

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)**

Т.Ю. Ковалёва

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

**Методические указания
к лабораторным работам**

СПб ГУТ)))

**Санкт-Петербург
2017**

УДК 621.396

План УМД 2017 г., п.

Рецензент:

Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом СПбГУТ.

Ковалева, Т.Ю.

Материаловедение и обработка материалов: методические указания к лабораторным работам / Т.Ю. Ковалева; СПбГУТ. – СПб., 2017 – 32 с.

Методические указания к лабораторным работам содержат описание и методику проведения работ по разделам: «Конструкционные материалы» и «Радиотехнические материалы».

Предназначено для подготовки магистров по направлению «Экология и природопользование» (05.04.06)

© Ковалёва Т.Ю., 2017

© Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2017

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОТОЖЖЕННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение строения и свойств отожженных углеродистых сталей в зависимости от содержания углерода и ознакомление с методикой проведения металлографического анализа металлических материалов.

2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями к работе.

2.2. Ознакомиться с методикой проведения металлографического анализа.

2.3. Исследовать под микроскопом микроструктуру технически чистого железа доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталей в отожженном состоянии.

2.4. Изобразить диаграмму состояний железоуглеродистых сплавов и нанести на нее ординаты исследуемых сталей с указанием фигуративных точек.

2.5. Проанализировать процессы, протекающие в доэвтектоидной и заэвтектоидной сталях при медленном охлаждении с 1539°C и объяснить состояние этих сталей в фигуративных точках.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ

Железоуглеродистыми сталями называют железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 2 %. Кроме железа и углерода в углеродистых сталях в виде примесей содержатся : марганец, фосфор, сера и другие элементы. Вредными примесями являются фосфор, придающий хрупкость сплаву в холодном состоянии и сера, придающая хрупкость сплаву в горячем состоянии. Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода менее 0,04 % называют технически чистым железом (в технике армко-железо) или мягкой сталью. Технически чистое железо имеет температуру плавления 1539°C . В твердом состоянии железо находится в 2 аллотропических состояниях- модификациях: альфа-железо ($Fe-\alpha$) и гамма-железо ($Fe-\gamma$). При нагревании $Fe-\alpha$ существует до 910°C и имеет объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК). $Fe-\alpha$ пластично и магнитно до 768°C . Выше этой температуры альфа-железо немагнитно.

Гамма-железо существует в интервале температур от 910°C до 1401°C с кристаллической решеткой гранцентрированного куба (ГЦК). При 1401°C

$Fe-\gamma$ превращается в высокотемпературное $Fe-\alpha$ и сохраняет эту форму до расплавления. При медленном охлаждении превращения происходят в обратном направлении. Обе модификации железа по разному определяют свойства сталей, так как имеют неодинаковую способность растворять углерод: так, в $Fe-\alpha$ содержание $C \leq 0,025\%$, а в $Fe-\gamma$ содержание $C \leq 2\%$.

Основой для определения структуры и свойств железоуглеродистых сплавов является диаграмма состояния железо-углерод (цементит). На рис.1.1 представлен упрощенный вариант диаграммы $Fe - Fe_3C$. Ось концентраций (абсцисс) двойная, она отражает содержание углерода и цементита.

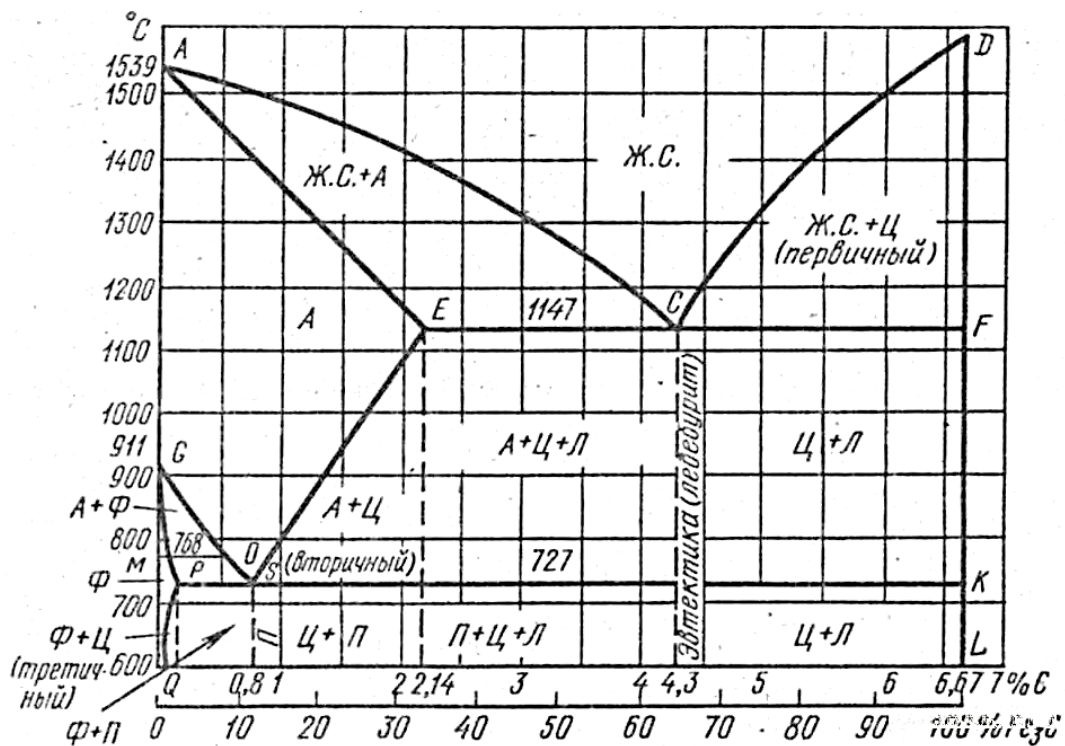


Рис.1.1 Диаграмма состояний железо-углерод железуглеродистых сплавов
 А – аустенит, П – перлит, Л – ледебурит, Ф – феррит, Ц – цементит, Ж.С. – жидкая среда (L)

Точка А на диаграмме соответствует температуре плавления железа, точка D - цементита.

Содержание углерода определяет структуру и свойства углеродистых сталей. Основными структурными составляющими углеродистых сталей являются: феррит (Ф), аустенит (А), цементит (Ц) и перлит (П).

Феррит - твердый раствор углерода в $Fe-\alpha$. Ввиду малого содержания углерода феррит называют техническим железом.

Аустенит - твердый раствор углерода в гамма-железе. Существует при температурах выше 727°C .

Цементит - химическое соединение железа с углеродом Fe_3C (углерода 0,67%). Обладает высокой твердостью и большой хрупкостью.

Перлит - эвтектоид. Представляет собой пластинчатую или зернистую механическую смесь феррита и цементита. Содержит 0,8% углерода. Образуется при $t^{\circ} = 727^{\circ}\text{C}$ в процессе медленного охлаждения аустенита.

В точке С диаграммы (концентрация 4,3% С и $t^{\circ} = 1147^{\circ}\text{C}$) образуется эвтектико - ледебурит (Л).

Ледебурит - механическая смесь аустенита и цементита, образующаяся из жидкого расплава.

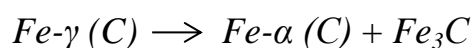
Линия АСD - ликвидус (выше этой линии существует жидкий раствор L) показывает начало первичной кристаллизации: по линии АС из жидкого раствора L начинает кристаллизоваться аустенит, по CD – цементит.

В области АСЕ существует жидкий раствор и кристаллы аустенита ($L + A$), а в области CDF - жидкий раствор и кристаллы цементита ($L + Ц$). Точка E диаграммы показывает максимальную растворимость углерода в аустените при $t^{\circ} = 1147^{\circ}\text{C}$. Эта точка принята границей деления железоуглеродистых сплавов по стали (до 2,14% С) и чугуна (свыше 2,14% С).

Линия АЕСF – солидус – характеризует конец первичной кристаллизации, начало вторичной кристаллизации (перекристаллизации), характерной для твердой фазы.

Прямая ЕСF - линия эвтектических превращений. Точка G диаграммы соответствует температуре аллотропического превращения чистого железа (911°C). С повышением содержания углерода до 0,8% температура превращения аустенита А в феррит Ф постепенно снижается и достигает 727°C . Линия GS – начало, линия GP – конец превращения аустенита в феррит. Область GPQ – характеризует феррит (Ф).

В точке (0,8% С и $t^\circ = 727^\circ\text{C}$) протекает реакция распада аустенита $Fe-\gamma$:



Продуктом распада аустенита является перлит-эвтектоидная смесь ($\Phi + \Pi$).

В области GSP – существует аустенит и феррит ($A + \Phi$), а в области QPS 0,8 - перлит и феррит ($\Pi + \Phi$).

Линия SE - линия ограниченной растворимости углерода в аустените. При понижении температуры растворимость падает с 2,14% С до 0,8% С. Избыточный углерод при охлаждении выпадает из аустенита в виде карбида железа Fe_3C . Поэтому в области SEE существует аустенит и цементит вторичный ($A + \Pi_{II}$). Вторичный потому, что аустенит образуется из твердой фазы. В области 0,8 S E – 2,14 - существует перлит и цементит ($\Pi + \Pi_{II}$).

В зависимости от содержания углерода стали делят на доэвтектоидные ($C < 0,8\% \text{ C}$) - их также можно называть конструкционными; эвтектоидные ($C = 0,8\%$) и заэвтектоидные ($C > 0,8\%$). Последние две группы можно назвать инструментальными.

Структура доэвтектоидных сталей состоит из феррита (белые включения) и перлита (темные включения) (рис.1.2.б). С увеличением содержания углерода количество феррита уменьшается, а перлита – увеличивается (рис.1.2.в).



Рис. 1.2. Схемы структуры отожженных углеродистых сплавов
а - технически чистое железо; б - доэвтектоидная сталь;
в - эвтектоидная сталь; г - заэвтектоидная сталь.

При содержании углерода 0,8% сталь состоит из одного перлита (рис.1.2, в). Сталь с содержанием углерода от 0,8% до 2% состоит из перлита и цементита (рис.1.2.г). Таким образом, повышение содержания углерода в стали приводит к увеличению в ее структуре количества цементита и к уменьшению количества феррита.

