и т. п. Абсолютная и относительная влажности зависят от температуры: с увеличением температуры возрастают (рис. 20.). Следовательно, одному и тому же значению относительной влажности воздуха ψ_v , измеренному при различной температуре, будут соответствовать разные значения абсолютной влажности m , т. е. различное содер-

жание водяных паров в единице объема воздуха. Зная относительную влажность воздуха ψ_v , с помощью формулы (см. выше) и табл. 9 можно определить соответствующую ей абсолютную влажность m (при тех же значениях температуры и давления). Например, если относительная влажность воздуха $\psi_v = 70\%$, то абсолютная влажность при $10\text{ }^\circ\text{C}$ будет равна $m = (9,4 \cdot 70)/100 = 6,58\text{ г/м}^3$, при $20\text{ }^\circ\text{C}$ $m = (17,3 \cdot 70)/100 = 12,11\text{ г/м}^3$, при $30\text{ }^\circ\text{C}$ $m = 20,23\text{ г/м}^3$. Это положение необходимо учитывать на практике.

Если в воздух с относительной влажностью ψ_v поместить два образца одного и того же материала, один из которых сухой, а другой влажный, то первый образец начнет увлажняться, а второй подсыхать. Влажность обоих образцов в течение времени τ будет асимптотически приближаться к некоторой равновесной влажности ψ_p , соответствующей данной ψ_v (рис. 21).

Таблица 9 - Абсолютная влажность воздуха при насыщении m_n для различных значений температуры T

$T, ^\circ\text{C}$	$m_n, \text{г/м}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$m_n, \text{г/м}^3$
-10	2,15	50	89,5
0	4,86	60	131,3
10	9,4	70	200,0
20	17,3	80	295,0
30	28,9	90	425,0
40	50,6	100	600

Эта равновесная влажность ψ_p , до которой материал стремится увлажниться или подсохнуть, при данной влажности воздуха ψ_v и температуре у разных материалов различна. У полярных материалов при одной и той же относительной влажности воздуха, например, $\psi_v = 80\%$ и одной и той же пористости равновесная влажность ψ_p в несколько раз больше, чем у неполярных. Материалы анизотропного строения впитывают влагу в разных направлениях с различной скоростью. На степень увлажнения существенно влияют наличие и размер капиллярных пор. У сильнопористых материалов, особенно волокнистых, ψ_p выше, чем у материалов плотного, сплошного строения. С увеличением температуры ψ_p снижается. Если поглощенная влага внутри материала образует сквозные нити или пленки, то даже небольшое ее количество приводит к резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределена в виде отдельных, не соединенных между собой вклю-

чений, то наличие влаги менее существенно влияет на электрические свойства.

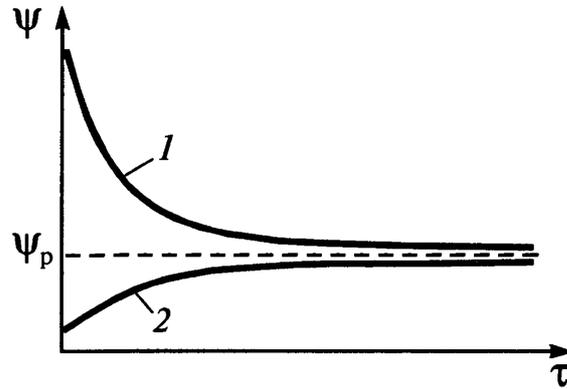


Рисунок 21. Изменение во времени τ влажности ψ образцов материала влажного (1) и сухого (2) при неизменяющихся значениях ψ_v и T окружающего воздуха

Под гигроскопичностью материала (в узком смысле этого слова) понимают равновесную влажность ψ_p при $20\text{ }^\circ\text{C}$ в воздухе с $\psi_v \sim 100\%$. Если относительная влажность воздуха $\psi_v = 65\%$ ($T = 20\text{ }^\circ\text{C}$), то это кондиционная влажность материала.