Количественное соотношение между ферритом и цементитом обуславливает свойства стали. Чем больше в стали углерода, а следовательно, и цементита, тем выше ее твердость и ниже пластичность. Отожженное состояние сталей характеризуется равновесной, т.е. ненапряженной структурой, полученной при медленном охлаждении с температурой на 30-50°C выше критических точек. Строение металлов и сплавов изучают посредством проведения макроскопического, микроскопического, рентгеноструктурного и термического анализов.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Исследование структуры отожженных железоуглеродистых сплавов проводится методом оптической микроскопии. Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры материалов при больших увеличениях (от 50 до 2000 раз) с помощью микроскопа. При таком увеличении можно обнаружить отдельно элементы структуры размером не менее 0,2 мкм, что достаточно для определения размеров многих фаз металлических сплавов.

Изучение в микроскопе структуры металлов, а также непрозрачных неметаллических материалов возможно лишь при достаточно интенсивном отражении световых лучей от исследуемой поверхности. Поэтому поверхность образца - микрошлифа должна быть специально подготовлена.

4.1. Ознакомиться с технологическим процессом изготовления микрошлифов.

4.2. Ознакомиться с конструкцией металлографического микроскопа.

С помощью инструкции, имеющейся на рабочем месте, ознакомиться со схемой микроскопа. После этого подготовить микроскоп к работе.

4.3. Поместить изучаемый микрошлиф на предметном столике микроскопа.

4.4. По наблюдаемым в микроскопе структурам определить структурные составляющие изучаемых сталей.

4.5. Определить процентное содержание углерода в доэвтектоидной стали по процентному соотношению занимаемых ферритом и перлитом площадей на микрошлифе.

Если перлит занимает n % площади микрошлифа, то содержание углерода в стали определяется следующим образом:

$$C = \frac{0,8 \cdot n}{100} \%$$

4.6. Дать краткое описание исследованных структур сплавов по табл.1.1.

Таблица 1.1.

| № шлиф | Схема микроструктуры | Описание микроструктуры |
|--------|----------------------|-------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |

4.7. Дать описание процессов, протекающих в сталях при медленном охлаждении с 1539°C , посредством анализа их фазового состава в фигуративных точках диаграммы состояния (рис. 1.1) в табл. 1.2.

Таблица 1.2

| Фигуративная точка | Фазовый состав и фазовые превращения |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| I Доэвтектоидная сталь (C = %) | |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| · | |
| · | |
| 11 | |
| II Заэвтектоидная сталь (C = %) | |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| · | |
| · | |
| 9 | |

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчет должен содержать цель работы, схему и описание микроструктур, диаграмму состояний железоуглеродистых сплавов и анализ процессов, протекающих при медленном охлаждении сплавов по фигуративным точкам.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют углеродистыми сталями?
2. Какие аллотропические составляющие имеются в отожженных углеродистых сталях?
3. Что представляют собой феррит, аустенит, цементит и перлит?
4. В чем состоит сущность микроскопического анализа?
5. Какие стали относят к доэвтектоидным, эвтектоидным и заэвтектоидным?
6. Какие превращения имеют место в доэвтектоидной стали при медленном охлаждении?

Лабораторная работа 2

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение влияния термической обработки на свойства углеродистых сталей и умения оценивать влияние режимов закалки и отпуска на механические свойства конструкционных углеродистых сталей.

2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с основными видами термической обработки сталей.

2.2. Исследовать под микроскопом закалочные структуры конструкционных углеродистых сталей, в том числе и с последующим отпуском.

2.3. Определить твердость исследуемых сталей, закаленной и подвергнутой низкому, среднему и высокому отпуску.

2.4. Проанализировать влияние режимов закалки и отпуска на твердость сталей.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ

Посредством термической обработки (ТО) материалам придают наиболее выгодные технологические и служебные свойства. Основными видами термической обработки углеродистых сталей являются: отжиг, нормализация, закалка, отпуск. Отжиг и нормализацию применяют для улучшения технологических свойств сталей и снятия внутренних напряжений, а так же для облегчения обработки резанием. Отжиг и нормализация придают мелкозернистость структурам и улучшают механические свойства сталей.

Закалку и отпуск применяют как окончательную термическую обработку стальных изделий. Закалка и отпуск повышают прочность и твердость сталей с обеспечением приемлемой пластичности. Каждый вид термической обработки характеризуется температурой нагрева, выдержкой при этой температуре и скоростью охлаждения (рис.2.1). Температуру нагрева той или иной термической обработки сталей устанавливают по диаграмме состояний железо-углерод в зависимости от содержания углерода (рис.1.1).

Отжиг стали заключается в нагреве до критической температуры, выдержки и медленного охлаждения вместе с печью. Доэвтектоидные стали для отжига нагревают на 30-50° выше линии GOS . При этой температуре сталь приобретает структуру мелкозернистого аустенита. В процессе медленного охлаждения мелкозернистый аустенит преобразуется в тонкопластинчатый перлит с сеткой феррита. Нагрев до более высокой температуры сопровождается ростом зерна аустенита, т.е. ведет к перегреву стали.

Отжиг доэвтектоидной стали производится в два приема: сначала нагрев до линии SE со сравнительно быстрым охлаждением, а затем нагрев и медленное охлаждение вместе с печью. В результате получается равновесная структура отжига, состоящая из перлита и мелкозернистого цементита.

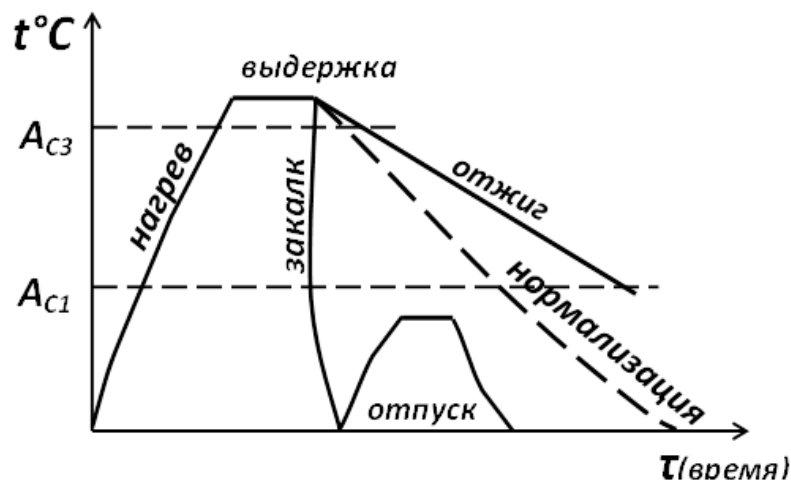


Рис.2.1. Термические кривые видов термической обработки

Нормализация (ускоренный отжиг) отличается от нормального отжига тем, что охлаждение стали после нагрева и выдержки ведут не вместе с печью, а на воздухе. Структура нормализованных сталей такая же, как и отожженных. Однако при нормализации она получается менее равновесная, которую называют сорбит.

Закалка углеродистой стали состоит в нагреве, выдержке и быстром охлаждении. Различают полную и неполную закалку углеродистых сталей. Полную закалку, как правило, применяют для доэвтектоидных, а неполную - для заэвтектоидных сталей. При полной закалке нагрев должен обеспечивать полный переход структурных составляющих в аустенит. Таким образом, закалка стали – это операция, заключающаяся в нагреве стали до температур, исключающих сохранение $Fe-\alpha$ и обеспечивающих получение аустенитной структуры сплавов, которая при быстром охлаждении превращается в мартенсит.

Это означает что доэвтектоидные стали должны нагреваться на 30-50°C выше линии CO_S "точка A_{c_3} ", а эвтектоидные и заэвтектоидные стали должны нагреваться на 30-50°C выше линии PSK "точка A_{c_1} " (рис. 2.2.).

Мартенситом называют пересыщенный или насильственный твердый раствор углерода в $Fe-\alpha$ с тетрагональной кристаллической решеткой, образующийся при охлаждении аустенита со скоростью выше критической, т.е. при очень быстром охлаждении. Мартенит, как закаленная структура, характеризуется высокой прочностью и твердостью, но малой пластичностью и вязкостью. Твердость мартенсита по Бринеллю достигает 600-650 кг/мм².

а) мартенсит б) тростит в) сорбит

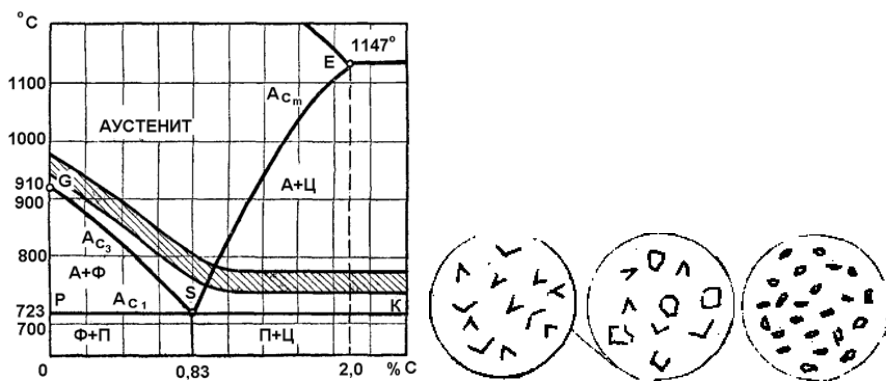


Рис.2.2. Температурный интервал закалки стали

Рис.2.3. Схемы структур углеродистой стали

Структура мартенсита состоит из тонких пластин, расположенных под углом 60° и 120°. При рассмотрении в микроскоп структура мартенсита игольчатая. Размеры игл зависят от величины зерна аустенита. На рис.2.3. схематически изображена структура мартенсита закалки, наблюдаемая в микроскоп, состоящая из игл мартенсита (м) и остаточного аустенита (А).

Мелкоигольчатый мартенсит получается при закалке с температурой выше линии GOS (точка A_{c_3}) на 30-50°C и имеет лучшие механические свойства.

Крупноигольчатый мартенсит получается при закалке перегретого крупнозернистого аустенита. Твердость, ударная вязкость крупноигольчатого мартенсита снижается, в связи с этим полную закалку (нагрев выше линии SE или выше точки A_{c_m}) доэвтектоидной стали обычно не производят.

Закалка углеродистых сталей со скоростью охлаждения меньше

критической наряду с мартенситом приводит к образованию тростита или сорбита.