Если материал непосредственно соприкасается с водой, то в этом случае он характеризуется водопоглощаемостью.

Большое практическое значение для оценки качества защитных покрытий (лаковые покрытия изоляции электромашин, шланговая изоляция кабелей, компаундные заливки и т. п.) имеет влагопроницаемость материалов.

Влагопроницаемость характеризует способность материала пропускать через себя влагу. Благодаря наличию мельчайшей пористости большинство материалов влагопроницаемы. Только стекла, обожженная глазурированная керамика и металлы влагонепроницаемы.

Коэффициент влагопроницаемости Π материала находится из основного уравнения влагопроницаемости

$$M = \Pi(P_1 - P_2)St/h,$$

где M — количество влаги, кг, проходящее за время τ , с, сквозь участок поверхности образца материала площадью S , м^2 , и толщиной h , м, под действием разности давлений P_1 и P_2 , Па, с двух сторон слоя. Величина M является разностью весов сосуда с влагопог-

лотителем до испытания и через время τ . В единицах СИ Π измеряется в секундах.

Уравнение (6.5) формально аналогично закону Ома, при этом разность давлений $P_1 - P_2$ подобна разности потенциалов, отношение M/τ — силе тока, $h/(\Pi S)$ - электрическому сопротивлению тела; коэффициент Π аналогичен удельной объемной проводимости.

У различных материалов величина Π изменяется в очень широких пределах:

Наименование материала	Коэффициент влагопроницаемости Π , с
Парафин	$1,5 \cdot 10^{-16}$
Полистирол.	$6,2 \cdot 10^{-15}$
Триацетат целлюлозы	$2,1 \cdot 10^{-13}$

Практическое занятие 18 МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель занятия: изучить механические свойства твердых диэлектрических материалов; закрепить опыт по выбору методов испытания механических свойств электроизоляционных материалов.

Теоретическая часть

В зависимости от способа приложения нагрузки методы испытания механических свойств материалов (диэлектриков, металлов, сплавов и других) делятся на статические, динамические и знакопеременные.

Большое практическое значение для твердых диэлектриков (и металлов), несущих статические нагрузки, имеют прочность, относительное удлинение и относительное сужение перед разрывом, пластичность, твердость и эластичность.

Прочность - способность материала, не разрушаясь, оказывать сопротивление внешним силам. Это свойство материала характеризуют значениями предела прочности при растяжении (σ_p), сжатии (σ_c) и изгибе ($\sigma_{и}$), которые чаще всего выражают в кгс/см² или в единицах СИ - в Па; $1 \text{ кгс/см}^2 \sim 0,1 \text{ МПа}$:

$$\sigma_p = P_p/F_0; \sigma_c = P_c/F_0; \sigma_{и} = 1,5P_{и}l/b h^2,$$

где P_p , P_c , $P_{и}$ — наибольшая нагрузка, предшествующая разрушению образца при статическом растяжении, сжатии и изгибе соответственно; F_0 — площадь поперечного сечения бруска до испытания; l - длина бруска между опорами; b - ширина; h - высота бруска. При измерении σ_p можно одновременно определить значение относительного удлинения δ (или $\Delta l / l$)100 % материала перед разрывом, являющегося важной технической характеристикой.

У металлов значения σ_p , σ_c , $\sigma_{и}$ одного порядка, поэтому их механическую прочность обычно характеризуют только пределом прочности на разрыв и обозначают σ_p , кгс/мм² или МПа, у диэлектриков (неорганические стекла, керамика, пластмассы и др.) σ_c , как правило, намного больше, чем σ_p , и $\sigma_{и}$ (например, у кварцевого стекла $\sigma_c \sim 2 \cdot 10^3$ МПа, а $\sigma_p = 50$ МПа), поэтому их механическую прочность (в зависимости от вида приложенной нагрузки) оценивают значениями σ_p , σ_c , $\sigma_{и}$, а в ряде случаев еще пределом прочности при кручении σ_k . Для материалов анизотропного строения (слоистых, волокнистых и т. п.) значения механической прочности сильно зависят от направления приложенной нагрузки. Механическая прочность диэлектриков зависит от температуры и с ее ростом, как правило, уменьшается.