Троститом называют мелкодисперсную механическую смесь феррита и цементита. Тростит имеет пластинчатую перлитоподобную структуру, которую можно рассмотреть только в электронный микроскоп. На рис.2.3,б схематически изображена структура тростита закалки. Твердость тростита по Бринеллю составляет 300 – 400 кг/мм².

Сорбитом закалки называют пластинчатую феррито-цементитную смесь с толщиной пластин большей, чем у структуры тростита | (рис.2.3,в) Твердость сорбита находится в пределах 270 – 300 единиц Бринелля. Сравнительные характеристики свойств закалочных структур представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

| Вид закалочных структур | Характеристика структуры | Температура (°С) и скорость охлаждения | HRC | HRB кг/мм ² |
|-------------------------|---|--|---------|------------------------|
| Мартенсит закалки | Пересыщенный твердый раствор углерода в <i>Fe-α</i> | 750-100°С (на 50° выше <i>GSK</i>) $V > V_{крит}$ | 59 – 63 | 600 – 650 |
| Тростит закалки | | $V_1 < V_{крит}$ | 33 – 43 | 300 – 400 |
| Сорбит закалки | | $V_2 < V_1 < V_{крит}$ | 28 – 33 | 270 – 300 |

Заключение. Структуры углеродистых сталей обладают повышенной хрупкостью. Для повышения вязкости и пластичности закалочные изделия подвергают отпуску.

Отпуск стали заключается в нагреве закаленной стали до температуры ниже линии *PSK* (точка *Ac₁*), выдержке при данной температуре и постепенном охлаждении.

Как правило, структура закаленной стали перед отпуском состоит из мартенсита и остаточного аустенита.

Температуру отпуска выбирают в зависимости от требуемых механических свойств. Зависимость температуры нагрева закаленной стали на ее свойства и структуру представлена в табл.2.2.

Таблица 2.2.

| t отпуска °C | Вид отпуска | Структура отпуска ста- ли | Твердость по Роквеллу HRC (<i>усл.ед.</i>) | Твердость по Бринеллю HRB (<i>кг/мм²</i>) |
|-------------------|-------------|--|--|--|
| 150 – 300 | Низкий | Мартенсит отпуска (кубический) | 58 – 63 | 600 – 650 |
| 350 – 500 | Средний | Тростит отпуска (тро- стомартенсит) | 40 – 50 | 350 – 500 |
| 500 – 600 | Высокий | Сорбит отпуска | 30 – 33 | 280 – 300 |

Углеродистая сталь после низкого отпуска имеет структуру мартенсита отпуска, которая отличается от мартенсита закалки кубической решеткой и представляет собой смесь неоднородного мартенсита с мельчайшими частицами цементита. На микрошлифах иглы мартенсита отпуска более темные, так как вследствие неоднородности они травятся интенсивнее.

Структуры тростита и сорбита отпуска существенно отличаются от сорбита и тростита закалки, так как приобретают зернистое строение цементита вместо пластинчатого. Благодаря этому механические свойства сталей более высокие, так как отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке.

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

4.1. Исследование микроструктуры одной из конструкционных углеродистых сталей, закаленной при разных режимах.

Исследование микроструктуры изучаемых сталей проводят с помощью микроскопического анализа. Микроскопический анализ заключается в изучении строения металла с помощью микроскопа. Оптические микроскопы позволяют вести исследования строения металла и сплава при увеличении в 50 – 2000 раз. Строение тростита почти не выявляется под оптическим микроскопом ввиду значительной измельченности частиц цементита и феррита, выделяется в виде темных образований (за счет травимости). Пластинчатое строение тростита

закалки установлено исследованием в электронном микроскопе. Сорбит закалки в оптическом микроскопе выявляется отчетливее, чем тростит закалки. Мартенсит закалки отчетливо просматривается в оптический микроскоп, видны крупные кристаллы (иглы) мартенсита и остаточный аустенит.

4.1.1. Ознакомиться с конструкцией металлографического микроскопа (инструкция на рабочем месте).

4.1.2. Поместить изучаемый микрошлиф на предметном столике микроскопа.

4.1.3. По наблюдаемым в микроскопе структурам определить предположительно вид закалочных структур. Результаты занести в табл.2.3.

4.2. Исследовать влияние режима отпуска на механические свойства стали.

При выполнении данного раздела лабораторной работы для оценки механических свойств предусматривается проведение испытаний на твердость образцов углеродистой стали. Студенту предоставляется 4 образца-микрошлифа, подвергнутых закалке и отпуску при различных температурах.

4.2.1. Ознакомиться с методом определения твердости по Роквеллу.

С помощью инструкции, имеющейся на рабочем месте, ознакомиться с устройством и работой прибора.

4.2.2. Подготовить прибор к работе.

4.2.3. Провести измерения твердости и записать результаты измерений в табл.2.3.

4.2.4. Результаты измерений чисел твердости по Роквеллу перевести в числа твердости по Бринеллю с помощью соответствующих таблиц перевода. Таблицы даны в приложении П.1 и имеются на рабочем месте.

Таблица 2.3

| № образца | Предполагаемая структура | Твердость | |
|-----------|--------------------------|-----------|-----|
| | | HRC | HRB |
| I | | | |
| 2 | | | |
| ... | | | |

4.2.4. Провести анализ влияния режимов закалки и отпуска по твердости конструкционных углеродистых сталей. Данные занести в табл.2.4.

Таблица 2.4

| № образца | НВ | Вид ТО | Температура ТО | Наименование структуры | Описание структуры |
|-----------|----|--------|----------------|------------------------|--------------------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схематические изображения структур закаленных сталей, краткое описание этих структур, табл. измерений твердости по Роквеллу и анализ влияния режимов закалки и отпуска на твердость конструкционных углеродистых сталей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды термической обработки применяют для углеродистых сталей?
2. В чем сущность и назначение отжига и нормализации углеродистых сталей?
3. В чем состоит сущность и назначение закалки и отпуска углеродистых сталей?
4. Какую структуру углеродистой стали обуславливает закалка и отпуск?
5. В чем разница в структурах тростита и сорбита, полученных закалкой и отпуском?
6. Описать структуру мартенсита, сорбита и тростита.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердого диэлектрика и характера влияния на них частоты изменения электрического поля.

2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с теорией исследуемого вопроса.

2.2. Ознакомиться с методикой измерения и расчета исследуемых параметров диэлектрика.

2.3. Определить значения добротности (Q_1 и Q_2) и емкости (C_1 и C_2) колебательных контуров для заданных значений частоты изменения электрического поля.

2.4. Рассчитать значения емкости (C_x), тангенса угла диэлектрических потерь ($tg \delta_\epsilon$) и диэлектрической проницаемости (ϵ) диэлектрика для заданных частот изменения электрического поля.

2.5. Построить графики частотных зависимостей $tg \delta_\epsilon = \varphi(f)$, $\epsilon = \varphi(f)$ и провести их анализ.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ

3.1. Поляризация диэлектрика.

Для диэлектриков, используемых в конденсаторах, основными показателями электрических свойств являются диэлектрическая проницаемость (ϵ) и тангенс угла диэлектрических потерь ($tg \delta_\epsilon$). Значения этих показателей зависят от механизмов поляризации. Под поляризацией диэлектрика понимается процесс ограниченного смещения связанных (в атомах, молекулах и кристаллической решетке) зарядов или ориентации дипольных молекул под воздействием внешнего электрического поля.

По механизмам поляризации диэлектрики подразделяются на неполярные и полярные. К неполярным относятся диэлектрики, молекулы которых не имеют постоянного дипольного момента (центры отрицательных и положительных зарядов совпадают). Для них характерен механизм упругой поляризации за счет упругого смещения связанных зарядов. Примерами неполярных диэлектриков являются полиэтилен, полистирол, фторопласт-4 и др. К полярным относятся диэлектрики, молекулы которых без воздействия внешнего электрического поля имеют дипольный момент (центры противоположных по знаку зарядов не совпадают). Для этих диэлектриков характерно действие механизмов упругой (мгновенной) и дипольно-релаксационной (замедленной) поляризации. Примерами полярных диэлектриков являются целлюлоза, гетинакс, стеклотекстолит и др.

3.2. Диэлектрические потери в диэлектриках.

Под диэлектрическими потерями понимается мощность электрического поля, затрачиваемая на нагрев диэлектрика. К основным видам диэлектрических потерь относятся: потери на электропроводность т.е. обусловленные перемещением свободных зарядов в диэлектрике и потери на поляризацию (характерные для диэлектриков с замедленными видами поляризации).

Тангенс угла диэлектрических потерь является очень важной характеристикой диэлектрика в переменном электрическом поле. Углом диэлектрических потерь (δ_ϵ) называется угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз (φ) между напряжением и током в емкостной цепи. Для определения рассеиваемой в диэлектрике мощности используется эквивалентная схема конденсатора и векторная диаграмма (рис.3.1).

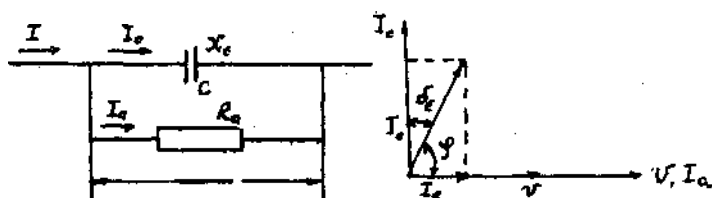


Рис.3.1. Эквивалентная схема и векторная диаграмма:

I_C и I_Q – реактивная и активная составляющие тока в емкостной цепи; R_Q – активное сопротивление, эквивалентное всем видам диэлектрических потерь; X_C – емкостное сопротивление; δ_ϵ – угол диэлектрических потерь.

Из векторной диаграммы следует

$$tg\delta_\varepsilon = \frac{I_a}{I_c} = \frac{I_a \cdot U}{I_c \cdot U} = \frac{P_a}{P_c}$$

$$I_a = I_c \cdot tg\delta_\varepsilon \quad I_c = \frac{U}{x_c} = U \cdot \omega c = 2\pi f \cdot c \cdot U$$

Активная мощность (мощность потерь)

$$P_a = U \cdot I_a = U \cdot I_c \cdot tg\delta_\varepsilon = 2\pi f \cdot c \cdot U^2 \cdot tg\delta_\varepsilon$$

Из полученного выражения следует, что при фиксированных значениях U , C и f активные потери мощности P_a в диэлектрике зависят от тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta_\varepsilon$. Чем меньше значение $tg\delta_\varepsilon$, тем выше качество диэлектрика, так как в нем меньше потерь энергии на нагрев, приводящих к его преждевременному разрушению. У твердых диэлектриков, применяемых в низкочастотных и высокочастотных цепях РЭА, минимальные значения $tg\delta_\varepsilon$ находятся в пределах 0,0002 - 0,005.

Характер частотных зависимостей $tg\delta_\varepsilon = \varphi(f)$ и $P_a = \varphi(f)$ неполярных и полярных диэлектриков показан на рис.3.2.

В неполярных диэлектриках имеют место диэлектрические потери только на электропроводность, которые не зависят от частоты изменения напряженности электрического поля ($P_a = const$). Однако реактивная составляющая мощности растет пропорционально увеличению частоты

$$f(P_c = 2\pi f \cdot c \cdot U^2)$$

Отсюда $tg\delta_\varepsilon = \frac{P_a}{P_c} = \frac{const}{f}$ изменяются по гиперболическому закону.

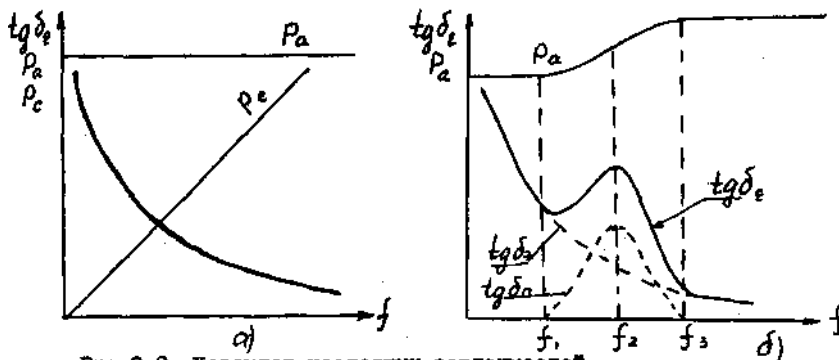


Рис.3.2. Характер частотных зависимостей $tg\delta_\varepsilon = \varphi(f)$ и $P_a = \varphi(f)$ неполярных (а) и полярных (б) диэлектриков

В полярных диэлектриках к потерям на электропроводность ($tg \delta_s$, рис.3.2, б) добавляются потери на поляризацию ($tg \delta_n$, рис.3.2, б), что находит свое отражение в изменении характера частотной зависимости $tg \delta_\varepsilon = \varphi(f)$, где $tg \delta_\varepsilon = tg \delta_s + tg \delta_n$.

Диэлектрическая проницаемость ε характеризует поляризуемость диэлектриков. Поскольку процесс поляризации диэлектриков внешне проявляется в их способности накапливать заряды (образовывать электрическую емкость), то величину диэлектрической проницаемости определяют измерением емкости конденсатора (C_x), между обкладками которого находится испытуемый диэлектрик ($\varepsilon = \frac{C_x}{C_0}$ где C_0 – емкость воздушного конденсатора).

Величина диэлектрической проницаемости диэлектриков определяется видами поляризации, протекающих в них в зависимости от химического состава и структуры. Наименьшую проницаемость $\varepsilon \approx 1$ имеют газы, для неполярных диэлектриков ε в большинстве случаев, меньше 3, а для полярных твердых диэлектриков $\varepsilon = 3-8$. Более высокие значения диэлектрической проницаемости (до 250) имеет конденсаторная керамика. Сверхвысокой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon = 10^3-10^4$) обладают сегнетоэлектрики.

Характер частотной зависимости $\varepsilon = \varphi(f)$ (рис.3.3) обусловлен временем протекания процессов поляризации и, следовательно, частотами, до которых процессы поляризации успевают следить за изменением электрического поля.

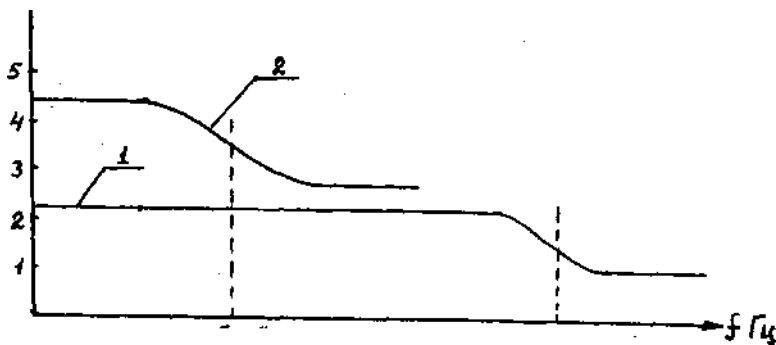


Рис.3.3. Характер частотной зависимости $\varepsilon = \varphi(f)$ неполярных (1) и полярных (2) диэлектриков

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Для определения емкости конденсатора используется прибор «Измеритель добротности». Прибор состоит из генератора электрического тока и измерительного колебательного контура. Упрощенная электрическая схема измерительного контура приведена на рис.3.4.

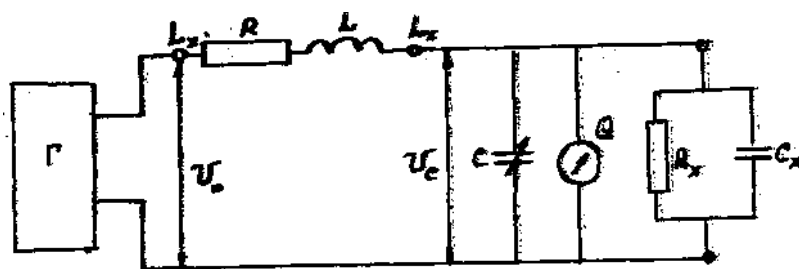


Рис.3.4. Упрощенная электрическая схема измерительного колебательного контура:

R и L – сопротивление и индуктивность эталонной катушки; C – переменный конденсатор; C_x и R_x – параметры эквивалентной схемы испытуемого диэлектрика

К клеммам $L_x - L_x$ подключается эталонная катушка индуктивности с параметрами R и L (номер катушки соответствует определенной частоте, указанной в инструкции по работе с прибором). К клеммам $C_x - C_x$ подключается образец испытуемого диэлектрика с параметрами R_x и L_x . Настройка измерительного контура в резонанс производится с помощью переменного конденсатора, имеющего шкалу. При этом резонанс фиксируется по максимальному показанию вольтметра, проградуированному в единицах добротности контура ($Q = U_c / U_0$), т.е. по максимальному падению напряжения на емкости контура.

Определение емкости образца диэлектрика C_x производится путем двукратной настройки колебательного контура в резонанс. Первая настройка контура производится без подключения образца диэлектрика. При этом фиксируется добротность контура Q_1 и емкость переменного конденсатора C_1 . Вторичная настройка контура производится с подключенным образцом диэлектрика. При этом фиксируется

добротность контура Q_2 и емкость контура $C_2 = C_1 - C_x$. Отсюда ёмкость образца испытываемого диэлектрика будет $C_x = C_1 - C_2$.

Значение тангенса угла диэлектрических потерь рассчитывается по формуле

$$tg\delta_\varepsilon = \frac{C_1(Q_1 - Q_2)}{Q_1 \cdot Q_2 \cdot C_x}$$

Значение диэлектрической проницаемости рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{14,4 \cdot C_x \cdot h}{d^2}$$

где C_x – емкость конденсатора с испытываемым диэлектриком, пФ;

h – толщина диэлектрика, см;

d – диаметр электродов конденсатора, см.

Измерения и расчеты повторяются для различных частей с использованием набора эталонных катушек индуктивности согласно инструкции по работе с измерителем добротности.

Результаты измерений и расчета оформляются в виде табл.3.1.

Таблица 3.1

| Частота, Гц | C_1 пФ | Q_1 | Диэлектрик..... | | | | |
|----------------|-------------|-------|-----------------|-------|-------------|------------------------|---------------|
| | | | C_2 пФ | Q_2 | C_x пФ | $tg\delta_\varepsilon$ | ε |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схему измерительного контура, таблицу результатов измерений и расчета, графики частотных зависимостей $tg \delta_\varepsilon = \varphi(f)$, $\varepsilon = \varphi(f)$ и их анализ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называются диэлектриками?
2. Что такое диэлектрические материалы?
3. Что такое поляризация диэлектриков?
4. Перечислите основные виды поляризации диэлектриков.
5. В чем заключается электронная поляризация? Ионная поляризация?
6. В чем заключается дипольная поляризация?
7. Основные особенности дипольной поляризации.
8. Какие свойства диэлектриков называются диэлектрическими?
9. Что называется абсолютной диэлектрической проницаемостью?
10. Что такое относительная диэлектрическая проницаемость? Дайте толкование ее физического смысла.
11. Как на практике определяют диэлектрическую проницаемость?
12. Что такое тангенс угла диэлектрических потерь?
13. Какие диэлектрики называются неполярными, полярными, ионными? Каковы для них зависимости ϵ и $tg \delta_\epsilon$ от частоты?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПОТЕРЬ В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости тангенса угла диэлектрических потерь различных материалов от температуры на примере высокочастотных и низкочастотных конденсаторов.

2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями к работе.

2.2. Ознакомиться с методикой измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов и методикой расчета температурного коэффициента емкости TKE и температурного коэффициента диэлектрической проницаемости TK материалов конденсаторов.

2.3. Произвести измерения емкости C_x и тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta_\epsilon$ при комнатной температуре в соответствии с заданным вариантом.

Вариант 1. С неполярным пленочным диэлектриком типа: ПО, ПОВ, ПМ, ФТ и полярным бумажным диэлектриком типа: БМ, КИО, Ор.

Вариант 2. С диэлектриком из слюды типа: КСО, СТМ и низкочастотным диэлектриком типа: КДС, КТ, КД, КЛС и др.

Вариант 3. С высокочастотным керамическим диэлектриком типа: КД, КТ, КЛС и др. и оксидным диэлектриком типа: ЭМ, К50 или пленочным полиэтилентерефталатным типа: К73, К74.