Ряд диэлектриков обладает пластичностью - способностью необратимо деформироваться без разрушения под действием внешних сил. С повышением температуры пластичность возрастает. Некоторые материалы (например, ПТФЭ) способны деформироваться при длительном воздействии небольшой механической нагрузки; это явление называют хладотечением.

Для ряда диэлектриков важными характеристиками являются твердость и эластичность. Твердость - это способность материала оказывать сопротивление проникновению в него более твердого тела, и определяют ее в зависимости от природы диэлектрика различными методами (по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, Польди, Шору и на микротвердость).

Эластичность (упругость) - это свойство материала проявлять упругую (обратимую) деформацию без разрушения под воздействием небольших усилий, т. е. после снятия внешних сил восстанавливать свою прежнюю форму. Эластичность - свойство, обратное пластичности.

При динамических нагрузках материал характеризуется удельной ударной вязкостью (испытание на ударный изгиб) $\sigma_{уд}$.

Вязкость - способность материала оказывать сопротивление ударным нагрузкам. Это свойство - обратное хрупкости, поэтому $\sigma_{уд}$ фактически указывает на степень хрупкости материала. Величину $\sigma_{уд}$ на практике измеряют в кгс·см/см² (или кгс/см) или единицах СИ — в Дж/м² (1кгс · см/см² ~ 1 кДж/м²). Высокой $\sigma_{уд}$ обладает ПЭ, у которого $\sigma_{уд}$ превышает 100 кДж/м², в то время как у микалекса $\sigma_{уд} = 2-5$ кДж/м².

При знакопеременных нагрузках прочность материалов характеризуют усталостной прочностью - величина наибольшего напряжения, которое может выдержать материал без разрушения при заданном числе перемен нагрузки (циклов). Для материалов подвижных контактов важной характеристикой является износостойкость.

Практическое занятие 19

ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕРЬ В ЛИСТОВЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Цель занятия: Ознакомиться с методом определения магнитных потерь в листовых ферромагнитных материалах при заданной амплитуде индукции.

Общие положения

Свойства ферромагнитных материалов влияют на характеристики электрических машин, аппаратов и приборов, в которых они применяются.

На практическом занятии из многочисленных характеристик магнитных материалов, определяемых их магнитными свойствами, рассматриваются только магнитные потери в электротехнических сталях

При работе в переменных магнитных полях в магнитных материалах возникают потери энергии, обусловленные потерями на гистерезис, на вихревые токи и на дополнительные потери (обусловленные такими явлениями, как магнитная вязкость, резонанс смещения магнитных стенок, резонанс, вызванный анизотропностью и вращением вектора намагниченности и резонанс формы). Потери на гистерезис за один цикл перемагничивания определяются площадью статической петли гистерезиса, полученной при медленном изменении магнитного поля. Потери на вихревые токи определяются величиной электрического сопротивления магнитного материала и зависят от частоты перемагничивания, возрастая про-

порционально квадрату увеличения частоты изменения магнитного поля. Все эти потери сопровождаются поглощением энергии магнитного поля и превращением ее в конечном счете в тепло.

Таким образом, общие потери в ферромагнетиках, находящихся в переменном магнитном поле, можно представить в виде суммы:

$$P_c = P_2 + P_e + P_d$$

где: P_2 – потери на гистерезис;

P_e -- потери на вихревые токи;

P_d -- дополнительные потери.

Мощность потерь, отнесенная к единице массы (веса) или единицы объема материала, называется удельной мощностью потерь.

Мощность потерь на гистерезис определяется как:

$$P_r = \eta \cdot f \cdot B_{\max}^n \cdot v ,$$

где η – коэффициент потерь на гистерезис, зависящий от материала;

B_{\max} – максимальная магнитная индукция, достигаемая в течение цикла;

n – показатель степени в пределах от 1,6 до 2 ;

f – частота магнитного поля;

v – объем ферромагнетика.