2.4. Произвести исследование температурной зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь $tg \delta_\epsilon$ вышеуказанных конденсаторов в соответствии с вариантом.

2.5. Построить графики температурной зависимости емкости $C = \varphi(T)$ и $tg \delta_\epsilon = \varphi(T)$ исследуемых конденсаторов.

2.6. Определить относительное изменение емкости конденсатора в заданном диапазоне температур $T = (20 - 65)^\circ C$.

2.7. Проанализировать полученные результаты и рассчитать температурные коэффициенты емкости и диэлектрической проницаемости TKE и TK_ϵ .

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры $\varepsilon = \varphi(t)$ определяется природой поляризации, имеющей место в данном материале, и оценивается температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости, который равен изменению ε при увеличении температуры на 1°C , $1/\text{град}$:

$$TK_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Зависимость диэлектрической проницаемости ε от температуры обусловлена, во-первых, уменьшением числа поляризующихся частиц диэлектрика в единице объема вследствие теплового расширения, а во-вторых, изменением поляризуемости частиц диэлектрика с температурой.

Электронная поляризуемость не зависит от температуры, так как деформация электронной оболочки не зависит от температуры. Поэтому у неполярных диэлектриков, имеющих только электронную поляризацию, с ростом температуры ε слабо уменьшается вследствие уменьшения плотности при тепловом расширении (рис.4.1.а), TK_ε отрицателен и имеет порядок коэффициента линейного расширения диэлектрика: $(TK_\varepsilon) \sim 100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$. Температурная зависимость $\text{tg } \delta_\varepsilon$ определяется теми видами потерь, которые наблюдаются в диэлектриках.

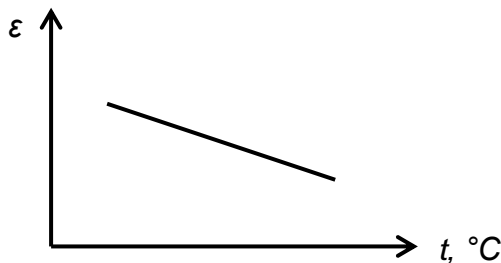


Рис.4.1.а. Зависимость ε от температуры материалов с электронной поляризацией

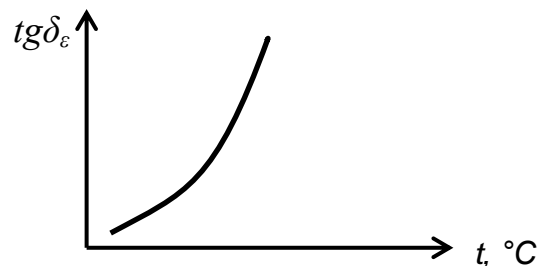


Рис.4.1.б. Зависимость $\text{tg } \delta_\varepsilon$ от температуры материалов с электронной поляризацией

Если в диэлектрике поляризация упругая и отсутствуют поляризационные потери, $\text{tg } \delta_\varepsilon$ возрастает с температурой по экспоненциальному закону (рис.4.1.б), так как имеет место увеличение удельной проводимости. Проводимость в технических диэлектриках обусловлена наличием в них небольшого числа свободных зарядов. Носителями зарядов в диэлектрики в большинстве случаев являются ионы примесей, а не электроны.

У полярных диэлектриков зависимость ε от температуры значитель-

но более сильная и имеет характерный максимум.

С ростом температуры ϵ увеличивается, так как облегчается ориентация в поле полярных молекул или радикалов за счет ослабления межмолекулярного взаимодействия. Наиболее сильный рост ϵ при температурах, близких к температуре плавления или размягчения диэлектрика (рис.4.2)

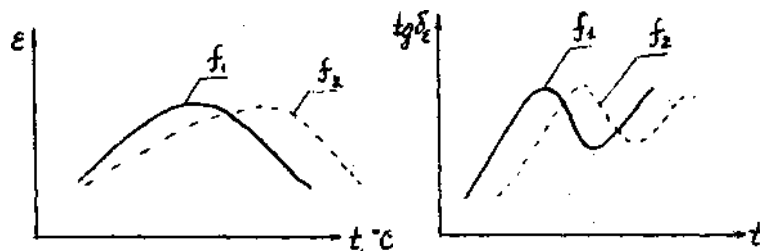


Рис.4.2.а. Зависимость ϵ от температуры полярных диэлектриков

Рис.4.2.б. Зависимость $tg \delta_\epsilon$ полярного диэлектрика от температуры

При более высоких температурах ϵ падает за счет преобладания разориентирующего действия теплового движения. При наличии в диэлектрике релаксационной поляризации зависимость $tg \delta_\epsilon$ от температуры обнаруживает характерный максимум при температуре, для которой время релаксации поляризации $\tau_{рел}$ становится близким к полупериоду изменения напряжения (поля). Если рассматривать дипольно-релаксационную поляризацию на примере жидких диэлектриков, то можно дать следующее объяснение природы в полярных диэлектриках. Дипольные молекулы, следуя за изменением электрического поля, поворачиваются в вязкой среде и вызывает потери электрической энергии на трение с выделением тепла, $atg \delta_\epsilon$ имеет наименьшее значение тогда, когда вязкость жидкости мала и ориентация диполей происходит практически без трения и соответственно без потерь энергии. Также диэлектрические потери будут малы, когда вязкость жидкости достаточно велика и молекулы не успевают следовать за изменением поля. При средней вязкости дипольные потери могут быть существенны и при некотором значении вязкости имеют максимум (рис.4.3). При повышении частоты переменного тока максимум в зависимостях

$\varepsilon = \varphi(t^\circ\text{C})$ и $\text{tg}\delta_\varepsilon = \varphi(t^\circ\text{C})$ сдвигается в область более высоких температур, твердые диэлектрики молекулярной структуры представляют собой главным образом органические вещества. К ним принадлежат материалы на основе целлюлозы (бумага и др.), полярные полимеры, например полиамиды и полиуретаны и ряд других материалов. Все они из-за присущей им дипольно-релаксационной поляризации обладают большими потерями.

В ионных кристаллах с плотной упаковкой в большинстве случаев ε растет с температурой (TK_ε положителен), поскольку при повышении температуры наблюдается не только уменьшение плотности вещества, но и возрастание поляризуемости ионов вследствие ослабления упругой связи между ними при тепловом расширении. При этом влияние второго фактора сказывается на величине ε сильнее и ориентировано $\text{TK}_\varepsilon \sim +100 \cdot 10^{-6}$ 1/град (рис.4.3).

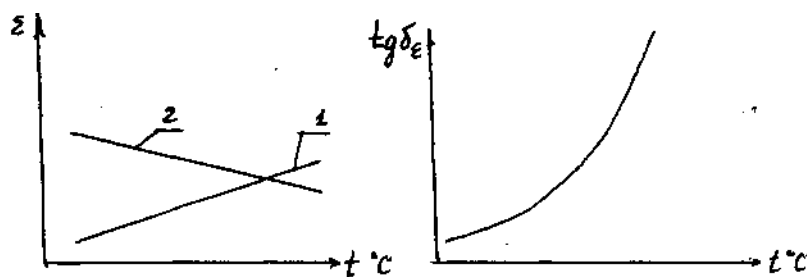


Рис.4.3а. Зависимость ε от температуры для ионных кристаллов

Рис.4.3б. Зависимость $\text{tg}\delta_\varepsilon$ от температуры для ионных кристаллов

- 1 - преобладание ионной поляризации;
- 2 - преобладание электронной поляризации

Исключение представляют кристаллы, содержащие ион титана Ti-O_2 и перовскит Ca Ti-O_3 , у которых преобладает электронная поляризация и TK_ε отрицателен (рис.4.4). В ионных кристаллах с неплотной упаковкой, в которых помимо электронной и ионной поляризации наблюдается также и ионно-релаксационная поляризация. Диэлектрическая проницаемость такого материала увеличивается с ростом температуры за счет увеличения числа слабосвязанных ионов (рис.4.4). TK_ε у диэлектриков с ионно-релаксационной поляризацией достигает больших значений до $\sim +1000 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

При повышении температуры в таких материалах появляются потери

от сквозной электропроводности и от поляризации (рис.4.4). Количество ионов, участвующих в релаксационной поляризации непрерывно возрастает с ростом температуры.

К диэлектрикам кристаллической структуры с неплотной упаковкой ионов относится ряд кристаллических веществ, характеризующихся релаксационной поляризацией, вызывающей повышенные диэлектрические потери. К этим веществам относятся: неорганические стекла; материалы, содержащие стекловидную фазу, фарфор, микалес. К диэлектрикам кристаллической структуры с плотной упаковкой ионов относятся: кварц, слюда, корунд, рутил и др.

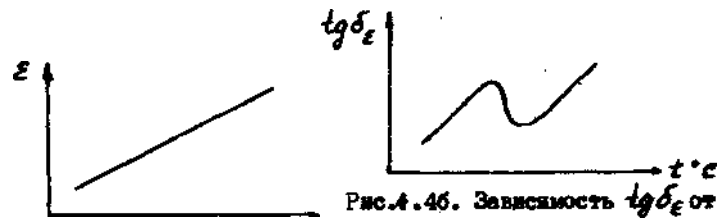


Рис.4.4а. Зависимость ϵ от температуры для материалов с ионно-релаксационной поляризацией

Рис.4.4б. Зависимость $tg\delta_\epsilon$ от температуры для материалов с ионно-релаксационной поляризацией

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Измерение емкости и $tg\delta_\epsilon$ конденсаторов проводится в данной работе с помощью моста переменного тока с цифровым отсчетом. Исследуемые образцы помещаются в термостат.

4.1. Ознакомиться с конструкцией и регулировкой установки.

С помощью инструкции, имеющейся на рабочем месте, ознакомиться с расположением ручек регулировки цифрового моста и термостата. После этого подготовить прибор к работе.

4.2. Исследовать температурную зависимость ϵ и $tg\delta_\epsilon$ образцов твердых диэлектриков.

Температурная зависимость ϵ и $tg\delta_\epsilon$ твердых диэлектриков близка температурной зависимости емкости и $tg\delta_x$ конденсатора, между обкладками которого находится данный диэлектрик,

В соответствии с инструкцией по эксплуатации цифрового моста и термостата, имеющихся на рабочем месте, провести измерение емкости и $tg\delta_x$ исследуемых конденсаторов в диапазоне температур от 30 до 70°C через каждые 5°C. Данные измерений занести в табл.4.1.