Мощность потерь на вихревые токи можно определить по формуле:

$$P_B = \varepsilon \cdot f^2 \cdot B_{\max} \cdot v ,$$

где ε – коэффициент, зависящий от типа ферромагнетика (в частности от его удельного электрического сопротивления).

Остальные параметры те же, что и в формуле потерь на гистерезис.

Мощность дополнительных потерь обычно определяется как разность между общими потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи, т.е.:

$$P_{\delta} = P_c - (P_z + P_v).$$

Общие потери в ферромагнетиках с небольшой величиной коэрцитивной силы (в магнитомягких материалах) в переменных магнитных полях небольшой (промышленной) частоты, но большой напряженности обычно оценивают способом ваттметра и использованием установки.

Такая установка представляет собой замкнутый магнитопровод, набранный из полос исследуемого материала (трансформаторной или электротехнической стали) с размещенными на нем двумя обмотками, т.е. является обычным трансформатором. Принципиальная схема установки с измерительными приборами изображена на рисунке 22.

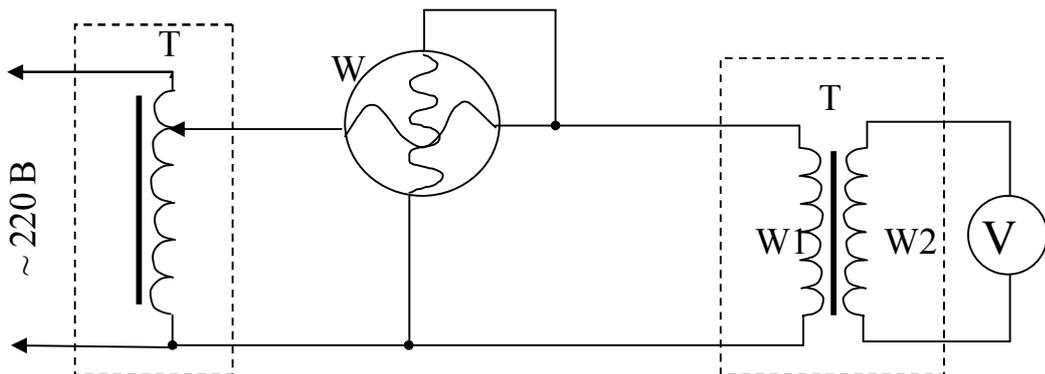


Рисунок 22

где: W – ваттметр, ТА – ЛАТР, V – вольтметр, T – трансформатор

Как видно из приведенной схемы измерительной установки, в первичную обмотку трансформатора включена токовая катушка ваттметра, во вторичную обмотку включен вольтметр. Поскольку никакая другая нагрузка ко вторичной обмотке не подключена, можно считать, что трансформатор работает вхолостую.

Из электротехники известно, что в режиме холостого хода вся подводимая к первичной обмотке трансформатора мощность идет на покрытие его потерь. Так как в таком режиме работы ток во вторичной обмотке почти не протекает, а по первичной обмотке

протекает ток холостого хода, который составляет только доли рабочего тока, то потерями в обмотках трансформатора («меди») в режиме холостого хода обычно пренебрегают, и относят всю потребляемую при этом трансформатором мощность к потерям в его сердечнике («железе»). Измерительные приборы, подключенные к трансформатору, потребляют некоторую мощность, измеряемую ваттметром, поэтому общая мощность:

$$P_o = P_{cm} + P_v + P_w.$$

Отсюда можно определить общие потери в стали сердечника трансформатора:

$$P_{cm} = P_o - (P_v + P_w).$$

Зная сопротивление приборов вольтметра P_v и обмотки напряжения ваттметра P_w , можно найти потери в стали:

$$P_{cm} = P_o - \left(\frac{U_v^2}{R_v} + \frac{U_{1w}^2}{R_w} \right). \quad (5)$$

Общая удельная мощность потерь в стали:

$$P_{oy} = \frac{P_{cm}}{m}, \quad (6)$$

где: m – масса сердечника, кг.