Таблица 4.1

| Наименование диэлектрика и тип конденсатора | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|--|
| $t^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | |
| C | | | | | | | |
| $\text{tg}\delta_{\varepsilon}$ | | | | | | | |

Измерение емкости C и $\text{tg}\delta_{\varepsilon}$ начинают при комнатной температуре, не включая термостат.

При исследовании некоторых керамических конденсаторов, отличающихся сильной зависимостью емкости от температуры (группы ТКЕ, М700 и М1500), целесообразно снизить скорость нагрева термостата.

4.3. Построить графики температурной зависимости C и $\text{tg}\delta_{\varepsilon}$ конденсаторов с исследуемыми диэлектриками.

При построении графика температурной зависимости емкости $C = \varphi(t^{\circ}\text{C})$ для начала отсчета по оси ординат нужно взять значение емкости, близкое минимальной емкости, полученной в опыте, а конечное деление оси должно быть близко к максимальной измеренной емкости, чтобы получить четкое представление об исследованной зависимости.

4.4. На основании графика температурной зависимости емкости определить температурный коэффициент емкости ТКЕ конденсатора с данным диэлектриком.

При линейной зависимости емкости от температуры или близкой к ней для определения ТКЕ можно воспользоваться формулой

$$\text{ТКЕ} = \frac{C_2 - C_1}{C_1(t_2 - t_1)} (\text{град}^{-1}),$$

где C_1 - значение емкости, определенное по графику ее температурной зависимости при комнатной температуре t_1 ;

C_2 - то же при верхней температуре измерений t_2 .

Следует особо подчеркнуть, что значения емкости C_1 и C_2 нужно брать не из табл.4.1, а определять из графика, что уменьшает влияние погрешностей измерений на результат расчета ТКЕ.

Значение ТКЕ конденсаторов рекомендуется выразить в миллионных долях град^{-1} . Сравните полученный результат с нормативами для исследуемого конденсатора, имеющимся на рабочем месте.

При нелинейной зависимости $C = \varphi(t^{\circ}\text{C})$ ТКЕ определяют для линейных участков, получаемых путем аппроксимирования кривых температурных зависимостей отрезками прямых.

4.5. Определить температурный коэффициент диэлектрической проницаемости ТК.

Между ТКЕ конденсатора, температурным коэффициентом ε (TK_ε) температурным коэффициентом линейного расширения металла обкладок - ТК l_M и диэлектрика – ТК l_D существует следующее приближенное соотношение:

$$ТКЕ = ТК_\varepsilon + 2ТК l_M - ТК l_D.$$

Для конденсаторов, обкладки которых выполнены металлизацией поверхности диэлектрика (керамические, слюдяные типа СГМ)

$ТК l_M \cong ТК l_D$ и $ТКЕ = ТК_\varepsilon + ТК l_D$.

4.6. Проанализировать полученные результаты.

Рекомендуется оценить температурную стабильность исследованного конденсатора. Исходя из химического состава структуры диэлектрика конденсатора и его температурных зависимостей $tg \delta_\varepsilon$ и C , определить вид поляризации и характер диэлектрических потерь в диэлектрике.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, таблицу результатов измерений $C = \delta(t^\circ C)$, $tg \delta_\varepsilon = \varphi(t^\circ C)$, расчеты ТКЕ и TK_ε , графики температурных зависимостей C и $tg \delta_\varepsilon$ и анализ полученных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое температурные коэффициенты диэлектрической проницаемости и емкости и какая между ними связь?
2. Какова зависимость от температуры различных видов поляризации?
3. Как зависит от температуры диэлектрическая проницаемость неполярных и полярных диэлектриков?
4. Какова зависимость от температуры диэлектрической проницаемости ионных кристаллов?
5. Какие диэлектрики имеют наименьший и наибольший ТКЕ?
6. Какова зависимость от температуры $tg \delta_\varepsilon$ диэлектриков с упругой и релаксационной поляризацией?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является определение основных характеристик магнитомягкого материала и их зависимости от напряженности переменного магнитного поля.

2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с теорией исследуемого вопроса.

2.2. Ознакомиться с методикой измерений.

2.3. Произвести градуировку осциллографа.

2.4. Определить зависимости магнитной индукции и динамической магнитной проницаемости от напряженности переменного магнитного поля.

2.5. Определить значения коэрцитивной силы, остаточной индукции и удельных магнитных потерь.

2.6. Построить графики зависимостей $B_m = \varphi(H_m)$, $\mu_{\sim} = \varphi(H_m)$.

2.7. Дать оценку магнитных свойств материала.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ

3.1. Свойства магнитных материалов во внешнем магнитном поле.

Процесс намагничивания ферромагнетика в постоянном магнитном поле описывается основной кривой намагничивания $B = \varphi(H)$, показанной на рис.5.1. Вначале (в слабых магнитных полях) намагничивание происходит за счет роста тех доменов, магнитные моменты которых близки по направлению к внешнему полю (процесс смещения границ доменов). В более сильных полях намагничивание происходит за счет поворота магнитных моментов доменов в направлении внешнего поля (процесс ориентации), благодаря чему достигается магнитное насыщение. Магнитная проницаемость μ определяется по основной кривой намагничивания.

Магнитная проницаемость μ_H при $H \cong 0$ называется начальной проницаемостью. Наибольшее значение магнитной проницаемости носит название максимальной проницаемости и обозначается μ_{max} . При сильных полях в области насыщения магнитная проницаемость μ стремится к единице.

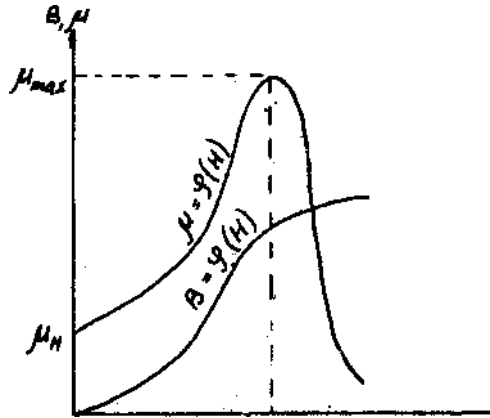


Рис.5.1. Характер зависимостей $B = \varphi(H)$ и $\mu = \varphi(H)$

При воздействии на ферромагнетик переменного магнитного поля зависимость индукции насыщения от напряженности магнитного поля $B_{\sim} = \mu_{\sim} \mu_0 H_{\sim}$ будет выражаться петлей гистерезиса (рис .5.2).

При амплитуде напряженности магнитного поля (H_{m4}), соответствующей магнитному насыщению, будет иметь место предельный гистерезисный цикл. Параметры полученной при этом предельной петли гистерезиса (индукция насыщения B_s , остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c) служат характеристиками ферромагнетика. При меньших значениях амплитуд напряженности поля (H_{m3} , H_{m2} , H_{m1}) будут иметь место частные гистерезисные циклы с соответствующими петлями гистерезиса.

Основная кривая намагничивания может быть получена экспериментально как геометрическое место вершин петель гистерезиса $B_m = \varphi(H_m)$ (см. рис.5.2).

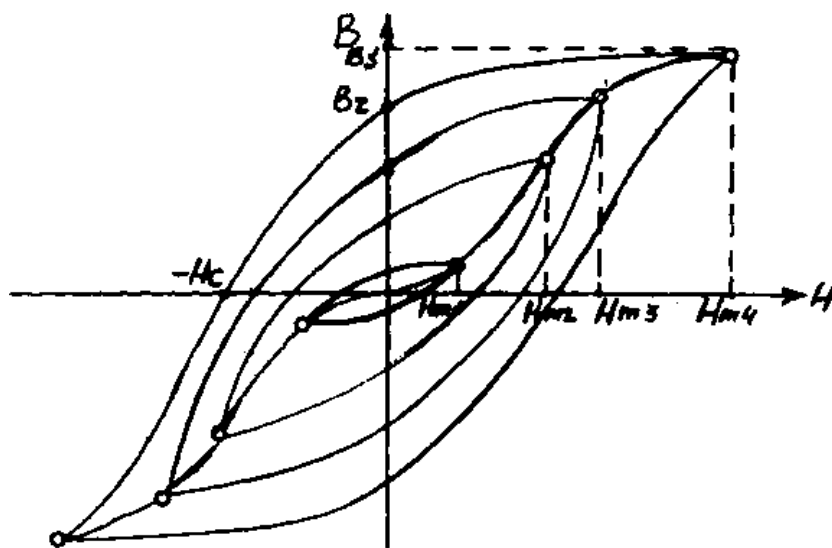


Рис .5.2. Петли гистерезиса при различных амплитудных значениях напряженности магнитного поля

При перемагничивании ферромагнетика в переменном поле в нем возникают потери энергии. К основным видам магнитных потерь относятся потери на гистерезис и потери на вихревые токи.

С увеличением частоты потери на гистерезис возрастают пропорционально частоте, а потери на вихревые токи - пропорционально квадрату частоты, поэтому последние играют основную роль на высоких частотах. Значения удельных магнитных потерь на гистерезис и вихревые токи пропорциональны площади соответствующей петли гистерезиса.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Принципиальная схема метода

Исследование магнитных свойств ферромагнетика осуществляется на тороидальных образцах с помощью осциллографа по схеме, приведенной на рис. 5.3.

Изображение петли гистерезиса на экране осциллографа можно получить, если на вход осциллографа «Y» подать напряжение, пропорциональное магнитной индукции B , а на вход «X» подать напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля H .

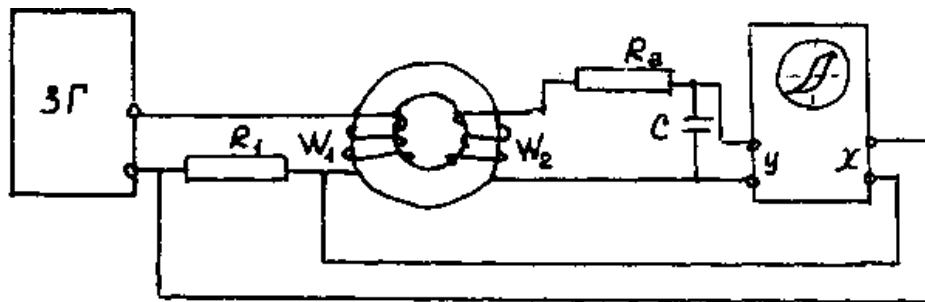


Рис.5.3. Схема установки для измерения основных параметров ферромагнетика

Тороидальный образец ферромагнетика имеет две обмотки. Через первичную обмотку с числом витков W_1 проходит ток, создающий магнитное поле напряженности H . Эта напряженность может быть рассчитана по падению напряжения U_H на резисторе R_1 , включенном последовательно с первичной обмоткой

$$H = \frac{W_1 \cdot U_H}{R_1 \cdot l_{cp}}$$

где l_{cp} - средняя длина магнитной силовой линии в образце.

Под действием магнитного поля первичной обмотки во вторичной обмотке с числом витков W_2 индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитной индукции B . Напряжение на конденсаторе будет пропорционально индукции B

$$U_B = \frac{W_2 \cdot S_0 \cdot B}{R_2 \cdot C}$$

где S_0 - площадь сечения магнитопровода, см^2 .

3.2. Подготовка к работе.

3.2.1. Проверить схему установки и ознакомиться с особенностями конструкции и регулировок, входящих в нее приборов: звукового генератора, осциллографа, лампового вольтметра и макета.

3.2.2. Подключить ламповый вольтметр к входным клеммам звукового генератора.

3.2.3. Ручку регулировки выходного напряжения генератора установить в крайнее левое положение; ручки усиления "X" и "Y" осциллографа установить в положение, соответствующее минимальному усилению; тумблеры "Градуировка осциллографа" на макете выключить.

3.2.4. Включить приборы.

3.3. Градуировка осциллографа.

3.3.1. С помощью лимба установить частоту генератора 50 Гц; регулировкой выходного напряжения установить его максимальное значение, контролируя его по ламповому вольтметру.

3.3.2. Сфокусировать электронный луч и установить его в центре координатной сетки экрана осциллографа.

3.3.3. Ручками горизонтального и вертикального усиления осциллографа развернуть изображение гистерезисной петли на экране.

3.3.4. Включить на макете тумблер "Градуировка осциллографа по оси X".

3.3.5. Ручкой регулировки горизонтального усиления осциллографа добиться отклонения луча на экране на 30-40 мм в каждую сторону от центра (X_{max}).

3.3.6. С помощью лампового вольтметра измерить напряжение U_H на резисторе R_I , пропорциональное напряженности магнитного поля H , для чего вольтметр подключить ко входу "X" осциллографа или к клеммам "X" на макете.

3.3.7. Выключить тумблер "Градуировка осциллографа по оси X" и включить тумблер "Градуировка осциллографа по оси Y".

3.3.8. Ручкой регулировки вертикального усиления осциллографа развернуть луч по вертикали на 25 - 35 мм в каждую сторону от центра (Y_{max}).

3.3.9. Подключить вольтметр ко входу "Y" осциллографа или к клеммам "Y" на макете и измерить напряжение U_B на конденсаторе C , пропорциональное индукции B в образце ($U_B \cong 30 - 100$ мВ).

3.3.10. Занести данные измерений в табл. 5.1.

3.3.11. Рассчитать масштаб горизонтальной оси X по формуле,
 A м⁻¹/мм,

$$h = \frac{45 \cdot W_1 \cdot U_H}{R_1 \cdot D_{cp} \cdot X_{max}}$$

Результат расчета занести в табл.5.1.

Таблица 5.1

| Горизонтальная ось, X | | | | | |
|-----------------------|------------------|-------|-----------------|--------------|-------------------------------|
| $U_H,$ В | $X_{max},$ мм | W_1 | $D_{cp},$ см | $R_1,$ Ом | $h,$ А м ⁻¹ /мм |
| | | | | | |

| Горизонтальная ось, Y | | | | | | |
|-----------------------|------------------|-------|---------------------------|--------------|-----------|---------------|
| $U_B,$ В | $Y_{max},$ мм | W_2 | $S_0,$ см ² | $R_2,$ Ом | $C,$ Ф | $b,$ Тл/мм |
| | | | | | | |

3.3.12. Рассчитать масштаб вертикальной оси "Y" по формуле, Тл/мм,

$$b = \frac{1,4 \cdot 10^4 \cdot U_B \cdot C \cdot R_2}{W_2 \cdot S_0 \cdot Y_{max}}$$

Результат расчета занести в табл. 5.1.

3.4. Определение зависимости магнитной индукции и динамической магнитной проницаемости от напряжённости переменного магнитного поля.

3.4.1. Основную кривую намагничивания получают соединением плавной кривой вершин гистерезисных петель, полученных при различных значениях напряженности переменного магнитного поля.

3.4.2. Регулировкой выходного напряжения генератора произвести ступенчатое повышение напряженности магнитного поля с расчетом, чтобы координата X вершины петли изменялась с шагом 5 мм до максимального значения X_{max} соответствующего состоянию насыщения образца. Для удобства установки необходимого значения координаты X можно пользоваться тумблером "Градуировка осциллографа X". Величину Y при заданных значениях X рекомендуется определять непосредственно по петле гистерезиса. Результаты измерений занести в табл. 5.2.

3.4.3. Рассчитать амплитудные значения напряженности H, А/м и индукции B, по формулам:

$$H_m = h \cdot x ; \quad B_m = b \cdot y$$

Результаты вычислений занести в табл.5.2.

Таблица 5.2

Результаты измерений и расчета

| $X, \text{ мм}$ | $Y, \text{ мм}$ | $H_m, \text{ А/м}$ | $B_m, \text{ Тл}$ | μ_{\sim} |
|-----------------|-----------------|--------------------|-------------------|--------------|
| 5 | | | | |
| 10 | | | | |
| ... | | | | |
| X_{max} | Y_{max} | | | |

3.4.4. Построить график $B_m = \varphi(H_m)$, изображающий кривую намагничивания образца материала в переменном поле данной частоты.

3.4.5. Рассчитать значения динамической магнитной проницаемости по формуле

$$\mu_{\sim} = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м}$.

3.4.6. Построить график зависимости $\mu_{\sim} = \varphi(H_m)$ совмещенный с графиком $B_m = \varphi(H_m)$; определить μ_{max} и напряженность поля, при котором она достигается.

3.5. Определение коэрцитивной силы, остаточной индукции и удельных магнитных потерь.

3.5.1. Намагнитить образец до насыщения и по предельной петле гистерезиса измерить координату X_c точки пересечения петли с отрицательной полуосью и координату Y_r точки пересечения петли с вертикальной осью.

3.5.2. Рассчитать значения коэрцитивной силы H_C (А/м), а также остаточной индукции B_r (Тл) по формулам:

$$H_C = h \cdot X_C ; B_r = b \cdot Y_r$$

Результаты расчета занести в табл. 5.3.

3.5.3. Рассчитать значения удельных магнитных потерь по формуле, Вт/кг,

$$P_{уд} = \frac{0,1 \cdot S_{\Pi} \cdot h \cdot b \cdot f}{\rho}$$

где S_{Π} – площадь предельной петли гистерезиса, определяемая с помощью кальки и миллиметровки, см^2 ;

ρ - плотность материала, г/см³;

f - частота изменения магнитного поля, Гц.

Результаты расчета занести в табл.5.3.

Таблица 5.3

| X_C мм | Y_r мм | S_n см ² | H_C А/м | B_r Тл | ρ г/см ³ | $P_{уд}$ Вт/кг |
|-------------|-------------|--------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------|
| | | | | | | |

3.5.4. По вычисленным значениям H_C , $P_{уд}$, B_m , $\mu_{\sim max}$ дать оценку магнитных свойств материала.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, схему установки, таблицы результатов измерений и расчетов, графики зависимостей $B_m = \varphi(H_m)$ и $\mu_{\sim} = \varphi(H_m)$; оценку магнитных свойств материала.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое основная кривая намагничивания?
2. Чем обусловлены потери в магнитных материалах?
3. Что такое магнитная проницаемость?
4. Каковы величины относительной магнитной проницаемости измеренных материалов?

Лабораторная работа 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА МАГНИТНЫХ ПОТЕРЬ ФЕРРИТОВ И МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является определение динамической магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь магнитомягких ферритов и магнитодиэлектриков и исследование зависимости этих параметров от частоты.

2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями к работе.

2.2. Ознакомиться с методикой измерения.

2.3. Подготовить измеритель добротности к работе.

2.4. Исследовать частотную зависимость индуктивности и добротности катушек с кольцевыми магнитопроводами.

Вариант 1. Материалы магнитопроводов - феррит типа 2000 НМ, 2000 НН и магнитодиэлектрик на основе или альсифера типа ТЧ60, или карбонильного железа типа ПЧ, Р2.

Вариант 2. Материалы магнитопроводов – ферриты 400 НН, 200 НМ и 600 НМ, 600 НН.

2.5. Рассчитать динамическую магнитную проницаемость и тангенс угла магнитных потерь материалов магнитопроводов.

2.6. Построить графики частотной зависимости динамической магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь исследованных материалов.

2.7. Проанализировать полученные результаты.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ К РАБОТЕ

Магнитно-мягкие ферриты и магнитодиэлектрики представляют собой высокочастотные магнитные материалы.

Ферриты – это поликристаллические вещества, являющиеся химическими соединениями окиси железа Fe_2O_3 с окислами других металлов; получают спеканием при высокотемпературном обжиге (по технологии ке-

рамики).

Магнитодиэлектрики – это неоднородные материалы, содержащие магнитную фазу в виде зерен ферромагнетика, изолированных друг от друга пленкой диэлектрического немагнитного связующего; получают прессованием (по технологии пластмасс).

По природе своего магнетизма ферриты относятся к антиферромагнетикам, т.е. веществам, у которых нескомпенсированные спины электронов соседних магнитных катионов (Fe^{+3} , Ni^{+2} , Co^{+2} , Mn^{+2}) ориентируются антипараллельно. Результирующим магнитным моментом и спонтанной намагниченностью обладают лишь те соединения, у которых магнитные моменты катионов одного направления преобладают над магнитными моментами катионов антипараллельного направления. Такие нескомпенсированные антиферромагнетики называются ферримагнетиками, они обладают магнитными свойствами, подобными ферромагнетикам, и к ним принадлежит большая часть ферритов.