Значение P_{oy} оценивают при определенном значении индукции B_{max} в сердечнике трансформатора и определенной частоте магнитного поля f .

Зависимость общих удельных потерь в стали от индукции $P_{oy} = f(B_{max})$ представляется в основном в виде графика. Причем величина индукции в сердечнике измеряется косвенным методом, для чего используется хорошо известное в электротехнике соотношение между э.д.с. индуктируемой во вторичной обмотке трансформатора (e_2) и максимальной величиной индукции B_{max} в сердечнике трансформатора, (здесь $e_2 \approx U_2$):

$$U_2 = 4,44 \cdot f \cdot \omega_2 \cdot S \cdot B_{max} \cdot 10^{-8}, \text{ В} \quad (7)$$

где: ω_2 – число витков вторичной обмотки трансформатора;
 S – площадь сечения сердечника трансформатора, см^2 .

Порядок проведения занятия

1. Рассчитать значения напряжения U_2 во вторичной обмотке трансформатора, соответствующие заданным величинам f и B_{\max} (см. табл. 10). Расчет вести по формуле 7. Параметры испытуемого трансформатора: $m =$ кг; $S =$ см^2 ; $\omega_2 =$ витков.

Таблица 10

№ п/п	B_{\max} , Тл	f , Гц	U_2 , В	P , Вт	P_v , Вт	P_w , Вт	P_{cm} , Вт	P_{oy} , Вт
1	0	50						
2	2080	50						
3	3120	50						
4	4160	50						
5	5200	50						
6	6240	50						
7	7275	50						
8	8325	50						
9	9590	50						

2. Используя выражения (5) и (6), по параметрам данным преподавателем и при известных параметрах приборов R_v и R_w , вычислить последовательно сначала P_{cm} , а затем P_o для всех значений U_2 .

3. По полученным данным построить график зависимости $P_{oy} = f(B_{\max})$

Практическое занятие 20

РАСЧЕТ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Цель занятия: Расчетным путем определить ширину запрещенной зоны полупроводника.

Общие положения

Согласно квантовой теории энергия электронов в атоме может принимать лишь дискретные значения. Эти значения образуют так называемые уровни энергии. На каждом энергетическом уровне в соответствии с принципом Паули может находиться не более двух электронов с противоположными направлениями собственных моментов (спинов). Атомы кристаллической решетки образуют

единую квантовую систему, в пределах которой тоже действует принцип запрета Паули.

Уровни энергии объединяются в зоны: 1) валентную; 2) запрещенную и 3) свободную зону или зону проводимости. У проводников запрещенная зона, расположенная между валентной и свободной зонами, отсутствует. У диэлектриков она значительно больше чем у полупроводников.

Полупроводники по величине проводимости занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Важным их свойством является возрастание проводимости с повышением температуры, в то время как у металлов – проводников проводимость снижается.

При абсолютном нуле температуры все электроны атомов кристалла должны иметь минимальную энергию. Электроны металлов попарно располагаются на уровнях валентной зоны, причем часть этих уровней остается незаполненной. Расстояние между соседними энергетическими уровнями порядка 10^{-23} ЭВ, т.е. чтобы перевести электрон с соседнего уровня на следующий, более высокий, надо затратить энергию 10^{-23} ЭВ.

Уже при 1° энергия теплового движения электрона составляет 10^{-4} ЭВ, что значительно больше указанной энергии. Это значит, что при температурах, отличных от 0°K , электроны металла вследствие теплового движения переходят на более высокие уровни. Если металл поместить в электрическое поле, то электроны приобретают дополнительную энергию, т.к. будут ускоряться полем, обеспечивая хорошую проводимость.

У полупроводников при 0°K все уровни валентной зоны попарно заполнены электронами и незаполненных уровней нет. Чтобы электроны могли переместиться из валентной зоны в свободную зону, надо сообщить энергию $\Delta W_{\text{пп}}$ порядка нескольких десятых долей электрон-вольта. Энергия теплового движения при комнатной температуре и выше оказывается достаточной для преодоления этой запрещенной зоны и перевода электронов в свободную зону, которая является зоной проводимости для них. Одновременно электроны с более низких уровней валентной зоны будут подниматься на более высокие освобожденные уровни.

У диэлектриков валентная зона полностью заполнена. Энергия необходимая для ее преодоления (ширина запрещенной зоны)

ΔW_d порядка нескольких электрон-вольт. Поэтому диэлектрики имеют проводящие свойства при высоких температурах.

Рассмотрим, как можно определить ширину запрещенной зоны полупроводников опытным путем.

Из квантовой теории известно, что удельная проводимость полупроводников:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W_{mn}}{2KT}}$$

где σ_0 – проводимость при абсолютном нуле температуры;

T – абсолютная температура в данный момент;

K – постоянная Больцмана, $K = 8,6167 \cdot 10^{-5}$ ЭВ·град⁻¹

ΔW_{mn} – ширина запрещенной зоны полупроводника.

При известном значении σ и линейных размерах можно определить величину сопротивления полупроводникового образца:

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S},$$

где l – длина образца;

S – площадь его поперечного сечения.

Взяв отношение сопротивлений образца при разных температурах получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = e^{\frac{\Delta W_{mn}}{2K} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

Прологарифмируем полученное выражение:

$$\ln \frac{R_1}{R_2} = \frac{\Delta W_{mn}}{2K} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right).$$

Из последнего выражения, после преобразований, получим:

$$\Delta W_{mn} = 2K \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}, \quad (8)$$

где T_1 – меньшее, а T_2 – большее значение абсолютной температуры образца полупроводника при нагреве.

Подставив в формулу (8) полученные параметры (по указанию преподавателя) и постоянную Больцмана определим аналитически ширину запрещенной зоны полупроводника $\Delta W_{\text{пп}}$. В этом заключается сущность аналитического способа нахождения величины $\Delta W_{\text{пп}}$.

Порядок проведения занятия

1. Получить исходные данные для расчета у преподавателя и занести их в таблицу 11.

Таблица 11

Исходные данные			Вычислить			
U, В	I, А	T, °К	R, Ом	T ⁻¹	ln R	$\Delta W_{\text{пп}}$, ЭВ

2. Определить величины $\Delta W_{\text{пп}}$ аналитическим способом. Для этого, выбрав по таблице 3 значения сопротивления R (рассчитываются по закону Ома при известных U и I) и соответствующие температуры, рассчитывают $\Delta W_{\text{пп}}$ по формуле (8). Результат занести в таблицу 11.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материаловедение и технология конструкционных материалов [Текст]: учебник / под ред. В.Б. Арзамасова, А.А. Черепахи-на.- 3-е изд., стер.- Москва: Академия, 2011. – 448 с.
2. Материаловедение в машиностроении [Текст]: учебник для бакалавров / А.М. Адаскин [и др.]. – Москва: Юрайт, 2012. – 535 с.
3. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкци-онных материалов [Текст]: учебник / Колесов С.Н., Колесов И.С. - Москва: Высшая школа, 2004. – 519 с.
4. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник / Фетисов Г.П. – Москва: Высшая школа, 2005. – 862 с.
5. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электро-технические материалы[Текст]: учебник - Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985. - 304 с.
6. Материалы для производства электронной техники[Текст]: учебное пособие / Г.Н. Кадыкова, Г.С. Фонарев, В.Д. Хвостикова и др. - Москва: Высшая школа, 1987. - 358 с.
7. Алиев И.И., Калганова С.Г. Электротехнические материалы и изделия[Текст]: справочник.- М.: ИП РадиоСофт, 2005. - 352 с.