Широкое распространение получили ферриты двухвалентных металлов, кристаллизующиеся в структуру минерала шпинели, с общей формулой $Me^{+2}O \cdot Fe_2^{+3}O_3$ – феррошпинели. Из них магнитными являются ферриты с характеризующими ионами: Ni^{+2} , Mn^{+2} , Cu^{+2} , Mn^{+2} , Co^{+2} , Fe^{+2} , а также ферриты одновалентного лития $Li_2^{+1}O \cdot (Fe_2O_3)_5$; они имеют структуру обращенной шпинели. Не магнитны ферриты с характеризующими ионами Zn^{+2} и Cd^{+2} со структурой нормальной шпинели.

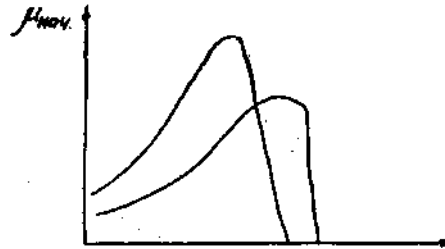
В кубической решетке феррошпинелей можно выделить две подрешетки А и В, в которых тем или иным образом в зависимости от радиуса располагаются катионы Fe^{+3} и характеризующего металла Me^{+2} . Магнитные моменты катионов, расположенных в разных подрешетках А и В, всегда антипараллельны, в то время как в пределах одной подрешетки, например В, они могут быть параллельны.

В технике широко применяются двойные ферриты, представляющие собой твердые растворы магнитного и немагнитного феррита, - никель-цинковые, марганцово-цинковые, литиево-цинковые.

Ферриты в постоянном поле имеют невысокую индукцию насыщения $B \sim 0,15 \div 0,5$ Тл, что значительно ниже B_s магнитных сплавов, у которых эта величина может достигать значений 2,45 Тл. Однако в переменных полях высокой частоты у сплавов вследствие размагничивающего действия вихревых токов B сильно падает. В ферритах вследствие их высокого удельного сопротивления ($10^3 - 10^{12}$ Ом·см)

вихревые токи пренебрежимо малы, поэтому ферриты сохраняют свои магнитные свойства в полях высокой частоты. У промышленных ферритов начальная магнитная проницаемость $\mu_{нач}$ достигает 6000, максимальная $\mu_{max} - 15000$.

С повышением температуры магнитная проницаемость ферритов растет, достигая максимума в точке Кюри (рис.6.1), поэтому температурный коэффициент проницаемости у них положительный:
 $TK\mu \sim 10^{-3} - 10^{-2} \text{ 1/град.}$



6.1. Температурная зависимость магнитной проницаемости

С повышением частоты величина μ вначале остается постоянной, а затем снижается, одновременно сильно возрастает тангенс угла магнитных потерь $tg \delta_\mu$ (рис.6.2.). Граничной частотой рабочего диапазона считается та частота, при которой $tg \delta_\mu$ достигает значения 0,1. Наблюдается определенная связь между начальной проницаемостью $\mu_{нач}$ и $f_{гр}$: чем выше $\mu_{нач}$ тем ниже $f_{гр}$.

В обозначении феррита первые цифры указывают начальную магнитную проницаемость, Н - низкочастотный, вторая буква Н – никелевоцинковый, М – марганцевоцинковый, ВЧ – высокочастотный.

Для изготовления магнитодиэлектриков в качестве порошкообразной магнитной фазы используют материалы с высокой проницаемостью: альсифер ($\mu_{нач} = 3 \cdot 10^4$), карбонильное железо ($\mu_{нач} = 3 \cdot 10^3$), реже высоконикелевый пермаллой ($\mu_{нач} \sim 10^4 - 10^5$) и высокопроницаемые ферриты. В качестве связующего используют для низкочастотных сердечников, в основном, формальдегидные и эпоксидные смолы, для высокочастотных – полистирол.

Эффективная магнитная проницаемость для магнитодиэлектрика из-за наличия немагнитного связующего не велика $\mu_{эф} \sim 5 - 80$. Достоинства их состоят в том, что они имеют высокое эффективное удельное сопротивление (до $10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{см}$), малые магнитные и диэлект-

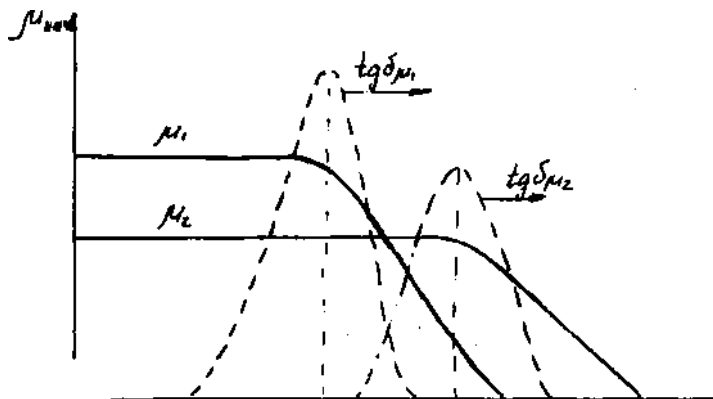


Рис.6.2. Частотные характеристики $\mu_{нач}$ и $tg \delta_{\mu}$ ферритов

рические потери и, что особенно важно, высокую температурную и временную стабильность магнитных параметров. Благодаря этому они в ряде случаев применяются вместо ферритов.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения параметров катушек индуктивности с магнитопроводами из исследуемых материалов проводятся с помощью измерителя добротности (см. работу 3).

4.1. Ознакомиться с принципом работы измерительного прибора с помощью инструкции, имеющейся на рабочем месте, ознакомиться с расположением ручек регулировки измерителя добротности. Подготовить прибор к работе.

4.2. Исследовать частотную зависимость индуктивности и добротности катушек с магнитопроводами из исследуемых материалов. Частотный диапазон, в котором проводится измерение, и шаг измерения частоты Δf указаны на корпусе катушки. Исследуемую катушку подключить к клеммам " L_x " прибора. В соответствии с инструкцией по эксплуатации измерителя добротности, имеющейся на рабочем месте, установить требуемую частоту, настроить контур в резонанс изменением емкости и провести измерение резонансных емкости и добротности. Данные измерений занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

| Материал магнитопровода | | | | | | Материал магнитопровода | | | | | |
|---|-----------|-----|------------|--------------|-------------------|---|-----------|-----|------------|--------------|-------------------|
| $Q = \dots 1/\text{мГн}; r_k = \dots \text{Ом};$ $C_3 = \dots \text{пФ}$ | | | | | | $Q = \dots 1/\text{мГн}; r_k = \dots \text{Ом};$ $C_3 = \dots \text{пФ}$ | | | | | |
| f кГц | C пФ | Q | L мГн | μ_{\sim} | $tg \delta_{\mu}$ | f кГц | C пФ | Q | L мГн | μ_{\sim} | $tg \delta_{\mu}$ |
| | | | | | | | | | | | |

Значение индуктивности катушки определяется на основе измеренной резонансной емкости C по формуле, мГ:

$$L = \frac{2,53 \cdot 10^7}{f^2(C_3 - C_0)}$$

где f – частота, кГц;

C_0 – собственная емкость катушки, пФ;

C_3 – определяется из выражения, пФ,

$$C_3 = \frac{10^4 \cdot C}{(10^4 + C)}$$

При значениях C , меньших 100 пФ, можно считать $C_3 \cong C$.

4.3. Рассчитать динамическую магнитную проницаемость μ_{\sim} и тангенс угла магнитных потерь $tg \delta_{\mu}$ материалами магнитопровода.

Величина μ_{\sim} вычисляется по формуле

$$\mu_{\sim} = a \cdot L,$$

где a – множитель, определяемый размерами магнитопровода и числом витков катушки, 1/мГ; его величина указана на корпусе катушки;

L – индуктивность катушки, мГ.

Значение $tg \delta_{\mu}$ материала магнитопровода определяется из значения Q добротности катушки по формуле:

$$tg \delta_{\mu} = \frac{1}{Q} - \frac{0,16 \cdot r_k}{f \cdot L}$$

где r_k – сопротивление обмотки катушки, Ом;

f – частота, кГц;

L – индуктивность катушки, мГ.

4.4. Построить графики частотной зависимости μ_{\sim} и $tg \delta_{\mu}$ исследованных материалов. Графики $\mu_{\sim} = \varphi(f)$ и $tg \delta_{\mu} = \varphi(f)$ для обоих исследованных материалов нужно построить совместно в одной системе координат, подобрав соответствующим образом масштаб. Это облегчит сравнение частотных характеристик материалов.

4.5. Проанализировать полученные результаты.

Рекомендуется сопоставить полученные экспериментально зависимости динамической магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь исследованных ВЧ магнитных материалов с известными положениями теории.

На основании изменений μ_{\sim} , $tg \delta_{\mu}$ с частотой оценить критическую частоту f_k материала по резкому изменению одной из характеристик.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, таблицу результатов измерений $C = \varphi(f)$ кГц и $Q = \varphi(f)$ кГц, расчеты μ_{\sim} и $tg \delta_{\mu}$ и графики зависимостей $\mu_{\sim} = \varphi(f)$ и $tg \delta_{\mu} = \varphi(f)$, а также анализ полученных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЙ ВОПРОСЫ

1. Какой химический состав и структура ферритов?
2. Что такое магнитодиэлектрики?
3. Почему ферриты и магнитодиэлектрики сохраняют свои магнитные свойства на высоких частотах?
4. В чем заключается особенность природы магнетизма ферритов?
5. Что такое граничная и критическая частоты ферритов?

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| Лабораторная работа 1. Исследование структуры отожженных углеродистых сталей..... | 3 |
| Лабораторная работа 2. Анализ влияния режима термической обработки на свойства конструкционных углеродистых сталей..... | 10 |
| Лабораторная работа 3. Исследование частотной зависимости диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь твердых диэлектриков..... | 17 |
| Лабораторная работа 4. Исследование температурной зависимости диэлектрической проницаемости и потерь в твердых диэлектриках..... | 24 |
| Лабораторная работа 5. Исследование свойств магнитномягких материалов..... | 31 |
| Лабораторная работа 6. Исследование частотной зависимости магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь ферритов и магнитодиэлектриков..... | 40 |